



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA

CAMPUS DE BAURU - SP

RONIVAN SOUSA DA SILVA SUTTINI

**INVESTIGANDO A NATUREZA DA CIÊNCIA:
ANÁLISE DE UMA ABORDAGEM CONTEXTUAL EXPLÍCITA SOBRE
O EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO SUPERIOR**

BAURU – SP

2025

RONIVAN SOUSA DA SILVA SUTTINI

**INVESTIGANDO A NATUREZA DA CIÊNCIA:
ANÁLISE DE UMA ABORDAGEM CONTEXTUAL EXPLÍCITA SOBRE
O EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO SUPERIOR**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Ciências, Campus Bauru-SP, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência.

Área de Concentração: Ensino de Ciências

Orientador: Prof. Dr. João José Caluzi

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a. Nádia Cristina G. Errobidart

BAURU – SP

2025

S963i

Suttini, Ronivan Sousa da Silva

Investigando natureza da ciência: análise de uma abordagem contextual explícita sobre o efeito fotoelétrico no ensino superior /
Ronivan Sousa da Silva Suttini – Bauru, SP, 2025

530 f. : il., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências, Bauru, 2025.

Referências bibliográficas: f.412–442.

Orientador: João José Caluzi.

Coorientadora: Nádia Cristina Guimarães Errobidart.

1. Ensino de Ciências. 2. História, Filosofia e Sociologia da
Ciência. 3. Natureza da Ciência. 4. Teoria Quântica da Radiação. 5.
Efeito Fotoelétrico.

RONIVAN SOUSA DA SILVA SUTTINI

**INVESTIGANDO A NATUREZA DA CIÊNCIA:
ANÁLISE DE UMA ABORDAGEM CONTEXTUAL EXPLÍCITA SOBRE
O EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO SUPERIOR**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Ciências, Campus Bauru-SP, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência.

Área de Concentração: Ensino de Ciências

Orientador: Prof. Dr. João José Caluzi

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a. Nádia Cristina G. Errobidart

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João José Caluzi
Faculdade de Ciências – FC – UNESP – Campus de Bauru - SP
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos
Departamento de Ciências Naturais, Estatística e Matemática – UFERSA – Campus de Mossoró - RN

Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves
Departamento de Física - UEM – Maringá – PR

Prof. Dr. Moacir Pereira de Souza Filho
Departamento de Física – UNESP – Campus de Presidente Prudente – SP

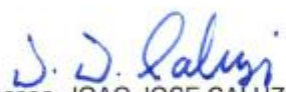
Prof. Dr. José Bento Suart Júnior
Coordenação do Curso de Licenciatura em Química - UTFPR – Campus de Apucarana - PR

BAURU – SP

2025

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RONIVAN SOUSA DA SILVA SUTTINI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 de julho de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RONIVAN SOUSA DA SILVA SUTTINI, intitulada **Investigando a Natureza da Ciência: análise de uma abordagem contextual explícita sobre o efeito fotoelétrico no ensino superior**, sob orientação do Prof. Dr. Joao Jose Caluzi. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Assoc. JOAO JOSE CALUZI (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências Unesp Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO DOS SANTOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciências Naturais, Estatística e Matemática / Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Prof. Dr. MARCOS CESAR DANHONI NEVES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Universidade Estadual de Maringá - UEM, Prof. Dr. MOACIR PEREIRA DE SOUZA FILHO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Unesp, Prof. Dr. JOSÉ BENTO SUART JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) Coordenação do Curso de Licenciatura em Química-Apucarana / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Assoc. JOAO JOSE CALUZI

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais – Maria Aparecida de Souza Silva e Silvano José da Silva – e à minha irmã Silvana Sousa da Silva (e ao meu sobrinho Gabriel Souza Navarro) por todo estímulo, carinho e sacrifícios que me permitiram desenvolver meus estudos e chegar até aqui. Cada gesto de apoio, cada cobrança e cada conselho deixaram marcas profundas em minha trajetória.

Um agradecimento especial à minha esposa, Isabella Suttini Ferreira, por estar ao meu lado, diariamente, não apenas no período de doutorado, mas há muitos anos. Seu carinho, compreensão e força me motivam a ser uma pessoa melhor a cada dia. Obrigado por tudo, especialmente por me compreender, me apoiar e, claro, por me aturar nos momentos mais difíceis (rs).

Agradeço ao Prof. Rodenil Monteiro da Silva, meu professor de Física do Ensino Médio e, mais tarde, meu “supervisor de estágio”, companheiro de estrada e docência, por tantas orientações e auxílios que fizeram a diferença no meu percurso.

Agradeço a todos os amigos – da vida pessoal e profissional – que de diversas maneiras contribuíram para minha formação e carreira docente.

Sou grato ao *Laboratório de Estudo em História e Epistemologia da Física (LEHEF)*, formado por pessoas que admiro profundamente. Em especial, agradeço ao meu amigo de doutorado, pesquisador, companheiro de congressos, Eliéverson Gonzales. Nosso diálogo constante sobre pesquisas e dilemas da docência foi essencial para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Nádia Cristina Guimarães Errobidart, minha coorientadora, por toda ajuda e orientação nesses 10 anos de jornada, desde o mestrado até a defesa dessa tese de doutorado.

E, finalmente, faço um especial agradecimento ao Prof. Dr. João José Caluzi, meu orientador nesses quatro anos de pesquisa. Foi uma honra ser aluno, “auxiliar docente” e último orientando de doutorado. Obrigado por todo apoio, conversas e ensinamentos. Aproveita sua aposentadoria; sem dúvidas, é muito merecida!

*Passaram-se muitos anos,
Mas, enfim, veio uma batida,
E eu pensei na porta
Sem fechadura para trancar.*

*Apaguei a luz,
Andei na ponta dos pés pelo chão,
E ergui ambas as mãos
Em prece à porta.*

*Mas a batida veio novamente,
Minha janela estava escancarada;
Subi no parapeito
E desci para fora.*

*De volta ao parapeito,
Eu disse um “Entre”
Para quem quer que fosse
A batida na porta.*

*E assim, com uma batida,
Esvaziei minha gaiola,
Para me esconder no mundo
E mudar com o tempo.*

Robert Frost, “A Porta sem Fechadura”, 1923.

RESUMO

Esta pesquisa insere-se na conjuntura de desafios da educação científica contemporânea, os quais exigem o desenvolvimento não apenas de um saber *de* ou *em* ciências, mas também uma compreensão mais precisa e bem informada *sobre* a Natureza da Ciência, especialmente na formação de professores de Física. Parte-se da premissa que a escolha do tópico curricular “efeito fotoelétrico” possibilita uma investigação empírica sobre o uso de abordagens contextuais explícitas, que contemplem aspectos históricos, filosóficos e sociológicos da ciência. Essa escolha justifica-se, sobretudo, pelas modificações teóricas e controvérsias científicas ocorridas no início do século XX. Esses elementos favorecem o processo de ensino por sua capacidade de promover momentos de argumentação, discussão, reflexão e exemplificação da integração dinâmica entre dados experimentais e fundamentos teóricos. O objetivo geral do estudo é analisar as contribuições de uma abordagem contextual explícita sobre a história do efeito fotoelétrico, organizada para ser implementada na disciplina de História da Ciência, em um curso de graduação em Física, adotando como referencial de ensino a Teoria da Aprendizagem Significativa e, como referência teórico-metodológica, a visão consensual da Natureza da Ciência e seus respectivos princípios heurísticos representativos. A escassez de pesquisas historiográficas sobre as emissões fotoelétricas no contexto nacional, antes um obstáculo, foi superada por meio da elaboração de uma narrativa histórica abrangente, que representa a primeira contribuição deste trabalho para o fortalecimento da “Educação para a Ciência”. No que diz respeito à pesquisa empírica – referente à implementação da disciplina História da Ciência 2023-1 –, a coleta de dados envolveu questionários fechados sobre aspectos da Natureza da Ciência (com respostas itens tipo-Likert de cinco pontos), além de questões abertas sobre a organização didático-estrutural e execução dos planos aula. Também foram analisados os relatos semanais intitulados “Memórias & Discussões”, produzidos por 23 estudantes ao longo do semestre. Os resultados sugerem avanços na compreensão dos estudantes sobre a Natureza da Ciência, com indícios de aprendizagem significativa, especialmente quanto aos aspectos socioculturais e criativos. A análise qualitativa também destacou percepções satisfatórias sobre as estratégias didáticas, a estrutura da disciplina e os impactos formativos dos futuros docentes. Persistiram, contudo, concepções simplificadas e desafios práticos que requerem ajustes em futuras implementações.

Palavras-chave: Ensino de Ciências. História, Filosofia e Sociologia da Ciência. Natureza da Ciência. Teoria Quântica da Radiação. Efeito Fotoelétrico.

ABSTRACT

This research is situated within the broader context of the challenges facing contemporary science education, which demand not only the development of knowledge *about* or *within* science but also a more accurate and well-informed understanding of the Nature of Science (NoS), particularly in the preparation of future physics teachers. The study proceeds from the premise that the curricular topic of the “photoelectric effect” provides an opportunity for empirical investigation into explicitly contextual approaches – those that incorporate the historical, philosophical, and sociological dimensions of science. This topic is well-suited due to the theoretical transformations and scientific controversies that emerged in the early twentieth century. These elements enhance the teaching and learning process by fostering opportunities for argumentation, discussion, reflection, and exemplification of the dynamic integration between experimental data and theoretical foundations. The general objective to analyze the contributions of an explicitly contextual historical approach to the history of the photoelectric effect, structured for implementation in a History of Science course within an undergraduate physics program. The study adopts Ausubel’s Theory of Meaningful Learning as its pedagogical framework and employs the consensus view of the Nature of Science and its representative heuristic principles as its theoretical-methodological reference. The lack of historiographical research on photoelectric emissions in the Brazilian context – previously a limitation – was addressed through the development of a comprehensive historical narrative. This narrative represents the first contribution of this study to the advancement of “Education for Science”. Regarding the empirical research related to the implementation of the History of Science 2023-1 academic term – data collection included closed-ended questionnaires on Nature of Science aspects (using five-point Likert-scale items), open-ended questions concerning the didactic-structural organization and the execution of lesson plans. Weekly reports titled Memories & Discussions, written by 23 students throughout the semester, were also analyzed. The results indicate advances in students’ understanding of the Nature of Science, with evidence of meaningful learning, particularly regarding the sociocultural and creative aspects of scientific practice. Qualitative analysis also highlighted favorable perceptions of the instructional strategies, course structure, and formative impact on prospective teachers. However, simplified conceptions and practical challenges remained, suggesting the need for refinements in future implementations.

Keywords: Science Education. History, Philosophy, and Sociology of Science. Nature of Science. Quantum Theory of Radiation. Photoelectric Effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico “Mapa de Árvore” da distribuição das citações por (sub)categoria.	41
Figura 2 - Mapa conceitual ilustrando as condições para ocorrência da aprendizagem significativa.	71
Figura 3 - Representação esquemática do processo de assimilação ausubeliana e de aprendizagem significativa.	72
Figura 4 - Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), fotografado por volta de 1890.	86
Figura 5 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hertz para investigar a ação elétrica recíproca entre as descargas elétricas simultâneas em 1887.	90
Figura 6 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hallwachs (1888a) para investigação do efeito da luz ultravioleta sobre uma placa de zinco eletrostaticamente carregada utilizando um eletroscópio de folha de ouro simples.	97
Figura 7 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hallwachs (1888b) para investigação do efeito da luz ultravioleta sobre uma placa de zinco eletrostaticamente neutra utilizando um eletrômetro sensível.	97
Figura 8 - Julius Elster e Hans Geitel experimentando um fotômetro rudimentar no jardim da casa de Elster.	110
Figura 9 - Fotômetro de esfera de zinco e uma versão mais recente (1902).	112
Figura 10 - Fotografia oficial de Philipp Lenard por ocasião da entrega do Prêmio Nobel de Física de 1905.	116
Figura 11 - Aparato experimental construído por Philipp Lenard para investigar o efeito fotoelétrico.	118
Figura 12 - Curva de corrente fotoelétrica (i) em função da diferença de potencial (V), obtida por Lenard (1902), para uma frequência da luz constante, demonstrando o comportamento para três materiais distintos: carvão (fuligem), platina e alumínio.	119
Figura 13 - Ilustração do modelo atômico de Lenard para estrutura da matéria.	128
Figura 14 - Philipp Lenard recebendo o doutorado honorário na Universidade de Heidelberg, em 1942.	138
Figura 15 - Albert Einstein (1879-1955) no Escritório de Patentes em Berna, Suíça.	145
Figura 16 - Incompatibilidade conceitual entre as teorias clássica e quântica em relação à natureza da luz.	146
Figura 17 - Oscilador eletromecânico em interação – comparação esquemática entre as propostas de Planck (1901) e Einstein (1905).	152

Figura 18 - Representação de um “dupletos elétrico” proposto por Thomson (1910).	183
Figura 19 - Fotografia oficial de Robert Andrews Millikan para o Prêmio Nobel de 1923...	189
Figura 20 - Robert A. Millikan, Julius Pearson e Ira Bowen na Caltech Instrument Shop....	198
Figura 21 - Diagrama esquemático do arranjo experimental (“oficina mecânica no vácuo”).	199
Figura 22 - Gráfico ilustrando curvas fotocorrente-potencial para uma superfície metálica recém-laminada de sódio irradiada com seis diferentes comprimentos de onda.....	202
Figura 23 - Gráfico ilustrando duas curvas fotocorrente-potencial para uma superfície metálica de lítio.....	205
Figura 24 - Potencial de Corte [V] x Frequência [v] para uma superfície metálica de sódio recém-laminada.	208
Figura 25 - Arthur Holly Compton (1892 – 1962) analisa o “efeito Compton” em sala de aula.	222
Figura 26 - Diagrama vetorial de Compton para a interação do “quantum de luz” com o elétron. Um “quantum de raio-X” é desviado por um ângulo θ por um elétron (quase em repouso), que por sua vez se recua em um ângulo β , levando uma parte da energia do fóton.....	225
Figura 27 - Espectro dos raios-X do molibdênio (Mo) após serem espalhados pelo grafite, em comparação ao espectro dos raios-X primários. Note o aumento no comprimento de onda, cujos valores obtidos experimentalmente são confrontados com os previstos teoricamente.	226
Figura 28 - Duas abordagens para ensinar a História da Ciência: diacrônica e sincrônica. ...	236
Figura 29 - Formato respostas itens tipo-Likert de cinco pontos.	263
Figura 30 - Valores da mediana (Md) e do “índice de referência especialista” (S) para os vinte e seis itens declarativos da Questão 12 no questionário VOSE-RCN, abordando diferentes aspectos sobre a Natureza da Ciência.....	277
Figura 31 - Valores da mediana e do “índice de referência especialista” para os questionários VOSE-RCN (Questão 10) e VOSE-EF (Questão 9) para o aspecto de Natureza da Ciência “Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica”.....	283
Figura 32 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 1) e VOSE-EF (Questão 2) para o aspecto de NdC “Natureza do Conhecimento Científico (Teorias)”.	289
Figura 33 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 2) e VOSE-EF (Questão 3) para o aspecto de Natureza da Ciência “Natureza do Conhecimento Científico (Leis)” (contém 4-5 itens avaliativos).	293

Figura 34 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 9) e VOSE-EF (Questão 7) para o aspecto de NdC “Natureza das Observações Experimentais”.	299
Figura 35 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4) para o aspecto de NdC “Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias” (contém 5-8 itens declarativos).....	306
Figura 36 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 8) e VOSE-EF (Questão 8a, 8b e 8c) para o aspecto de NdC “Metodologia Científica”.....	312
Figura 37 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 7) e VOSE-EF (Questão 6) para o aspecto de NdC “Processo de Validação do Conhecimento Científico”.	321
Figura 38 - Valores da mediana obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 4) e VOSE-EF (Questão 5) para o aspecto de NdC “Sobre Leis e Teorias Científicas”.....	327
Figura 39 - Valores de mediana obtidos no questionário VOSE-EF (Questão 1) para o aspecto de NdC “Modelagem Científica”, assim como “índice de referência especialista”, e as respectivas classificações das concepções posteriores dos estudantes.....	333
Figura 40 - Distribuição percentual das respostas ao questionário de avaliação da disciplina de História da Ciência 2023-1.....	338

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - As sete imagens deformadas do trabalho científico de acordo com Cachapuz et al. (2005).	35
Quadro 2 - Identificação e descrição das três dimensões/categorias e das respectivas subcategorias elaboradas para sistematização das críticas à visão consensual sobre a NdC e aos NOS <i>tenets</i>	38
Quadro 3 - Sistematização das críticas à visão consensual da NdC e aos NOS <i>tenets</i>	39
Quadro 4 - Documentos selecionados para fundamentar a pesquisa historiográfica.	83
Quadro 5 - Planejamento inicial e organização didática da disciplina de História da Ciência 2023-1.	238
Quadro 6 - Estrutura organizacional do questionário VOSE-RCN.	258
Quadro 7 - Estrutura organizacional do questionário VOSE-EF.	260
Quadro 8 - Itens declarativos e resultados empíricos obtidos para a Questão 12 no Questionário VOSE-RCN.	274
Quadro 9 - Itens declarativos a respeito das “influências histórico-sociais na pesquisa científica” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 10) e VOSE-EF (Questão 9). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.	281
Quadro 10 - Itens declarativos a respeito da “Natureza do Conhecimento Científico (Teorias)” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 1) e VOSE-EF (Questão 2). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.	288
Quadro 11 - Itens declarativos a respeito da “Natureza do Conhecimento Científico (Leis)” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 2) e VOSE-EF (Questão 3). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.	292
Quadro 12 - Itens declarativos a respeito da “Natureza das Observações Experimentais” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 9) e VOSE-EF (Questão 7).	298
Quadro 13 - Itens declarativos a respeito da “Imaginação, Criatividade e Analogias” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4).	305
Quadro 14 - Itens declarativos a respeito da “Metodologia Científica” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4).	310
Quadro 15 - Itens declarativos a respeito do “Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas” investigados nos questionários VOSE-RCN (Questão 7) e VOSE-EF (Questão 6).	319

Quadro 16 - Itens declarativos a respeito do “Leis e Teorias Científicas” investigados nos questionários VOSE-RCN (Questão 4) e VOSE-EF (Questão 5).	326
Quadro 17 - Itens declarativos a respeito do “Modelagem Científica” investigados nos questionários VOSE-EF (Questão 1).....	332
Quadro 18 - Distribuição percentual das respostas ao questionário (fechado) de avaliação geral da disciplina de História da Ciência 2023-1.....	337

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo fictício ilustrando os riscos metodológicos ao observar somente os valores da média (ranking médio) em uma afirmação particular em um questionário com formato respostas itens tipo-Likert.....	262
Tabela 2 - Estrutura do questionário VOSE-RCN e a distribuição percentual das respostas em cada item.....	270
Tabela 3 - Estrutura do questionário VOSE-EF e a distribuição percentual das respostas em cada item.....	272

LISTA DE SIGLAS

NdC	Natureza das Ciências
VOSE	Questionário <i>Views on Science and Education</i> original (Chen, 2006).
VOSE-RCN	Questionário <i>Views on Science and Education</i> – Ronivan, Caluzi e Nádia
VOSE – EF	Questionário <i>Views on Science and Education</i> – Efeito Fotoelétrico
HFSC	História, Filosofia e Sociologia da Ciência
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
TAS	Teoria da Aprendizagem Significativa
NOS	Nature of Science

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	19
1 REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	25
1.1 O QUE É A NATUREZA DA CIÊNCIA?	25
1.2 POR QUE ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?.....	28
1.3 O QUE ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?	31
1.3.1 A Visão Consensual sobre a Natureza da Ciência.....	32
1.3.2 Os Princípios Heurísticos Representativos da Natureza da Ciência	43
1.4 COMO ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?.....	60
1.4.1 Abordagem contextual, explícita e reflexiva	60
1.4.2 A Teoria da Aprendizagem Significativa - TAS	66
2 A PESQUISA HISTORIOGRÁFICA	76
2.1 NARRATIVAS PSEUDO-HISTÓRICAS DO EFEITO FOTOELÉTRICO	76
2.2 A HISTÓRIA NÃO LINEAR DO EFEITO FOTOELÉTRICO.....	85
2.2.1 1887: H. R. Hertz “Tropeça” e Investiga a Interação entre Faíscas Elétricas ...	85
2.2.2 1888-1898: As Primeiras Investigações sobre o Efeito Fotoelétrico	94
2.2.3 1898-1902: As Investigações de Phillip Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico ...	113
2.2.4 1905: Albert Einstein e sua Hipótese Heurística de “Quantum de Luz”	144
2.2.5 1910-1913: Tentativas Clássicas de Interpretação do Efeito Fotoelétrico	172
2.2.6 1914-1917: As Investigações de R. A. Millikan sobre o Efeito Fotoelétrico.....	189
2.2.7 1917 – 1927: O Efeito Compton e a Aceitação da Teoria Quântica da Luz.....	220
3 A PESQUISA EMPÍRICA	230
3.1 O DELINEAMENTO DA PESQUISA EMPÍRICA.....	230
3.1.1 O Contexto Educacional da Pesquisa Empírica	231
3.1.2 Os Sujeitos da Pesquisa.....	235
3.1.3 A Disciplina de História da Ciência 2023-1.....	236
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA EMPÍRICA	256
3.2.1 Os Instrumentos de Coleta de Dados.....	256
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	269
4.1 CONCEPÇÕES PRÉVIAS SOBRE A NDC – PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES....	269
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESPOSTAS AO VOSE-RCN E VOSE-EF..	280

4.2.1	Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas.....	280
4.2.2	Sobre a Natureza do Conhecimento Científico.....	286
4.2.3	Sobre a Natureza das Observações Experimentais	297
4.2.4	Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias	304
4.2.5	Sobre a Metodologia Científica	309
4.2.6	Sobre o Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico	317
4.2.7	Sobre Leis e Teorias Científicas	325
4.2.8	Sobre a Natureza dos Modelos Científicos.....	332
4.3	O QUE AFIRMAM OS ESTUDANTES SOBRE A ORGANIZAÇÃO E IMPLMENTAÇÃO DA UNIDADE DE ENSINO NA DISCIPLINA HISTÓRIA DA CIÊNCIA 2023-1?.....	336
4.3.1	Análise das Respostas ao <i>Questionário de Avaliação Geral</i>	337
4.3.2	Análise das <i>Memórias & Reflexões</i>	351
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	397
	REFERÊNCIAS	412
	APÊNDICE A	443
	APÊNDICE B.....	485
	APÊNDICE C	506
	APÊNDICE D	522

APRESENTAÇÃO

A pesquisa intitulada “Investigando a Natureza da Ciência: análise de uma abordagem contextual explícita sobre o efeito fotoelétrico no ensino superior”, é resultado de uma investigação acadêmica de nível de doutorado em “Educação para a Ciência”, iniciada em março de 2021, no âmbito da linha de pesquisa em História, Filosofia e Sociologia da Ciência no ensino de ciências. Ela tem suas raízes motivacionais e problemáticas vinculadas ao trabalho de mestrado profissional do autor principal, desenvolvido entre 2013 e 2015, com título “A Abordagem do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio: contribuições de uma unidade de ensino potencialmente significativa” (Silva, 2015). Essa pesquisa, portanto, pode ser concebida como um desdobramento e um aprofundamento das temáticas abordadas nesse estudo anterior.

Em Silva (2015), organizamos e implementamos uma unidade de ensino potencialmente significativa acerca dos conceitos físicos presentes no experimento do efeito fotoelétrico, fundamentada na utilização de aspectos históricos e no uso de uma simulação computacional, cujo público-alvo foi um grupo de estudantes de um curso de educação profissional técnica de nível médio integrado. Naquele momento, estabeleceu-se como objetivo analisar as contribuições dessa proposta de ensino com foco na aprendizagem conceitual. Entre os principais resultados, observou-se que para alguns conceitos (e.g. energia de um fóton; função trabalho e energia cinética dos fotoelétrons) a maioria dos estudantes apresentou um número razoável de indícios de aprendizagem significativa, em contrapartida, poucos compreenderam significativamente os conceitos de dualidade onda-partícula, intensidade e frequência de luz na perspectiva da teoria quântica da radiação. Além disso, os estudantes relataram que, embora o uso de uma abordagem histórica tenha o potencial de tornar as aulas mais interessantes, a exigência de compreender um mesmo conceito com base em duas ou mais teorias científicas representava, por si só, uma dificuldade adicional em comparação às abordagens tradicionais. Isso sugere que cuidados importantes devem ser considerados nessa abordagem de ensino.

Ainda em relação a esse estudo anterior, dois outros resultados complementares se mostraram como problemáticas viáveis para investigações futuras. O primeiro refere-se à curiosidade e à visão de senso comum dos estudantes em relação ao processo de construção do conhecimento científico. Embora naquele momento a investigação sobre a aprendizagem epistemológica estivesse fora dos objetivos principais da pesquisa, observou-se que muitas vezes as perguntas e discussões em sala aula envolviam assuntos e questões *sobre* as ciências, e não apenas *de* ciências. O não planejamento prévio e a ausência de instrumentos para coleta

de informações sobre os conhecimentos epistemológicos dos estudantes, antes e depois da intervenção didática, foi considerada uma questão em aberto ao final daquele trabalho, a qual se tornaria ainda mais relevante cinco anos depois, durante a pandemia de Covid-19 em uma sociedade brasileira politicamente e ideologicamente polarizada.

Entre 2020 e 2021, no contexto de debates sobre a eficácia das medidas restritivas de atividades presenciais (“*lockdown*”, em inglês), as quais buscavam reduzir ao máximo a transmissão do coronavírus (SARS-CoV-2), se tornou ainda mais evidente (para este autor) a necessidade de momentos de discussão e reflexão, no contexto de sala de aula, sobre aspectos históricos, filosóficos e sociológicos das ciências com vistas à melhorar compreensão dos estudantes sobre como se dá o complexo processo de construção do conhecimento científico¹. Naquela época, os sintomas dessa necessidade se mostraram mais nítidos por meio da observação de alguns exemplos pragmáticos, como: a visão socioestereotipada, ingênua e negacionista da ciência; a difícil conscientização sobre o uso de máscaras de proteção; e, sobretudo, o impacto negativo da rápida disseminação de notícias falsas (“*fake news*”) sobre eficácia das vacinas contra a doença Covid-19.

De fato, para este autor, foi emblemático reconhecer que os alertas apontados dois anos antes por Andrade (2019), no artigo intitulado “Resistência à Ciência,” publicado na Revista Pesquisa FAPESP, se materializaram durante aquela tragédia de saúde pública. Andrade (2019) destacou que muitos dos ataques diários à ciência, promovidos por grupos cujas crenças ou interesses políticos e econômicos são contrariados, ou por indivíduos com baixo letramento científico, manipulados ou não pelos primeiros, decorrem de interpretações ingênuas do trabalho científico no debate sobre questões sociocientíficas, como o aumento do aquecimento global, a eficácia de vacinas e até mesmo a esfericidade da Terra. Esse cenário reforçou a importância do conhecimento epistemológico para a melhoria da educação científica contemporânea e a indicação de caminhos com potencial para promover uma formação crítica dos indivíduos.

O segundo resultado complementar, publicado em Silva e Errobidart (2015), refere-se à observação da carência de recursos didáticos de caráter histórico disponíveis na literatura brasileira de ensino de ciências, particularmente sobre o efeito fotoelétrico, bem como à escassez de estudos sobre os problemas relacionados às narrativas históricas desse conteúdo nos livros didáticos. Em contraste, a literatura internacional já apresenta um número razoável de trabalhos acadêmicos sobre o assunto (e.g. Jammer, 1966; Wheaton, 1978, 1983; Whitaker,

¹ Foi nesse período que iniciamos as primeiras reflexões sobre essa proposta de projeto de pesquisa de doutorado.

1979a, 1979b; Kragh, 1992; Niaz *et al.*, 2010; Klassen, 2011, Klassen *et al.*, 2012; Franklin, 2013).

Naquela época, identificamos somente três trabalhos nacionais abordando episódios históricos sobre o efeito fotoelétrico. Dionísio (2005) discutiu o famoso artigo de Einstein (1905) – “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” – com o objetivo de mostrar que Albert Einstein propôs, para o problema da radiação de corpo negro, uma solução alternativa e independente da apresentada por Max Planck (1900). No entanto, o autor não realizou uma discussão completa e detalhada do artigo, deixando de lado muitas seções, incluindo a subseção referente à aplicação da “hipótese de *quantum* de luz” para explicar como ocorrem as emissões fotoelétricas. Mangili (2012) discutiu o momento histórico e as incertezas acerca da prioridade da observação do efeito fotoelétrico por Heinrich Rudolph Hertz em 1887, com o objetivo de enfatizar alguns cuidados que os professores de disciplinas científicas devem estar atentos ao fazer uso de episódios da história da ciência em sala de aula². Por último, no livro publicado por Martins e Rosa (2014), os autores exploram a história do conceito da dualidade onda-partícula, no início do século XX, desde os trabalhos de Max Planck e Albert Einstein até o surgimento da teoria de Louis de Broglie. No Capítulo 1 (p. 42-53) é dada ênfase às ideias de Einstein a respeito da natureza da luz, com uma discussão detalhada sobre o artigo de Einstein (1905). No entanto, as seções sobre a aplicação da “hipótese do *quantum* de luz” para explicar a regra de Stokes, o efeito fotoelétrico e a ionização de gases por luz ultravioleta não são discutidas com a mesma profundidade das seções anteriores.

Com efeito, se formos muito rigorosos, somente o trabalho de Mangili (2012) pode ser considerado intencionalmente de caráter histórico sobre o efeito fotoelétrico, enquanto os estudos de Dionísio (2005) e Martins e Rosa (2014) são mais adequadamente caracterizados como discussões sobre fundamentações teóricas e conceituais da teoria quântica da radiação.

Os resultados obtidos na pesquisa bibliográfica de Reis e Serrano (2017) acerca de como a literatura em ensino de ciências têm associado historicidade, construção de conceito e contexto ao tratar da produção e transformação da luz no efeito fotoelétrico, indicam que, até o ano de 2017, a lacuna referente à escassez de uma pesquisa historiográfica sobre o efeito fotoelétrica ainda permanecia aberta. Vale destacar, nesse ínterim, as análises das narrativas históricas sobre o efeito fotoelétrico em livros didáticos utilizados em cursos de graduação em física, realizadas por Soares (2016) e Lima *et al.* (2017). Esses estudos apontam transposições

² Os resultados que serão apresentados em nossa atual pesquisa historiográfica estão em conflito com as conclusões de Mangili (2012) [cf. Capítulo 3: A Pesquisa Historiográfica].

didáticas que apresentam graves distorções históricas, mitos, anacronismos, inadequações, ausência de contexto histórico-social-cultural, inconsistências e superficialidades nos argumentos, além de uma concepção empírico-indutivista da atividade científica.

Também deve ser mencionado o trabalho de Rodrigues e Pereira (2020), no qual os autores defenderam o uso da estratégia de discussão da Filosofia da Ciência denominada “Inferência à Melhor Explicação” como heurística para o ensino da história da ciência na formação de professores de física. Como exemplo ilustrativo, a perspectiva foi empregada no episódio histórico da disputa entre explicações concorrentes para o efeito fotoelétrico, durante as primeiras décadas do século XX, em especial, na disputa entre a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) e a “hipótese de *quantum*” de luz de Einstein (1905). No entanto, conforme ressaltado pelo próprio autor, a proposta do trabalho não é ser uma pesquisa historiográfica sobre esse episódio, mas apenas fazer uso de resultados publicados na literatura internacional.

Assim, com base nesses breves apontamentos, em março de 2021, observamos que a problemática da escassez de recursos didáticos sobre a história do efeito fotoelétrico ainda persistia na literatura em ensino de ciências. Em outras palavras, o desafio de construir uma narrativa histórica abrangente, fundamentada em fontes primárias e secundárias, englobando os principais episódios da história não linear da construção desse conhecimento científico a respeito dos fenômenos fotoelétricos ainda não havia sido aceito por pesquisadores brasileiros.

Uma vez que é possível encontrar certa quantidade de trabalhos nacionais que discutem o emprego de outros recursos didáticos para o ensino do efeito fotoelétrico, em especial, o uso de simulações computacionais e laboratório experimental (cf. Silva; Errobidart, 2015; Reis; Serrano, 2017), nossa hipótese é que, até o momento, algumas iniciativas de pesquisas podem ter sido significativamente dificultadas pela ausência, em língua portuguesa brasileira, de um trabalho sobre a história não linear do efeito fotoelétrico.

Além disso, esta pesquisa de doutorado compartilha do entendimento – e tem como premissa inicial – que a escolha do tópico curricular “o efeito fotoelétrico” é indicada para uma investigação empírica sobre o uso de abordagens contextuais e explícitas acerca de aspectos históricos, filosóficos e sociológicos da ciência. Em razão das sucessivas e rápidas modificações teóricas e controvérsias científicas que ocorreram no início do século XX, esse conteúdo se torna favorável à promoção de momentos de argumentação, discussão, reflexão e exemplificação da integração dinâmica entre dados experimentais e aspectos teóricos. Tal escolha ainda é reforçada devido ao fato de que a abordagem do experimento do efeito fotoelétrico, normalmente, é um dos primeiros tópicos a ser ensinados nos programas da disciplina de Física Quântica (ou Física Moderna).

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo geral do estudo é analisar as contribuições de uma abordagem contextual explícita sobre a história do efeito fotoelétrico, organizada para ser implementada na disciplina de História da Ciência, em um curso de graduação em Física, adotando como referencial de ensino a Teoria da Aprendizagem Significativa e, como referência teórico-metodológica, a visão consensual da Natureza da Ciência e seus respectivos princípios heurísticos representativos.

Esse estudo se insere na linha de pesquisa Filosofia, História e Sociologia da Ciência no ensino de ciências, abrangendo: a inserção de aspectos da Natureza da Ciência por meio de abordagens contextuais e explícitas; os processos e práticas pedagógicas desenvolvidas em ambientes reais de aprendizagem; os fundamentos e as concepções teórico-metodológicos nos processos de ensino e de aprendizagem e, por fim, as relações entre os conhecimentos filosóficos, epistemológicos, sociológicos e históricos da ciência e o ensino de ciências.

De maneira resumida, nosso objetivo é defender a tese de que uma abordagem contextual explícita sobre a história não linear do efeito fotoelétrico, elaborada para ser implementada na disciplina de História da Ciência em um curso de graduação em Física, tomando como referencial de ensino a Teoria da Aprendizagem Significativa e, como referência teórico-metodológica, a visão consensual sobre a Natureza da Ciência e seus respectivos princípios heurísticos representativos, possibilita uma compreensão mais precisa e bem informada do processo de construção do conhecimento científico, abrangendo as dimensões históricas, epistemológicas e sociológicas.

Nesse sentido, foram estabelecidos objetivos específicos, resultando na seguinte estruturação deste relatório para defesa de tese de doutorado. O Capítulo 1 apresenta uma discussão sobre a importância do ensino de aspectos da chamada Natureza da Ciência nas aulas de disciplinas científicas. Este capítulo, que aborda os referenciais teórico-metodológico e de ensino da pesquisa, está dividido em quatro seções distintas. Ele tem como objetivo responder às seguintes perguntas: “*O que é a Natureza da Ciência?*”, “*Por que ensinar sobre a Natureza da Ciência?*”, “*O que ensinar sobre a Natureza da Ciência?*” e “*Como ensinar sobre a Natureza da Ciência?*”.

No **Capítulo 2**, utilizando-se fontes primárias e secundárias, apresenta-se o resultado de uma pesquisa historiográfica abrangente que teve como objetivo responder à seguinte questão: “*Como se deu a gênese e o desenvolvimento do conhecimento científico sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no período entre 1887 e 1927?*”. Além disso, durante essa etapa, como objetivo secundário, foram realizadas análises críticas, discussões e reflexões sobre a presença de narrativas pseudo-históricas em livros didáticos e textos acadêmicos.

No **Capítulo 3**, são delineados os procedimentos metodológicos adotados para conduzir a segunda etapa do estudo: a pesquisa empírica. O capítulo detalha a organização e implementação de uma intervenção didática fundamentada em uma abordagem contextual explícita e na Teoria da Aprendizagem Significativa. A disciplina é voltada para a formação crítica no uso didático da História da Ciência, especialmente em relação à história do efeito fotoelétrico e, em particular, para a construção de uma imagem mais precisa e bem informada sobre a Natureza da Ciência. São descritas as fases de desenvolvimento da pesquisa, os objetivos específicos, o contexto educacional envolvido, os instrumentos utilizados para a coleta de dados, bem como as razões que embasaram a escolha dos métodos adotados para o tratamento dos dados.

No **Capítulo 4**, na primeira parte, são apresentadas as análises e discussões dos resultados empíricos obtidos a respeito das concepções prévias e posteriores dos estudantes em relação a diversos aspectos da Natureza da Ciência. Uma análise qualitativa dos dados coletados foi conduzida com o objetivo de avaliar se houve um avanço na compreensão epistemológica dos estudantes e se esse avanço pode ser caracterizado como uma aprendizagem significativa. Na segunda parte, foi feita a análise qualitativa das respostas dos estudantes ao *Questionário de Avaliação Geral* e de suas *Memórias & Reflexões* semanais, buscando identificar pontos fortes e críticos em relação às diversas estratégias didáticas implementadas, estruturação e sequência lógica adotada, predisposição ativa, influência na formação crítica para futura atuação docente e mudanças em suas concepções epistemológicas.

Por fim, no **Capítulo 5**, traz as considerações finais da pesquisa, reconhecendo seus limites e possibilidades. Destacam-se, nesse capítulo, as principais contribuições metodológicas e analíticas do estudo para a área de ensino de ciências, com ênfase no ensino de Física, além de sugestões práticas para futuras investigações relacionadas à proposta desenvolvida.

1 REFERENCIAIS TEÓRICOS

1.1 O QUE É A NATUREZA DA CIÊNCIA?

O termo “Natureza da Ciência” (NdC)³, conforme observado por McComas, Clough e Almazroa (1998), tem sido conceitualizado de maneiras distintas na literatura. Alguns autores até mesmo preferem empregar como alternativa a expressão “Natureza do Conhecimento Científico” (Hodson, 2014; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014). Portanto, não se observa, para além de algumas caracterizações gerais, e nem se deve esperar, que historiadores, filósofos, sociológicos da ciência e pesquisadores em ensino de ciências compartilhem, em nível aprofundado, um consenso no que diz respeito a uma definição específica para o significado para o constructo NdC (Lederman, 1992; Alters, 1997; McComas, 1998).

Essa situação, contudo, não deve ser motivo de preocupação exagerada, pois ao longo do último século, as ideias sobre a NdC têm se modificado da mesma maneira que as concepções epistemológicas sobre os fundamentos, métodos e implicações da ciência, com a definição de NdC se transformando tanto quanto o tipo de conhecimento e os métodos de investigação que ela pretende caracterizar (Duschl; Grandy, 2013; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

Sendo assim, de forma abrangente, entende-se que a expressão NdC se refere a um conjunto de elementos que abordam a construção, a fundamentação, a estruturação, a aceitação e, até mesmo, a própria natureza do conhecimento científico (McComas, 1998; Lederman, 2007; Clough, 2007; Matthews, 2012).

Com efeito, muitas vezes, o termo NdC é utilizado com o intuito de apresentar uma descrição mais ampla das práticas científicas, incluindo tanto os estudos das temáticas investigadas pelas áreas de pesquisa em História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC) quanto por outras áreas afins (*e.g.*, Ciências Cognitivas: Psicologia) (McComas, 1998). A combinação dos resultados dessas pesquisas produz um conhecimento de segunda ordem sobre

³ A expressão “Natureza da Ciência”, no singular, frequentemente é abreviada com a sigla NdC. No entanto, os autores deste trabalho compartilham do entendimento de que essa expressão nem sempre transmite a riqueza e as particularidades do empreendimento científico como um todo. No decorrer deste trabalho, optamos por utilizar a mesma sigla NdC, porém referindo-se ao termo “Natureza das Ciências”, no plural. Essa escolha reflete a visão de muitos pesquisadores, que concordam que não existe uma única e verdadeira ciência, mas sim várias áreas distintas de estudo científico, como as Ciências Naturais (Física, Química e Biologia), Ciências Sociais, Ciências Econômicas, Ciências Policiais, entre outras.

a NdC, isto é, um “*conhecimento metacientífico*” (Martins, 2015). Nesse sentido, McComas, Clough e Almazroa (1998) trazem a seguinte definição para NdC:

A Natureza da Ciência é uma arena híbrida fértil que combina aspectos de várias disciplinas sociais de estudos da ciência, incluindo a história, sociologia e filosofia da ciência, juntamente com pesquisas das ciências cognitivas, como a psicologia, em uma descrição rica do que é a ciência, como funciona, como os cientistas operam como um grupo social e como a sociedade em si tanto direciona quanto reage às empreitadas científicas. A interseção dos vários estudos sociais da ciência é onde a visão mais rica da ciência é revelada para aqueles que têm apenas uma oportunidade de apreciar a paisagem. [...] Através de múltiplas lentes, a Natureza da Ciência descreve como a ciência funciona (McComas; Clough; Almazroa, 1998, p. 4-5).

A discussão e reflexão sobre elementos da NdC possibilita a compreensão dos mecanismos que desempenham um papel relevante na atividade científica. Esses mecanismos, para fins de estudos sobre a NdC, podem ser subdivididos em aspectos internos e externos do trabalho científico. Por um lado, os aspectos internos referem-se aos elementos exclusivamente relacionados aos fundamentos epistemológicos do processo de investigação científica, tais como: metodologia científica; formulação de hipóteses e modelos científicos; relação entre observação e inferência; coleta, análise e interpretação de dados. Por outro lado, os aspectos externos estão associados aos elementos históricos e sociais do desenvolvimento científico, em particular, trata da análise da influência dos contextos histórico, sociocultural, político e econômico no qual um determinado conhecimento científico foi produzido e, sobretudo, investiga em que medida tais contextos desempenharam um papel relevante no processo de construção, validação e aceitação desse conhecimento (Moura, 2014).

McComas, Clough e Almazroa (1998) afirmam que é inerente às pesquisas sociais sobre a NdC a busca por respostas às questões do tipo: “O que é a ciência, e como essa ‘coisa’ funciona?” “O que demarca (se é que existe) e diferencia a atividade científica de outros empreendimentos humanos?” “As ideias científicas são descobertas (no sentido de localização de um objeto) ou inventadas (no sentido de construção abstrata)?” “Como os cientistas alcançam o consenso sobre a validade de uma lei ou teoria científica?” “Qual a influência dos fatores subjetivos (crenças pessoais, valores socioculturais, preferências teórico-metodológicas) no processo de construção do conhecimento científico?”

O pesquisador Norman G. Lederman (1951-2021), embora prefira empregar a expressão “Natureza do Conhecimento Científico”, sob a justificativa de eliminar algumas confusões de terminologias, define o conceito de NdC de maneira similar. Ele assevera que para a maioria dos estudiosos “[...] tipicamente, a expressão NdC se refere à epistemologia da ciência, isto é, à ciência como um modo de saber, ou aos valores e crenças inerentes ao conhecimento científico

e ao seu desenvolvimento” (Lederman *et al.*, 2002, p. 498; 2007, p. 833). Nessa perspectiva, investigar a NdC implica compreender como os seres humanos constroem e desenvolvem o conhecimento científico em diferentes contextos e épocas, levando-se em consideração as influências de concepções históricas, filosóficas, epistemológicas e também ideológicas.

Outros autores apresentam definições muito próximas às mencionadas até agora. Clough (2007) e Martins (2015), por exemplo, consideram que discutir e refletir sobre aspectos da NdC é perguntar o que é a ciência, como ela é construída, perpassando a discussão a respeito do método científico, destacando-se que existe uma multiplicidade de formas como o trabalho científico é feito; como os cientistas atuam como um grupo social e como a própria sociedade influencia e reage a esforços científicos.

Contudo, do ponto de vista das pesquisas em ensino de ciências – área específica na qual este estudo de doutorado se insere – o termo NdC inclui não apenas os assuntos abordados pelos estudos em HFSC e áreas afins, mas também engloba esforços de educadores na aplicação dos resultados na tentativa de promover uma educação científica de melhor qualidade. Em outras palavras, reconhece-se que as temáticas debatidas entre historiadores, filósofos e sociólogos da ciência são fundamentalmente distintas daquelas discutidas na literatura especializada na área de ensino de ciências – embora eventualmente possam existir alguns tópicos em comum (Rodrigues, 2021).

Isso implica em considerar a NdC enquanto constructo educacional. A pesquisa sobre aspectos da NdC se constitui em um domínio fundamental para os professores de ciências que buscam apresentar aos seus estudantes uma imagem mais precisa de como se dá o trabalho científico, uma vez que para isso é fundamental conhecer algo da história e da natureza das disciplinas que estão ensinando (Matthews, 1994; McComas; Clough; Almazroa, 1998).

Na perspectiva de NdC enquanto constructo educacional, questões de cunho didático-pedagógico são importantes, tais como: Quais são as concepções de NdC dos professores e dos estudantes? Em que medida essas concepções se aproximam ou se afastam de uma visão bem informada da NdC, conforme as pesquisas em HFSC e áreas afins? Quais características ou aspectos da NdC devem ser priorizados em uma intervenção didática que almeja construir uma visão mais precisa da atividade científica? Quais tipos de abordagens e estratégias didáticas se mostram mais eficazes para o ensino de aspectos da NdC? Quais mudanças curriculares são necessárias diante da necessidade do ensino de aspectos da NdC?

Diante do exposto, neste trabalho de tese de doutorado discutimos (e problematizamos) o constructo NdC a partir do entendimento de que pesquisar sobre aspectos da NdC significa investigar o processo de construção do conhecimento científico por meio de múltiplas lentes

com uma finalidade educacional, isto é, levando-se em consideração os conhecimentos metacientíficos produzidos pelas pesquisas em HFSC e em outras áreas afins, com interesse principal na melhoria da educação científica contemporânea. Dessa forma, o constructo educacional NdC é assumido como um importante objetivo para o ensino de ciências.

No entanto, somente postular que a abordagem de aspectos da NdC pode promover avanços na educação científica é muito superficial. É preciso se aprofundar na problemática e indagar: “*Por que* (e em que medida) a abordagem de aspectos da NdC nas aulas de disciplinas científicas possibilita uma educação científica contemporânea de melhor qualidade?”

1.2 POR QUE ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?

Revisões sistemáticas de literatura mencionam que desde 1960 se tem investigado e defendido a abordagem de aspectos da NdC no ensino de ciências (Lederman, 1992, 2007; Matthews, 2012; Duschl; Grandy, 2013; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014; Hodson, 2014)⁴. Ao longo desse período, as problemáticas de estudo foram abrangentes, incluindo reformas curriculares, abordagens, estratégias de ensino, instrumentos de avaliação, produção de materiais didáticos e suas respectivas funções didáticas em sala de aula (Martins; Silva; Prestes, 2014; Moura, 2014; Azevedo; Scarpa, 2017a).

Os trabalhos desenvolvidos contribuíram para consolidar essa temática como linha de pesquisa e despertar o interesse de outros pesquisadores (Vilas Boas *et al.*, 2013; Moura, 2014). No entanto, como se trata de um novo campo de investigação na área de “Educação para a Ciência”, observou-se que, inicialmente, a atenção e os esforços dos pesquisadores estavam voltados notadamente para a construção de consensos e a aceitação geral da importância de ensinar aspectos da NdC nas aulas de disciplinas científicas.

⁴ A rigor, a literatura acadêmica aponta algumas defesas mais antigas, porém de forma isolada, que remetem ao atual conceito de NdC. Matthews (2012) menciona que, em meados do século XIX, já havia algumas pessoas que argumentavam a favor da abordagem de aspectos históricos e filosóficos nas aulas de disciplina científicas, como o cientista, filósofo e historiador inglês William Whewell (1794-1866), Thomas Huxley (1825-1895) e Ernst Mach (1838-1916). Lederman (1992) afirma que no relatório da *Central Association of Science and Mathematics Teachers*, datado de 1907, é possível encontrar justificativas em defesa do ensino sobre o “método científico” e dos procedimentos de investigação, coleta e análise de dados nas aulas de ciências. Duschl e Grandy (2013) apontam que diferentes autores consideram os trabalhos do químico americano e ex-presidente da Universidade de Harvard James Bryant Conant (1893 - 1978), desenvolvidos entre 1950 e 1960, incluindo o uso de episódios históricos para ensinar ciência na Universidade de Harvard (Conant; Nasch, 1957), como um importante marco temporal nessa linha de pesquisa.

Nesse contexto, já na virada do século XX, Driver *et al.* (1996), refletindo sobre as contribuições decorrentes dos esforços da promoção de uma imagem mais bem informada sobre o trabalho científico para nossa sociedade moderna, resumiram os argumentos favoráveis em cinco pontos principais: 1. *Democrático*: para auxiliar na tomada de decisões bem informadas em situações envolvendo questões sociocientíficas; 2. *Utilitário*: para ajudar as pessoas a compreenderem o desenvolvimento da Ciência e o funcionamento de objetos e processos tecnológicos em seu cotidiano; 3. *Cultural*: para apreciar o valor da Ciência como parte da cultura contemporânea; 4. *Moral*: para desenvolver um entendimento das normas da comunidade científica e sua relação com os valores da sociedade atual; 5. *Aprendizagem científica*: para facilitar a aprendizagem de conceitos científicos.

Atualmente, após mais de sessenta anos de discussões e debates acadêmicos, pode-se afirmar que há um aparente consenso entre os estudiosos sobre a importância das discussões e reflexões acerca de aspectos da NdC para a educação científica contemporânea. Esse consenso reconhece que o objetivo principal é contribuir para a formação de cidadãos letrados cientificamente (Hodson, 2014). Nessa perspectiva de educação científica, reconhece-se que, além de um conhecimento *de* ou *em* ciências, o indivíduo também deve adquirir um conhecimento *sobre* as ciências, isto é, um conhecimento epistemológico (e sociológico) sobre o complexo e não linear processo de construção do conhecimento científico (Lederman, 1992; Allchin, 2011; Matthews, 2012; Irzik; Nola, 2014; Martins, 2015).

Considera-se o conhecimento epistemológico *sobre* as ciências como um componente central do letramento científico, definido como “a capacidade [do indivíduo] de se envolver com as questões relacionadas com a ciência e *com a ideia da ciência*, como cidadão reflexivo” (Brasil, 2020, p. 122, grifo nosso). De acordo com esse entendimento, objetiva-se que os estudantes, diante de situações-problema, demonstrem competências e habilidades que requerem a utilização adequada de três tipos conhecimentos científicos: (i) *conceitual/conteúdo* (de ciências: hipóteses, leis e teorias); (ii) *procedimental* (de metodologia experimental: obtenção de dados válidos e confiáveis); e (iii) *epistemológico* (sobre ciências: processo de construção do conhecimento científico) (Brasil, 2020).

Com base nessa definição, assume-se que uma pessoa letrada cientificamente está disposta a participar de debates embasados sobre ciência e tecnologia, o que requer as seguintes competências: 1. *explicar fenômenos cientificamente*, isto é, identificar, apresentar e analisar explicações para diversos fenômenos naturais e tecnológicos; 2. *avaliar e planejar investigações científicas*, ou seja, descrever e avaliar estudos científicos e propor abordagens para questões científicas; 3. *interpretar dados e evidências científicas*, envolvendo a análise e

avaliação de informações em diversas formas e chegar a conclusões científicas apropriadas (Brasil, 2020).

Como medida mais pragmática da influência dos resultados alcançados nas pesquisas em HFSC no ensino de ciências, diversos documentos governamentais orientadores de reformas educacionais, tanto nacionais quanto internacionais (*e.g.*, AAAS, 1990; Brasil, 2001, 2002, 2018), destacam a importância de os estudantes “compreenderem a construção do conhecimento físico [ou científico] como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época” (Brasil, 2002, p. 67).

Na mesma linha de pensamento, no que diz respeito ao processo de formação de professores de disciplinas científicas, as Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física, elencam entre as habilidades fundamentais a serem desenvolvidas ao longo dos cursos de graduação, tanto na modalidade bacharelado quanto licenciatura, “[...] desenvolver uma ética de atuação profissional e a consequente responsabilidade social, compreendendo a ciência como conhecimento histórico, desenvolvido em diferentes contextos sócio-políticos, culturais e econômicos” (Brasil, 2001, p. 4). Esse documento reforça o entendimento de que o ensino de aspectos da NdC pode possibilitar ao professor implementar uma abordagem didática que relacione a construção de conceitos científicos à contextualização social, cultural, tecnológica e histórica desses conhecimentos, aos processos e práticas de investigação e às linguagens das ciências naturais.

Em suma, observa-se que a literatura em ensino de ciências justifica a importância da promoção de discussões e reflexões sobre diferentes aspectos da NdC tendo em vista o propósito de formação de indivíduos cientes, com um entendimento mais preciso sobre as práticas científicas, que disponham de conhecimentos, habilidades, competências, senso crítico para avaliação de informações e tomada de decisões socialmente mais responsáveis acerca de problemas envolvendo ciência, tecnologia, sociedade, ambiente e as relações existentes entre eles (Cachapuz *et al.*, 2005; Hodson, 2014; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

É importante ressaltar, conforme enfatizado por Forato, Pietrocola e Martins (2011), que em tal perspectiva de educação científica contemporânea não se defende, de maneira alguma, um abandono ou uma redução ou uma substituição do ensino de conhecimentos *de* ciências, o que representaria um enorme retrocesso para a melhoria da qualidade do ensino de ciências. Mas, pelo contrário, trata-se de integrar ao ensino de conteúdos conceituais específicos seus respectivos e intrínsecos aspectos históricos, filosóficos, socioculturais e ideológicos.

Um último argumento vale a pena ser mencionado como justificativa para o ensino de aspectos sobre a NdC. O consenso entre educadores e cientistas de que promover compreensões

mais precisas e bem informadas dos estudantes sobre a NdC deveria ser um objetivo primordial da educação científica contemporânea gerou, como as referências deste trabalho indicam, diversas pesquisas sobre concepções epistemológicas em diferentes níveis escolares. A conclusão predominante foi que os estudantes (e até mesmo os professores) geralmente não possuem uma compreensão adequadas da NdC. Ademais, muitas vezes, observou-se que as concepções epistemológicas tendem a se distorcer ainda mais ao longo percurso escolar. Essa constatação é considerada preocupante, tendo em vista a ampla variedade de instrumentos e métodos de avaliação empregados (Lederman, 2007; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

No entanto, se por um lado cientistas e pesquisadores em ensino de ciências concordam quanto à importância e às justificativas para a implementação do ensino sobre a NdC, por outro lado, a mesma literatura de pesquisa relata a existência de uma controvérsia acadêmica, na qual são contratadas diferentes perspectivas sobre “*o que*” e “*como*” a NdC pode ser mais bem ensinada⁵ nas aulas de disciplinas científicas.

1.3 O QUE ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?

Existem diferentes pontos de vista sobre “*o que*” ensinar e “*como*” abordar a NdC em contextos educacionais. Duas perspectivas se mostram mais proeminentes nesse debate, as quais frequentemente geram controvérsias entre os pesquisadores na área de ensino de ciências: a primeira é conhecida como “visão consensual sobre a NdC”, e a segunda pode ser representada por um conjunto amplo de “abordagens alternativas sobre a NdC”.

Para uma melhor compreensão dessa controvérsia acadêmica, a seguir, apresentamos uma síntese descritiva da visão consensual e de seus respectivos princípios heurísticos representativos da NdC e, logo depois, uma sistematização das críticas atribuídas a essa perspectiva de ensino encontradas em periódicos brasileiros. Essa discussão, entre outras coisas, auxiliará a fundamentar e justificar nosso posicionamento quanto à pergunta: “*O que*

⁵ Na visão dos autores deste trabalho, carece de precisão o uso das expressões “*inserir a NdC no ensino de ciências*” ou “*inserir a História da Ciência no ensino de ciências*”, como pode ser encontrada em muitos estudos acadêmicos. Pois, reconhece-se que, de uma forma ou de outra, inevitavelmente, os professores de disciplinas científicas sempre apresentam algumas informações referentes ao processo de construção do conhecimento científico (e.g., o método científico). Portanto, para nós, não se trata de incluir algo que está necessariamente fora da sala de aula, como sugere a palavra “inserir”, mas sim de melhor entender para melhor ensinar, com vistas, sobretudo, à desconstrução de imagens distorcidas e estereotipadas da atividade científica.

deve ser ensinado sobre a NdC num curso de graduação em Física, abrangendo ambas as modalidades licenciatura e bacharelado?”

1.3.1 A Visão Consensual sobre a Natureza da Ciência

A designada “visão consensual” sobre a NdC foi desenvolvida a partir da análise de diversos documentos internacionais direcionadores da educação científica contemporânea (McComas; Olson, 1998; Clough, 2007; Lederman, 2007; Hodson, 2014; Moura; 2014). As contribuições iniciais são devidas, sobretudo, ao grupo de pesquisa liderado pelo professor Norman G. Lederman (1951-2021) e seus seguidores, no início dos anos 2000. Nesse sentido, podem-se citar os trabalhos de Lederman (1992), McComas e Olson (1998), Gil-Pérez *et al.* (2001), Cachapuz *et al.* (2005), Vázquez *et al.* (2001), Fernández *et al.* (2002), Lederman *et al.* (2002) e Osborne *et al.* (2003) como proeminentes na divulgação e consolidação dessa perspectiva de ensino sobre a NdC.

Essa perspectiva de ensino busca responder à seguinte pergunta: “*O que deve ser ensinado (e avaliado) sobre a NdC aos estudantes e professores de disciplinas científicas?*”. Seus defensores procuram delimitar aquilo que julgam essencial, acessível e útil em uma abordagem pedagógica sobre a NdC, priorizando aspectos que possam ser mais facilmente compreendidos por estudantes da educação básica. Nesse sentido, deixam de lado debates e controvérsias acadêmicas entre historiadores, filósofos e sociólogos sobre a NdC, argumentando que essas discordâncias, embora relevantes, são muitas vezes abstratos e de difícil assimilação para estudantes iniciantes, como os da educação básica. Como enfatizam Abd-El-Khalick, Bell e Lederman (1998, p. 418), essas controvérsias “[...] são demasiadamente esotéricas para ter consequências imediatas em sua vida cotidiana”.

No entanto, essa abordagem não deve ser confundida como uma defesa da exclusão de controvérsias científicas, históricas ou contemporâneas. Pelo contrário, conforme será defendido ao longo do nosso estudo, consideramos as controvérsias científicas em torno do fenômeno do efeito fotoelétrico com imenso potencial didático, certamente, passíveis de adaptação no nível de ensino em que são propostas e discutidas (cf. Capítulo 2).

O argumento principal de Norman G. Lederman e seus seguidores é que, no contexto da educação básica ou de abordagens introdutórias no ensino superior, algum ensino sobre a NdC, ainda que limitado, é preferível à sua ausência. O foco desses autores é deixar de fora,

nesse primeiro momento, os debates acadêmicos em relação ao “Problema da Demarcação”⁶, porém, sem excluir a análise de controvérsias científicas. Assim, consideram mais eficaz evitar o “Problema da Demarcação” em sala de aula, priorizando a construção de uma imagem mais precisa e bem informada do trabalho científico com base em alguns poucos princípios epistêmicos. Discussões e reflexões aprofundadas sobre controvérsias epistemológicas, como por exemplo se há uma realidade objetiva ou apenas construções mentais, seriam, portanto, reservadas a momentos pedagógicos em níveis mais avançados de ensino.

Diversas listas de princípios epistêmicos foram elaboradas com o objetivo de definir os elementos essenciais, essenciais, acessíveis e úteis em uma abordagem pedagógica sobre a NdC. Essas listas incluem afirmações gerais sobre práticas científicas, abrangendo questões relacionadas à história, filosofia e à sociologia das ciências (HFSC). A mais conhecida — e também a mais polêmica — é a lista chamada de “*NOS tenets*” ou “*Lederman Seven*”, amplamente referenciada na literatura sobre ensino de ciências (Irzik; Nola, 2011; Martins, 2015).

De acordo com Lederman *et al.* (2002), os aspectos consensuais que compõem uma visão mais precisa e bem informada sobre as ciências caracterizam-nas como uma atividade: (i) empiricamente fundamentada, isto é, baseada ou derivada de observações do mundo natural; (ii) que requer uso da imaginação e da criatividade; (iii) subjetiva, no sentido de que envolve preferências pessoais, tais como escolhas epistemológicas e metodológicas decorrentes de teorias anteriores; (iv) influenciada pelo contexto econômico, político, social, cultural e científico-tecnológico no qual é construída; (v) realizada, em essência, por tentativa e erro, logo, o conhecimento científico está sempre suscetível a mudanças; (vi) que possui uma diversidade ampla de métodos de investigação, em vez de um único método universal (padrão), rígido, fechado e algoritmo; e, por fim, (vii) que abrange funções, relações e distinções entre teorias e leis científicas, assim como entre observações e inferências.

Segundo Lederman *et al.* (2002), esses sete itens declarativos sobre a NdC, doravante *NOS tenets*, podem ser considerados como princípios heurísticos representativos das diversas pesquisas acerca de uma possível visão consensual sobre as práticas científicas, uma vez que também estão (oni)presentes em outras “listas consensuais” elaboradas por pesquisadores de

⁶ O chamado “Problema da Demarcação” foi apresentado pelo filósofo da ciência Karl Raimund Popper (1902-1994), em sua obra *A lógica da pesquisa científica*, definido como o “problema de estabelecer um critério que nos habilite a distinguir entre as Ciências empíricas, de uma parte, e a Matemática e a Lógica, bem como os sistemas ‘metafísicos’, de outra” (Popper, 2013, p. 33).

diferentes áreas. Entretanto, deve-se enfatizar que esses setes *NOS tenets* não devem ser considerados exaustivos. De fato,

Qualquer uma dessas listas [de itens declarativos ‘consensuais’] que considere *o que* os alunos podem aprender, além de uma consideração das características do conhecimento científico, têm igual validade. O objetivo principal aqui não é enfatizar uma lista em detrimento de outra, mas fornecer um quadro de referência que ajude a delinear a NOS [Natureza da Ciência] da investigação científica (e dos processos científicos) e o corpo de conhecimento resultante (Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014, p. 833, grifo nosso).

A escolha dos *NOS tenets* pelo professor Norman G. Lederman e seus colaboradores, por sua vez, influenciou importantes reformas curriculares educacionais de vários países (McComas, 1998; Matthews, 2012). Além disso, uma vez definido *o que* ensinar sobre a NdC, também se definiu *o que* deveria ser avaliado. Assim, os *NOS tenets* passaram a servir como um referencial para a construção de diversos instrumentos de coleta de dados sobre as concepções de NdC de estudantes e professores, funcionando em muitos casos como uma espécie de *checklist* da NdC. Entre eles, um dos mais utilizados pelos pesquisadores na área de ensino de ciências é o questionário *Views of Nature of Science Questionnaire – version C (VNOS-C)*, também desenvolvido por Norman G. Lederman e seus colaboradores. Esse questionário é composto de dez questões abertas, que objetivam avaliar e caracterizar as visões dos respondentes sobre aspectos relacionados às práticas científicas contemplados pelos *NOS tenets*.

Na perspectiva da visão consensual sobre a NdC, as discussões sobre a questão “*O que ensinar sobre a NdC?*” também são conduzidas com reflexões a partir do ponto de vista negativo, isto é, identificando-se “*o que não deve ser ensinado sobre a NdC*”. De outro modo, pergunta-se: “*Quais concepções distorcidas e estereotipadas sobre as práticas científicas devem ser prioritariamente desmitificadas e desconstruídas em uma abordagem pedagógica sobre aspectos da NdC nas aulas de ciências?*”

Esse modo negativo, porém complementar, de responder à questão “*O que ensinar sobre NdC?*” se dá, acima de tudo, com base em um número significativo de observações empíricas relatadas nos diversos trabalhos da literatura de pesquisa em ensino de ciências, conduzidos ao longo das últimas décadas. Eles empregaram uma ampla variedade de instrumentos de coleta de dados e em diferentes países, que evidenciaram que tanto os professores quanto os estudantes não possuem concepções precisas e bem informadas sobre o processo de construção do conhecimento científico; e que, ao mesmo tempo, manifestam concepções distorcidas e estereotipadas quase idênticas sobre as práticas científicas (Lederman, 2007).

Nesse contexto, se destacam os trabalhos dos pesquisadores Daniel Gil-Pérez, Isabel Fernández Montoro, Jaime Carrascosa Alís, António Cachapuz, João Praia e demais colaboradores (*e.g.*, Gil-Pérez *et al.*, 2001; Fernández *et al.*, 2002; Cachapuz *et al.*, 2005). Esses autores construíram uma “lista consensual” das principais concepções distorcidas sobre o trabalho científico comumente exibidas por professores e estudantes, explicitando de forma direta aquilo que deve ser rejeitado e desconstruído em qualquer proposta didática para o ensino de aspectos da NdC⁷.

Segundo Cachapuz *et al.* (2005), há sete concepções deformadas sobre o trabalho científico, as quais retratam as práticas científicas de maneira distorcida e estereotipada. O Quadro 1 apresenta uma síntese descritiva dessas sete imagens deformadas identificadas pelos autores.

Quadro 1 - As sete imagens deformadas do trabalho científico de acordo com Cachapuz et al. (2005).

Item	Imagens Deformadas da NdC	Descrição
1	Visão descontextualizada e socialmente neutra	A concepção de que a ciência é descontextualizada e socialmente neutra, não sendo influenciada por valores socioculturais ou pelos contextos histórico, cultural, social, político e econômico. Em outras palavras, o conhecimento científico é totalmente livre da influência dos valores compartilhados pela sociedade no qual ele foi produzido.
2	Visão individualista e elitista	A crença de que a produção científica é realizada apenas por indivíduos excepcionais e talentosos, geralmente homens brancos geniais de nacionalidade europeia, que trabalham isoladamente.
3	Visão empírico-indutivista e a-teórica	A ideia de que as ciências eliminam dúvidas e incertezas apenas por meio de observações experimentais diligentes. O conhecimento científico é produzido mediante observações experimentais objetivas e “puras” (neutras, sem vieses, imparciais).
4	Visão rígida (algorítmica, exata e infalível)	A crença em um “método científico” (padrão/universal) que dispensa o uso da criatividade e da imaginação e desconsidera e rejeita completamente as influências subjetivas na investigação científica.
5	Visão aproblemática e a-histórica (dogmática e fechada)	A noção de que os conhecimentos científicos são neutros e objetivos, desvinculados de questões éticas, sociais, políticas e dos problemas científicos e tecnológicos do contexto histórico-social no qual está imerso.

⁷ Doravante, ao abordar as contribuições dos trabalhos desses autores e de seus colaboradores, iremos referenciá-las em conjunto sob o nome Cachapuz *et al.* (2005), pois esse livro, intitulado *A Necessária Renovação do Ensino de Ciências*, apresenta uma reelaboração e uma atualização de uma série de trabalhos publicados por esses autores até meados de 2005, os quais se referem aos resultados de suas investigações e que fundamentam sua proposta de reorientação da educação científica para enfrentar o problema da falta de interesse e até mesmo recusa do estudantes para com as aulas de disciplinas científicas.

6	Visão exclusivamente analítica	A ideia de que a ciência se baseia somente em uma abordagem analítica e reducionista, que fragmenta os fenômenos naturais complexos, sem levar em consideração sua complexidade e interdependência entre diferentes áreas de pesquisa.
7	Visão acumulativa de crescimento linear	A ideia de que o avanço científico pressupõe um acúmulo contínuo de conhecimentos científicos, os quais, uma vez exaustivamente corroborados por evidências experimentais, são considerados verdades imutáveis. Tem-se, dessa forma, um estoque cada vez maior de verdades científicas definitivas. Em tal concepção, é ignorada a necessidade de avaliação da coerência e consistência entre as diversas teorias científicas.

Fonte: Adaptado de Cachapuz *et al.* (2005).

Em resumo, os autores apresentam uma discussão em torno daquilo que deve ser recusado com clareza quando se pretende discutir e refletir sobre a construção do conhecimento científico. De acordo com Cachapuz *et al.* (2005, p. 40), tem-se “[...] uma imagem ingênua, profundamente afastada do que se supõe ser a construção do conhecimento científico, mas que se foi consolidando até se converter num estereótipo socialmente aceito que a própria educação científica reforça por ação ou omissão”.

Assim, à luz dos estudos contemporâneos sobre a HFSC, buscando, por um lado, afastar-se das principais ideias consideradas inadequadas sobre a NdC e, por outro lado, aproximar-se o máximo possível de uma visão mais precisa, autêntica e bem informada sobre a NdC, diversos trabalhos de pesquisa contribuíram para a consolidação da denominada “visão consensual sobre a NdC”. Em suma, essa perspectiva sintetiza um conjunto de princípios heurísticos representativos (positivos ou negativos), de caráter geral, em relação aos quais existe um amplo consenso entre os pesquisadores da área quanto ao que deve ser integrado ao currículo de ciências (Clough, 2007; Moura, 2014; Martins, 2015; Oliveira, 2019).

Conforme aponta Matthews (2012), há muitos pontos positivos a serem valorizados com a consolidação da visão consensual da NdC na literatura de pesquisa em ensino de ciências. Dentre eles se destacam: a concreta possibilidade de ensino sobre a NdC nas aulas de disciplinas científicas; a construção e a disponibilidade de instrumentos válidos e confiáveis para avaliar a aprendizagem dos estudantes sobre aspectos da NdC; a possibilidade de que professores e estudantes tenham momentos para discutir e refletir a respeito de algumas questões relacionadas às práticas científicas.

No entanto, a visão consensual tem enfrentado críticas desde os seus primeiros dias de vida. Os trabalhos de Alters (1997) e Eflin, Glennan e Reisch (1999) já chamavam a atenção para a impossibilidade de se definir o que quer que seja a NdC entre filósofos, historiadores e sociólogos da ciência. De acordo com esses autores, pode-se questionar até mesmo o uso da

palavra “natureza” na expressão “natureza da ciência” para representar aquilo que poderia ser considerado a essência da atividade científica à luz de diferentes perspectivas epistemológicas.

Mas nem todos os estudiosos concordam com essa crítica. Martins (2015) afirma que os pesquisadores na área de ensino de ciências, de maneira geral, reconhecem que qualquer conteúdo, seja conceitual ou metacientífico como no caso da NdC, é submetido a algum tipo de processo de “transposição didática” – no sentido atribuído por Chevallard (1985) – ao ser levado para salas de aulas. Isso necessariamente implica simplificações, ajustes e omissões. Logo, segundo o autor, ninguém deveria estabelecer como objetivo educacional que as discussões sobre a NdC nas aulas de ciências sejam tão aprofundadas quanto as que ocorrem nos debates acadêmicos entre historiadores, filósofos e sociológicos da ciência.

Entretanto, ainda segundo Martins (2015), mesmo levando-se em conta essa ressalva no que diz respeito às críticas de Alters (1997) e Eflin, Glennan e Reisch (1999), que faz com que elas percam muito de sua força, vários pesquisadores, nos últimos anos, têm apontado outros pontos negativos específicos em relação à visão consensual da NdC, tanto em relação ao seu “conteúdo” propriamente dito (*O que deve ser ensinado?*) quanto à sua “forma” (*Como deve ser ensinado?*).

Segundo Oliveira (2019), as diversas críticas à visão consensual sobre a NdC podem ser resumidas em sete pontos principais:

1. Alters (1997) e Eflin, Glennan e Reisch (1999) argumentam que é impossível alcançar um consenso filosófico e que a ciência é muito complexa para ser caracterizada de forma única, dada sua natureza social multifacetada;
2. Clough (2007) defende a apresentação de uma variedade de pontos de vista quando não há um amplo consenso sobre uma determinada característica da ciência, destacando a importância de os educadores em ciências e os estudantes entenderem as complexidades relativas à NdC;
3. Matthews (2012), Hodson (2014) e Martins (2015) criticam a falta de ênfase nos *NOS tenets* em relação aos aspectos diretamente associados ao processo de investigação científica e aos métodos empregados pelos cientistas;
4. Clough (2007) e Matthews (2012) alertam para o elevado risco de distorção dos princípios heurísticos representativos da NdC (*NOS tenets*) por parte de pesquisadores, professores e estudantes;
5. Hodson (2014) argumenta que alguns itens declarativos nas “listas consensuais” não oferecem ajuda para os estudantes compreenderem a ciência de forma útil;

6. Hodson (2014) e Irzik e Nola (2011, 2014) destacam a falta de consideração pelas diferenças entre as áreas científicas e as generalizações sobre a NdC ;
7. Martins (2015) sugere que a adesão acrítica ao consenso da NdC pode levar a uma avaliação inadequada e relativista da ciência.

Nesse contexto de controvérsia acadêmica sobre *o que e como* melhor ensinar sobre a NdC, ao mesmo tempo em que se observa uma tendência de aumento anual de pesquisas sobre a NdC, corroborada, por exemplo, pela revisão sistemática realizada por Azevedo e Scarpa (2017a) e pelo trabalho de Mattos e Silva (2022), nota-se o surgimento de novas críticas, as quais não estão necessariamente incluídas entre aquelas apontadas por Oliveira (2019).

Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a) realizaram uma sistematização das críticas atribuídas à visão consensual sobre a NdC e aos *NOS tenets*, abrangendo o período de 1996 a 2021. O conjunto de trabalhos analisado pelos autores consistiu em 37 artigos científicos publicados em 10 periódicos de maior representatividade e prestígio na literatura brasileira de pesquisa em ensino de ciências. Como resultado da investigação, foram identificadas um total de 13 críticas distintas à visão consensual sobre a NdC e aos *NOS tenets*. Essas críticas foram agrupadas em três dimensões/categorias, construídas *a posteriori*, de acordo com o enfoque observado, a saber: (A) “Problemas de Instrução Pedagógica”, subdividida em quatro subcategorias (críticas a1, a2, a3 e a4); (B) “Problemas Epistêmicos”, compreendendo quatro subcategorias (críticas b1, b2, b3 e b4); e (C) “Problemas de Seleção dos *NOS tenets*”, que inclui cinco subcategorias (críticas c1, c2, c3, c4 e c5). O Quadro 2 mostra o nome atribuído a cada dimensão/categoria, sua descrição e as respectivas subcategorias.

Quadro 2 - Identificação e descrição das três dimensões/categorias e das respectivas subcategorias elaboradas para sistematização das críticas à visão consensual sobre a NdC e aos NOS tenets.

Dimensão/Categoria	Descrição	Subcategorias
A) Problemas de Instrução Pedagógica	São apresentadas as críticas que dão ênfase às fragilidades na apresentação dos <i>NOS tenets</i> , isto é, como itens declarativos descontextualizados sobre NdC que devem ser transmitidos (e avaliados) pelos professores e memorizados pelos estudantes. Na visão dos autores, que concordam com essas críticas, tal escolha é bastante problemática do ponto de vista pedagógico, uma vez que não são valorizados momentos importantes de discussão e reflexão explícitas sobre os aspectos da NdC. Afastam-se demasiadamente dos propósitos de um ensino de ciências	<i>Crítica a1</i> : Prejuízos à Educação Científica Plena ⁸ <i>Crítica a2</i> : Itens Descontextualizados <i>Crítica a3</i> : Estímulo à Aprendizagem Mecânica (memorização) <i>Crítica a4</i> : Avaliação Não Funcional

⁸ Por “educação científica plena (crítica)”, referimo-nos à perspectiva educacional cujo objetivo é uma formação científica voltada para o exercício da cidadania do indivíduo. Uma “educação científica plena” permite ao cidadão participar e se envolver em discussões sobre questões sociocientíficas, bem como compreender a relevância de saberes tanto quanto sobre as Ciências, em particular aqueles diretamente relacionados à preparação para a tomada de decisões de interesse social (Praia; Gil-Pérez; Vilches, 2007; Allchin, 2011; Irzik; Nola, 2011).

	voltado para a formação crítica e o exercício da cidadania plena.	
B) Problemas Epistêmicos	Evidenciam-se as críticas envolvendo propriamente os debates e as controvérsias acadêmicas, na maioria das vezes de natureza filosófica, sobre a (im)possibilidade e real necessidade de se estabelecer um suposto consenso sobre a NdC, bem como sua contribuição para fins pedagógicos, ainda que seja polêmica.	<i>Crítica b1:</i> Visão Monolítica da Ciência <i>Crítica b2:</i> Ausência de Controvérsias Epistemológicas <i>Crítica b3:</i> Controvérsias sobre Terminologias <i>Crítica b4:</i> Não Diferencia a Ciência de outras Atividades Intelectuais

Fonte: Suttini, Caluzi, Errobidart (2023a).

De acordo com Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a), a análise dos 37 artigos revelou que os pesquisadores brasileiros se baseiam principalmente em cinco referências específicas para tratar de problemáticas a respeito do ensino sobre a NdC: Agustín Adúriz-Bravo (2007); Douglas Allchin (2011); Gürol Irzik e Robert Nola (2011); Michael R. Matthews (2012) e André F. P. Martins (2015). Embora esses autores tenham sido os referenciais citados com maior frequência, outros também foram mencionados, embora de forma menos recorrente, como é o caso de Dagher e Erduran (2016). O Quadro 3 oferece uma visão mais detalhada da sistematização construída pelos autores da investigação, com indicação das 13 críticas, sua designação característica, descrição, assim como os principais referenciais que as apoiam e quantidade de citações no conjunto de artigos examinados.

Quadro 3 - Sistematização das críticas à visão consensual da NdC e aos NOS *tenets*.

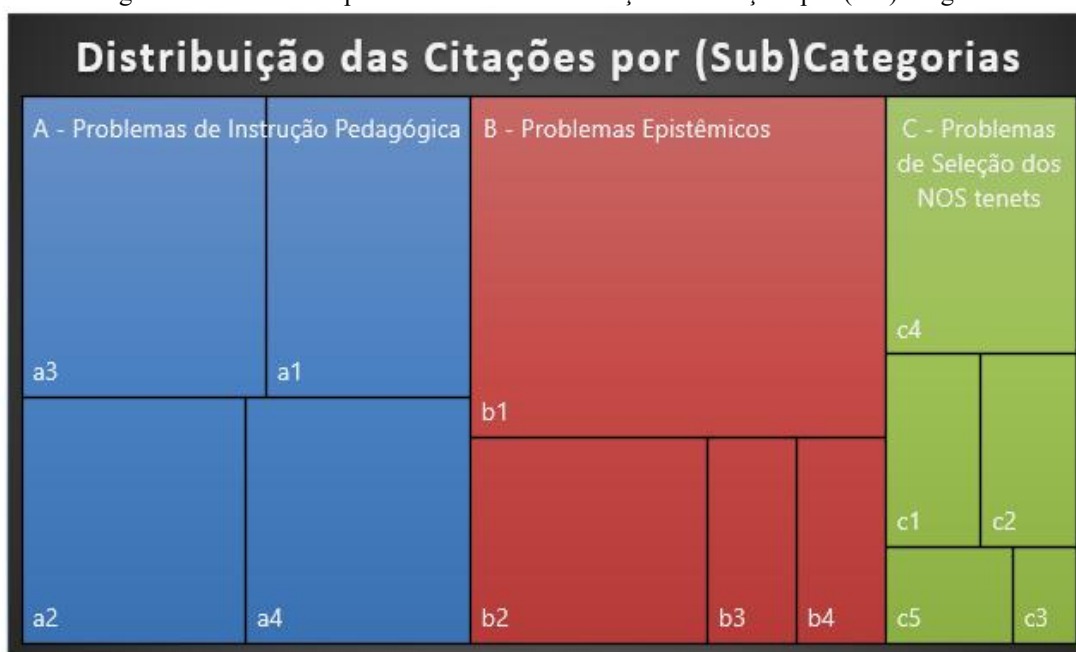
Crítica	Designação	Descrição	Referenciais	Citações
(A) Problemas de Instrução Pedagógica				
Crítica (a1)	Prejuízos à Educação Científica Plena	Os <i>NOS tenets</i> não favorecem o objetivo de promover uma educação científica plena (crítica) – isto é, auxiliar os cidadãos nas tomadas de decisões pessoais e sociais sobre tópicos que envolvem Ciências.	Allchin (2011) Matthews (2012)	10
Crítica (a2)	Itens Descontextualizados	Em virtude de seu formato como lista de princípios desprovida de contexto, o “real” significado dos <i>NOS tenets</i> pode ser facilmente distorcido ou mal compreendido por estudantes e professores.	Clough (2006, 2007) Adúriz-Bravo (2007) Matthews (2012)	9
Crítica (a3)	Estímulo à Aprendizagem Mecânica (memorização)	Os <i>NOS tenets</i> tornam-se algo que os professores devem transmitir (dizer ou apresentar) – e os estudantes devem saber (memorizar ou decorar) – em vez de algo a ser investigado, discutido, refletido e argumentado em aulas de disciplinas científicas.	Allchin (2011) Matthews (2012)	12
Crítica (a4)	Avaliação Não Funcional	É equivocada a pressuposição de que o aprendizado a respeito da Natureza da[s] Ciência[s] pode ser julgado e avaliado pela capacidade dos alunos identificarem determinado número de enunciados	Allchin (2011) Matthews (2012)	9

		declarativos a respeito da natureza da ciência.		
(B) Problemas Epistêmicos				
Crítica (b1)	Visão Monolítica da Ciência	Não considera as particularidades e heterogeneidades significativas, existentes entre as diversas áreas das Ciências, nem as mudanças ocorridas no fazer científico ao longo do tempo.	Irzik e Nola (2011) Matthews (2012)	23
Crítica (b2)	Ausência de Controvérsias Epistemológicas	Por definição intrínseca de origem, os <i>NOS tenets</i> não podem contemplar controvérsias epistemológicas sobre a NdC.	Adúriz-Bravo (2007) Allchin (2011) Irzik e Nola (2011) Matthews (2012) Martins (2015)	8
Crítica (b3)	Controvérsias sobre Terminologias	Não há consenso sobre qual a terminologia mais adequada para denominar a área de pesquisa na literatura em ensino de ciências, revelando entendimentos diversos quanto ao real significado da expressão “Natureza das Ciências”.	Krogh e Nielsen (2013) Martins (2015)	3
Crítica (b4)	Não Diferencia a Ciência de outras Atividades Intelectuais	Abordagens pedagógicas baseadas na visão consensual sobre a NdC e nos <i>NOS tenets</i> são incapazes de diferenciar as Ciências em relação a outras formas de conhecimento. Além disso, não reconhece que as Ciências apresentam diversas características comuns a outras formas de conhecimentos	Irzik e Nola (2011) Matthews (2012) Hodson e Wong (2014)	3
(C) Problemas de Seleção dos <i>NOS tenets</i>				
Crítica (c1)	Ausência de Aspectos Relacionados à Investigação Científica	Não considera, ou não discute, de modo mais profundo os processos, valores, métodos de investigação científica, alegando que a NdC se refere apenas aos fatores epistemológicos subjacentes à atividade científica.	Allchin (2011) Irzik e Nola (2011) Matthews (2012) Martins (2015)	3
Crítica (c2)	<i>NOS tenets</i> “consensuais” variam de 8 a 16 itens	O suposto “consenso” em torno dos <i>NOS tenets</i> varia de 8 a 16 itens, e algumas vezes, chega até 25 itens.	Allchin (2011) Hodson e Wong (2014)	3
Crítica (c3)	<i>NOS tenets</i> “colonizadores”	Dentre os 08 (oito) documentos oficiais considerados para o estabelecimento dos princípios de NdC (<i>NOS tenets</i>), nenhum pertence à Europa continental, América Latina, África ou mesmo Ásia.	Martins (2015)	1
Crítica (c4)	<i>NOS tenets</i> contém tensões, incoerências, contradições e admitem exceções.	A maioria dos <i>NOS tenets</i> são contextuais, com exceções importantes e complexas para serem designados como aspectos in nato das Ciências.	Adúriz-Bravo (2007) Clough (2006, 2007) Matthews (2012) Martins (2015)	8
Crítica (c5)	Riscos de Estímulo ao “Relativismo Exacerbado”	Os atuais <i>NOS tenets</i> não fazem frente aos desafios políticos, sociais e educacionais impostos pelos nossos tempos, nos quais movimentos anticientíficos (negacionistas, pós-verdade) e discursos exageradamente relativistas ganham força, emergindo novas concepções inadequadas sobre as Ciências.	Martins (2015) Pereira e Gurgel (2020)	2

Fonte: Adaptado de Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a).

A Figura 1 apresenta um mapa de árvore construído por Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a) para ilustrar a distribuição das citações entre as três dimensões/categorias (A, B e C) e entre as 13 subcategorias. A partir da análise das áreas coloridas, é perceptível que o número total de citações nas categorias A e B é aproximadamente igual e ligeiramente mais que o dobro em comparação com a categoria C. Além disso, observa-se que, entre as subcategorias, a Crítica b1 (“Visão Monolítica da Ciência”) recebeu o maior número de citações, totalizando 23. Seguem-se a Crítica a3 (“Estímulo à Aprendizagem Mecânica”) e a Crítica a1 (“Prejuízos à Educação Científica Plena”), com 12 e 10 citações, respectivamente.

Figura 1 - Gráfico “Mapa de Árvore” da distribuição das citações por (sub)categoria.



Fonte: Suttini, Caluzi, Errobidart (2023a).

Com base nesses dados, Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a) concluíram que as críticas dos pesquisadores em relação à visão consensual da NdC parecem estar centradas no tipo de abordagem didático-pedagógica por ela induzida, enfatizando os riscos e as implicações negativas que isso pode gerar para a educação científica. Por outro lado, ressaltam que não se observa ênfase semelhante em relação aos aspectos específicos que poderiam estar incluídos (ou ser excluídos) na seleção dos princípios heurísticos representativos da NdC (*NOS tenets*). No entanto, conforme ressaltam Martins (2015), para qualquer proposta de ensino, deve-se considerar as implicações da interrelação entre a “forma” e o “conteúdo”, pois os problemas nos “conteúdos” podem afetar negativamente a “forma”, e vice-versa.

Os pesquisadores-referenciais críticos à visão consensual sobre a NdC, identificados no estudo de Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a), têm sugerido propostas alternativas, consideradas mais amplas e flexíveis. Entre essas propostas estão os “campos teóricos

estruturantes da filosofia da ciência” (Adúriz-Bravo, 2007), “ciência integral” (Allchin, 2011), “semelhança familiar” (Irzik; Nola, 2011), “característica da ciência” (Matthews, 2012), “temas e questões sobre a NdC” (Martins, 2015) e “os discos de semelhança de família” (Dagher; Erduran, 2016). Essas novas abordagens têm ganhado muitos apoiadores de acordo com diferentes revisões de literatura, o que de certa forma representa um reforço em relação aos argumentos acerca das implicações negativas para formação crítica de estudantes e professores quando se exclui os aspectos não consensuais e controversos sobre a NdC do ensino de ciências.

Entretanto, isso não significa que as críticas e as novas abordagens estão imunes a contra argumentações. Roda e Martins (2021, p. 10) realizaram um análise da crítica de Michael Matthews à visão consensual de Norman Lederman, e concluíram que “Matthews (2012) parece não compreender ou, no pior dos casos, parece ignorar o contexto no qual esses aspectos [*NOS tenets*] foram selecionados”. Segundo os autores, em nenhum momento Lederman e seus colaboradores transmitem a ideia de que os *NOS tenets* devem ser interpretados como “[...] uma lista declarativa que deveria ser decorada e avaliada em seguida, como Matthews (2012) sugere” (Roda; Martins, 2021, p. 10). Pelo contrário, eles apontam que os *NOS tenets* devem servir como um ponto de partida para discussões e reflexões que podem ser adaptadas aos níveis das séries correspondentes e que fomentarão o aprendizado futuro.

Tais divergências entre esses pesquisadores ilustram, pelo menos um pouco, o estágio atual do nível de discussão e de debates na controvérsia acadêmica sobre *o que e como* melhor ensinar sobre a NdC nas aulas de ciências.

Diante das controvérsias acadêmicas sobre *o que* ensinar e *como* abordar a NdC, e considerando as conclusões de Suttini, Caluzi e Errobidart (2023a) – de que as críticas à visão consensual à NdC concentram-se, sobretudo, na “forma” de ensino, ou seja, nas preocupações quanto à escolha e adequação do tipo de abordagem pedagógica a ser implementada pelos professores de disciplinas científicas –, é nosso entendimento, seguindo a linha de pensamento de Lederman *et al.* (2002), Lederman (2007) e Roda e Martins (2021), que os *NOS tenets* devem ser empregados como eixos temáticos e questões problematizadoras para fomentar argumentações, discussões e reflexões sobre aspectos da NdC.

Considerando o exposto, optou-se por adotar como referencial teórico-metodológico os pressupostos epistemológicos da visão consensual da NdC e seus princípios heurísticos representativos (*NOS tenets*). Essa escolha se justifica pela necessidade de uma abordagem que priorize a compreensão dos aspectos gerais e essenciais sobre a NdC, contribuindo para uma formação inicial mais sólida e crítica dos estudantes.

Com o objetivo de fornecer um embasamento teórico e direcionador para o processo de coleta, análise e interpretação de dados sobre as concepções epistemológicas dos estudantes – antes e depois de nossa intervenção pedagógica –, considera-se necessário explicitar, com maior profundidade, a perspectiva adotada pelos professores-pesquisadores sobre o que caracteriza uma compreensão mais precisa e bem informada da NdC. Esse referencial é essencial para assegurar uma análise contextualizada e rigorosa das possíveis mudanças nas concepções dos estudantes ao longo da implementação da proposta de ensino investigada.

1.3.2 Os Princípios Heurísticos Representativos da Natureza da Ciência

Foi elaborada uma síntese para cada um dos aspectos da NdC, com base no que a literatura da chamada “visão consensual sobre a NdC” considera como conteúdos essenciais acessíveis e relevantes para o ensino sobre práticas científicas. Essa síntese compõe um dos pilares da proposta didática desenvolvida neste estudo, voltada à implementação de uma disciplina (não tradicional) de História da Ciência. A construção desse material baseou-se em referenciais da filosofia contemporânea da ciência, em definições amplamente reconhecidas na literatura secundária em História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC), bem como em pesquisas sobre o ensino e a aprendizagem de aspectos da NdC.

(a) Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas

1. A ciência é influenciada pelo contexto histórico, filosófico, político, econômico, social, cultural e científico-tecnológico no qual é construída.

De imediato, é crucial afirmar que as práticas científicas, enquanto atividade intelectual humana, ocorrem dentro de uma cultura mais ampla, isto é, em um determinado contexto histórico, filosófico, sociocultural, econômico, político e tecnológico. Logo, todas as pessoas envolvidas (cientistas, professores, técnicos etc.) são moldadas por esse contexto cultural.

Como resultado, a ciência não apenas influencia, mas também é influenciada por diversos fatores, como a estrutura social, o poder político, as condições socioeconômicas, a

filosofia, a religião e outras esferas intelectuais da cultura em que está inserida (Lederman *et al.*, 2002; McComas, 1996, 1998, 2002, 2004). Por exemplo, determinados campos pesquisas podem receber amplo apoio da comunidade científica e da sociedade em geral (*e.g.*, energias renováveis, agricultura sustentável, inteligência artificial aplicada à segurança e vigilância), enquanto outras podem ser desencorajadas, censuradas ou até mesmo proibidas, dependendo do contexto histórico-social em que são realizadas (*e.g.*, células-tronco, energia nuclear, engenharia genética).

Isso significa que o conhecimento científico não está totalmente livre da influência dos valores socioculturais defendidos e compartilhados pela sociedade na qual foi produzido. Portanto, ele não é neutro, autônomo e imparcial. A aceitação ou rejeição de determinadas áreas de pesquisa não está apenas relacionada exclusivamente à sua validade científica, mas também é influenciada por fatores culturais, éticos e políticos que variam ao longo do tempo e entre diferentes sociedades.

De acordo com Peduzzi e Raicik (2020), a concepção de senso comum de que as pesquisas científicas não estão sujeitas às influências do contexto histórico-social – ou seja, a ideia de neutralidade, objetividade e imparcialidade da ciência – decorre das diversas tentativas do programa positivista da primeira metade do século XX de varrer da ciência elementos considerados não cognitivos, como crenças pessoais, valores socioculturais, princípios metafísicos e, em especial, concepções teológicas. Essas tentativas deram origem a uma suposta dicotomia entre o contexto da descoberta e o contexto da justificativa⁹, uma visão sobre NdC ultrapassada segundo o referencial da filosofia da ciência contemporânea, pois ambos os contextos são entrelaçados e indissociáveis, fazendo que a imagem estereotipada do cientista destituído de crenças e preconceitos se torne insustentável (Kuhn, 2013 [1962]; Feyerabend, 2011 [1975]; Lacey, 2005, 2008, 2010).

Em contraste com essa compreensão mais precisa e bem informada sobre as influências histórico-sociais nas práticas científicas, Cachapuz *et al.* (2005) afirmam que a literatura em ensino de ciências apresenta uma constatação recorrente: estudantes e professores compartilham a imagem deformada do trabalho científico denominada “*visão descontextualizada e socialmente neutra*”. Essa visão sugere que a atuação dos cientistas é

⁹ No livro *Experiência e predição*, lançado em 1938, o filósofo da ciência alemão Hans Reichenbach (1891-1953) explora a diferenciação entre esses dois domínios. As raízes do conhecimento científico, sua origem e o processo de sua formação, que envolve elementos psicológicos e subjetivos, são enquadrados no âmbito do “contexto da descoberta”. Enquanto isso, o “contexto da justificativa” está ligado aos resultados científicos que, nesta visão estrita e simplificada da NdC, desconsidera a influências de aspectos humanos ou não cognitivos, eliminando assim a qualquer elemento de subjetividade no processo de validação e aceitação do conhecimento científico.

considerada como socialmente neutra (livre de valores) e protegida de interesses sociais diversos, incluindo aqueles de natureza política, econômica e ideológica. De acordo com os autores, devido à falta de uma compreensão mais aprofundada das interações entre ciência e tecnologia, esses indivíduos percebem as complexas e intrincadas relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente.

Cachapuz *et al.* (2005) mencionam, como exemplo, a noção de senso comum que considera as inovações tecnológicas como simples aplicações dos conhecimentos científicos, ou seja, a ideia de que a tecnologia é um subproduto da ciência. Por conseguinte, o desenvolvimento de dispositivos tecnológicos e suas profissões correlatas têm sido tradicionalmente visto como uma atividade humana de menor prestígio em relação à “ciência pura”, uma concepção que remete à ultrapassada e antiquada separação hierárquica entre conhecimento técnico (prático) e intelectual (teórico).

Ainda de acordo com Cachapuz *et al.* (2005), a desvalorização da tecnologia reflete visões de senso comum que ignoram o contexto científico-tecnológico, como se o desenvolvimento científico ocorresse isoladamente nos laboratórios localizados em “Torres de Marfim”. Isso reforça e se conecta a outra imagem deformada do trabalho científico, designada de “*visão individualista e elitista*”, na qual os cientistas são estereotipados como gênios isolados, falando em linguagem abstrata, frequentemente homens brancos europeus.

(b) Sobre a Natureza do Conhecimento Científico

2. Em essência, o conhecimento científico é produzido por tentativa e erro; logo, está sempre suscetível a questionamentos, mudanças e refutações.

É consensual entre os estudiosos da HFSC que o trabalho científico é um processo constante de revisão e autocrítica; logo, estão suscetíveis a mudanças e refutações. Os conhecimentos produzidos – hipóteses, observações experimentais, leis, teorias, modelos, entre outros constructos da ciência – não devem ser considerados como natureza irrevogável e definitiva, isto é, como uma verdade absoluta revelada. O conhecimento científico possui um caráter provisório, circunstancial e tentativo, pois a ciência é um empreendimento humano em constante busca, por meio de tentativas e erros, por uma compreensão mais precisa e completa dos fenômenos naturais (McComas, 1996, 1998; Lederman *et al.*, 2002; Peduzzi; Raicik, 2020).

Entretanto, Cachapuz *et al.* (2005) identificam como uma imagem deformada das práticas científicas a “*visão rígida, algorítmica e infalível*”. Essa visão se apoia na ideia de que

a aplicação rigorosa e diligente do método científico hipotético-dedutivo experimental, seguida do forma meticulosa em suas etapas sucessivas, levaria invariavelmente a resultados precisos, objetivos e confiáveis, isentos de vieses de cunho pessoal ou externos, portanto, infalíveis. Essa visão estereotipada e de senso comum sobre a NdC, embora amplamente difundida, ignora as complexidades do trabalho científico e transmite a ideia de que seus resultados são definitivos e incontestáveis, ou seja, verdades absolutas.

Outro equívoco frequentemente disseminado e relevante para a discussão é a “*visão acumulativa e de crescimento linear*”, identificada por Cachapuz *et al.* (2005) como uma imagem deformada do trabalho científico. Segundo essa perspectiva, acredita-se que os resultados das novas investigações sempre ampliam o alcance das teorias atualmente aceitas pela comunidade científica. Em linhas gerais, imagina-se um cenário em que novas observações, leis e teorias são incorporadas a um vasto repositório de saberes científicos, como se formassem um acúmulo contínuo e homogêneo de conhecimento. No entanto, nessa visão, não se reconhece a possibilidade de surgirem conflitos, incoerências e inconsistências entre as leis e teorias científicas, tampouco se consideram as crises, rupturas e controvérsias. Da mesma forma, não se cogita que teorias bem-sucedidas por longos períodos possam ser contestadas, eventualmente refutadas ou ter sua validade restrita a um conjunto específico de fenômenos. Em outras palavras, o desenvolvimento científico é erroneamente retratado como um progresso contínuo e linear, baseado na ideia de que as ciências são um *corpus* de conhecimento em expansão ininterrupta ao longo da história.

Por outro lado, uma concepção mais precisa e bem informada sobre a NdC deve reconhecer a existência de períodos de estabilidade e cumulatividade na história da ciência, como os descritos pelo filósofo Thomas Kuhn em seus conceitos de “*paradigma*” e “*ciência normal*” – por exemplo, o desenvolvimento da física newtoniana antes das transformações trazidas pela Teoria da Relatividade. Assim, o problema não está na noção de cumulatividade em si, mas em sua interpretação rígida e acrítica, que ignora a possibilidade de crises, revisões e refutações que surgem em razão de novas descobertas científicas.

A “*visão cumulativa e de crescimento linear*” está estreitamente articulada com a “*visão empírico-indutivista e a-teórica*” (caracterizada como dogmática e fechada), transmitindo uma imagem distorcida do trabalho científico que desconsidera os desafios e obstáculos para validação e aceitação geral de novas ideias. Nessa concepção equivocada da NdC, ignora-se o fato de que teorias concorrentes e incompatíveis podem interpretar, de forma satisfatória, as mesmas evidências experimentais disponíveis com base em seus próprios modelos teóricos. Sugere-se, equivocadamente, que a correspondência empírica de uma determinada hipótese, lei

ou teoria, seguida de sua aceitação geral pela comunidade científica, garante a preservação integral desse saber no futuro. Em último caso, no máximo, acredita-se que ele sofrerá pequenas modificações para aumentar sua abrangência de explicação, rigor, precisão e a aplicação Cachapuz *et al.* (2005).

c) Sobre a Natureza das Observações Experimentais

3. As teorias exercem uma influência crucial em todo o processo de construção do conhecimento científico.

Todas as etapas de uma investigação científica são moldadas e permeadas por teorias subjacentes. Elas determinam desde a escolha do objeto de estudo, definição do problema, formulação inicial das questões de pesquisa até a interpretação de observações experimentais. Nesse contexto, segundo Lederman *et al.* (2002), para construção de uma imagem mais precisa e bem informada sobre a NdC, é importante que os professores e estudantes compreendam a diferença entre os conceitos de “*observação*” e “*inferência*”.

Uma “*observação científica*” é definida como uma afirmação descritiva sobre um fenômeno do mundo natural, guiada por conhecimentos prévios, obtida diretamente pelos sentidos ou por instrumentos de medida (Lederman *et al.*, 2002). No contexto científico, as observações são altamente seletivas, pois dependem da escolha de um objeto específico, do ponto de vista, dos interesses particulares e dos problemas em estudo. Assim, as observações científicas combinam elementos empíricos, baseados na experiência prática, com componentes teóricos oriundos de hipóteses, leis e modelos preexistentes. Portanto, no âmbito científico, não existem observações neutras, isto é, desprovidas de teorias subjacentes (Peduzzi; Raicik, 2020).

Por outro lado, uma “*inferência científica*” refere-se a uma conjectura ou conclusão que não pode ser acessada diretamente pelos sentidos humanos. As inferências são, portanto, de natureza especulativa e dedutiva, e são avaliadas, mensuradas e testadas por meio de relações de causa e efeito (Lederman *et al.*, 2002). Exemplos de inferências incluem a formulação de hipóteses, modelos, leis ou teorias. A ideia científica de gravidade é de natureza inferencial, pois não pode ser diretamente acessada pelos sentidos, mas sim medida por meio de suas manifestações ou efeitos observáveis, como as perturbações nas órbitas planetárias previstas devido às atrações interplanetárias e o desvio da luz proveniente das estrelas ao passar pelo campo gravitacional do Sol. Outras entidades de natureza inferencial são os átomos, orbitais moleculares, genes, campos eletromagnéticos, fótons, entre outros (Lederman *et al.*, 2002).

Embora as teorias subjacentes sejam fundamentais para as observações experimentais e na produção de inferências, elas também impõem limitações à ideia de objetividade absoluta na construção do conhecimento científico. De fato, o empreendimento científico visa alcançar um elevado grau de imparcialidade e objetividade, o que é favorecido por meio da publicidade das ideias, do sistema de revisão por pares duplo-cegos adotados pelas revistas científicas (em inglês, *peer review*), da exigência de descrições detalhadas dos procedimentos metodológicos empregados nos estudos, da declaração de quaisquer conflitos de interesse que possam influenciar os resultados da pesquisa, bem como por meio da aplicação de uma série de outros procedimentos em situações de transgressão ética e moral (Teixeira; Freire Jr; El-Hani, 2009).

Sem dúvidas, todas essas medidas contribuem para elevar a confiabilidade, a credibilidade, a validade e o controle das comunicações científicas. No entanto, considerando as perspectivas epistemológicas contemporâneas, as quais são mais condizentes com as complexidades das práticas científicas, ainda assim, é importante reconhecer que tais medidas são incapazes de assegurar uma objetividade científica absoluta; elas estão limitadas a somente minimizar vieses e erros. Fatores subjetivos não podem ser completamente eliminados do trabalho científico, visto que, enquanto atividade humana, ele inevitavelmente sofre influências de valores socioculturais, crenças pessoais, vieses ideológicos, formação específica e suposições baseadas em teorias científicas subjacentes (McComas, 1996; Lederman *et al.*, 2002). Isso implica na rejeição de uma concepção empirista da NdC que considera os conhecimentos científicos como resultados de inferência indutivas baseadas na observação e interpretação de “dados puros”.

Nesse contexto de discussão sobre a natureza das observações experimentais e das influências teóricas no processo de investigação científica, Cachapuz *et al.* (2005) destacam a “visão empírico-indutivista e a-teórica” como a imagem deformada do trabalho científico mais analisada e criticada na literatura de pesquisa em ensino de ciências. Essa perspectiva, caracterizada por uma concepção empirista exageradamente crédula, tem suas raízes tanto no método indutivo proposto por Francis Bacon (1561 – 1626) quanto na doutrina positivista de Auguste Comte (1798-1857). Segundo essa visão, presume-se que, com treinamento e formação acadêmica sólida, os cientistas podem conduzir suas investigações de maneira completamente neutra, imparcial e objetiva, ignorando a inevitável influência de fatores teóricos e subjetivos no processo científico. Em resumo, essa concepção perpetua a ideia equivocada de que a atividade científica é isenta de subjetividade e valores socioculturais.

Thomas Kuhn (2012 [1963]), em seu ensaio intitulado *A função do dogma na investigação científica*, expressou esse ideal utópico de cientista neutro, objetivo e imparcial da seguinte forma:

Estou certo de que cada um dos participantes deste simpósio se expôs, a dada altura de sua carreira, à ideia do cientista como o investigador sem preconceitos em busca da verdade; o explorador da natureza – o homem que rejeita preconceitos quando entra no laboratório, que coleciona e examina os fatos crus, objetivos, e que é fiel a tais fatos e somente a eles. Estas são as características que fazem do testemunho dos cientistas um valioso elemento na propaganda de produtos variados e, em exclusivo, nos Estados Unidos. Mesmo perante uma audiência internacional não é preciso esclarecer mais. Ser científico é, entre outras coisas, ser objetivo e ter espírito aberto. Provavelmente nenhum de nós acredita que o cientista da vida real, na prática, consegue preencher tal ideal (Kuhn, 2012 [1963], p. 23).

Adicionalmente, a “*visão aproblemática e a-histórica*”, caracterizada como dogmática e fechada, também identificada no trabalho de Cachapuz *et al.* (2005), desempenha um papel relevante nesse contexto de discussão. Isso porque ao ignorar os problemas que deram origem a determinado conhecimento científico, promove-se uma imagem distorcida da NdC na qual os cientistas são retratados como se fossem agraciados por inspirações divinas inesperadas. Essa imagem distorcida e simplificada da NdC deixa de reconhecer que o desenvolvimento científico é resultado de um empreendimento coletivo e colaborativo, influenciado tanto pelas dinâmicas histórico-sociais dentro da própria comunidade científica (fator interno), quanto pela sociedade em geral (fator externo). Além disso, não se leva em consideração que o desenvolvimento pode levar um período bastante prolongado para que a validação e aceitação se concretizem.

(d) *Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias*

4. A construção do conhecimento científico é intrinsecamente ligada à imaginação, criatividade e ao uso de analogias.

Seja na formulação de hipóteses, na construção de aparatos experimentais inovadores, na criação de novas abordagens metodológicas para análise de dados, ou na produção de inferências e explicações, esses elementos são essenciais em todas as etapas de uma investigação científica (Lederman *et al.*, 2002). Os diversos modelos científicos, por exemplo, devem ser compreendidos, em uma visão mais precisa e bem informada da NdC, como abstrações que refletem a criatividade e a imaginação dos cientistas para explicar as evidências experimentais disponíveis.

Assim, percebe-se, quando se trata de investigar e buscar soluções para algum problema ou enigma, que as práticas científicas compartilham semelhanças com outras atividades

intelectuais (e.g., investigadores criminais). Nessas profissões, nas quais os indivíduos são “solucionadores de problemas”, a imaginação, a criatividade, as analogias, o conhecimento prévio especializado e a perseverança são qualidades fundamentais comuns a todos (McComas, 1996).

Segundo Peduzzi e Raicik (2020, 2021), os designados “experimentos mentais”¹⁰, um recurso heurístico que tem sido largamente empregado e registrado na história da ciência, mostra o valor essencial das conjecturas pré-observacionais, dos conhecimentos prévios e das convicções teóricas na investigação científica. Nesse contexto, o filósofo e historiador Alexandre Koyré (1892-1964) explica que a imaginação, a criatividade e o uso de analogias possibilitam a superação das limitações do mundo real e permite a criação de objetos teoricamente perfeitos.

Koyré (1982) salienta que as experiências reais, frequentemente, são difíceis de realizar devido à complexidade e ao custo dos equipamentos, além da inevitável imprecisão e incerteza associadas, que impossibilitam o alcance na perfeição nas medições ou a reprodução exatamente autêntica dos fenômenos naturais. Isso resulta em uma lacuna entre o mundo empírico e o objeto teórico, que não pode ser totalmente eliminada. Para ele, são exatamente os “experimentos mentais”, caracterizados pela exploração de cenários imaginários, que permitem aos cientistas testarem hipóteses, avaliar teorias e antecipar resultados, sem a necessidade de realizar experimentos físicos. Em suas palavras:

É aí que a imaginação entra em cena, eliminando facilmente o abismo. [...] Assim, ela [a imaginação] permite que esferas perfeitas deslizem sobre planos perfeitamente lisos e perfeitamente duros; suspende pesos com alavancas perfeitamente rígidas, cujo peso, por sua vez, é inexistente; permite que a luz emane de fontes puntiformes; envia corpos ao espaço infinito para que lá se movam eternamente; regula relógios síncronos dos sistemas galileanos de referência em movimento inercial e lança fótons, um a um, sobre uma tela com uma ou duas fendas. Assim, a imaginação obtém resultados de uma precisão total – o que, aliás, não os impede, às vezes, de serem falsos, pelo menos em relação à *rerum natura* – e é certamente por isso que, tantas vezes, são experiências imaginárias que estão subentendidas nas leis fundamentais dos grandes sistemas de filosofia natural, como os de Descartes, de Newton, de Einstein...e também de Galileu (Koyré, 1982, p. 209).

¹⁰ O conceito de “experimentos mentais” ou “experimentos de pensamento”, foi introduzido na filosofia da ciência pelo físico alemão Ernst Mach (1838-1916) em um artigo publicado em 1897, no qual ele inicia o desenvolvimento dessa categoria especial de experimento. Mach mostra que os “experimentos mentais” são um recurso heurístico bastante presente na história da ciência, especialmente na física, mas que até então não havia sido analisado de forma crítica. Além disso, destaca a importância da razão e das concepções teóricas subjacentes na formulação, execução e interpretação de um experimento. Mach (1976, p. 136) escreveu: “Nossas ideias estão mais facilmente e prontamente disponíveis do que fatos físicos: experimentos mentais custam menos, por assim dizer. Portanto, não é de surpreender que os experimentos mentais precedam e preparem os experimentos físicos”.

Em contrapartida, as articulações e sobreposições entre as visões “*rígida, algorítmica e infalível*”, “*empírico-indutivista e a-teórica*” e “*aproblemática e a-histórica*”, ampliam as distorções da imagem do trabalho científico, induzindo as pessoas a acreditarem que o fazer científico se resume ao fazer mecânico e protocolar, isto é, um fazer que resume a reproduzir um modelo padrão preestabelecido, com garantias exclusivas de validade. Nessa perspectiva epistemológica equivocada sobre NdC, a relevância dos processos imaginativos e criativos inexistente ou é minimizada, pois persiste a ideia de que a influência de elementos histórico-sociais e subjetivos na formação e atuação dos cientistas deve ser evitada ao máximo (Cachapuz *et al.*, 2005). Muitas vezes, compara-se o trabalho científico com a montagem de um quebra-cabeça ou de um “cubo mágico”. Embora trabalhoso e desafiador, acredita-se que, com alguma abordagem estratégica e aderência rigorosa às instruções preestabelecidas, é possível alcançar um resultado satisfatório, sem que a imaginação e criatividade desempenhem um papel crucial.

(e) Sobre a Metodologia Científica

5. Existe uma diversidade de métodos que são empregados nas investigações científicas, igualmente válidos, em vez de um método único, rígido, fechado, algoritmo e infalível.

É uma concordância, que se estabeleceu entre os estudiosos da HFSC ao longo do século XX, que não existe, nem nunca existiu, um procedimento metodológico prescritivo e normativo nas ciências. Não há um conjunto de etapas hierarquicamente estruturadas e de natureza geral, que, se seguido rigidamente, de maneira diligente, pode assegurar a aquisição do conhecimento verdadeiro e sucesso a todo pesquisador em seu trabalho (Peduzzi; Raicik, 2020). Conforme observado pelo pesquisador Norman G. Lederman:

É verdade que os cientistas observam, comparam, medem, testam, especulam, formulam hipóteses, criam ideias e ferramentas conceituais, e constroem teorias e explicações. No entanto, não há uma sequência única de atividades, sejam elas prescritas ou não, que os conduza infalivelmente a soluções ou respostas funcionais ou válidas, muito menos a conhecimentos certos ou verdadeiros (Lederman *et al.*, 2002, p. 501-502).

Irzik e Nola (2011) e Matthews (2012) enfatizam a importância de promover discussões e reflexões sobre as distintas particularidades e notáveis heterogeneidades presentes entre as diversas áreas científicas. Além disso, recordam as transformações que ocorreram na tradição da atividade científica ao longo do tempo, em contraposição a uma visão monolítica do trabalho

científico. “A astronomia e cosmologia, por exemplo, são muito diferentes, digamos, da química, por elas não serem disciplinas experimentais [no sentido de manipulação e controle direto do objeto de estudo], mas sim observacionais” (Irzik; Nola, 2011, p. 593). Assim, pode-se afirmar que existem diferentes tradições e abordagens nas áreas científicas, divergindo substancialmente de acordo com aquilo que se quer estudar (planetas, doenças, fósseis, átomos e moléculas etc.); e é esse aspecto fundamental que, em última análise, determina os procedimentos metodológicos pelos quais a pesquisa científica será conduzida.

Ademais, vale ressaltar que, mesmo entre as áreas consideradas experimentais, há várias diferenças em relação aos métodos, técnicas, abordagens e às regras empregadas. No contexto de testagem de novos medicamentos ou de dispositivos médicos, os métodos experimentais duplo-cego e triplo-cego são considerados “padrão ouro” em estudos clínicos. Em contrapartida, na física experimental, essas abordagens são praticamente inconcebíveis e inviáveis. Da mesma forma, na área da Física, as leis e teorias científicas objetivam fornecer previsões matemáticas cada vez mais precisas (*e.g.*, a “Teoria da Relatividade Geral” predisse com muita precisão o valor do desvio na trajetória da luz, ao passar próximo a um campo gravitacional). Já na Biologia, embora as bem-sucedidas “Teoria da Evolução” e a “Teoria da Seleção Natural” expliquem o desenvolvimento e as mudanças hereditárias das espécies ao longo do tempo, fundamentais para a compreensão da diversidade da vida na Terra, elas não produziram nenhuma previsão matemática (Irzik; Nola, 2011; Matthews, 2012).

Em contraste com essa compreensão mais fidedigna do processo de investigação científica, na qual enfatiza-se uma variedade metodológica de pesquisa, Cachapuz *et al.* (2005) analisam as implicações da “visão rígida, algorítmica e infalível” do trabalho científico. Os autores afirmam que essa visão equivocada da NdC contribui, em grande parte, para a manutenção de concepções empírico-indutivistas, que atribuem a um suposto “Método Científico”, presente nas pesquisas experimentais, um caráter de infalibilidade quando aplicado de maneira rigorosa e diligente.

Essa perspectiva equivale a sugerir a existência e a imposição de uma receita padrão de pesquisa, em que os cientistas executam estritamente e, em sequência, as etapas definidas do método científico hipotético-dedutivo experimental, considerado único e universalmente válido. Segundo Chalmers (1993), a visão empírico-indutivista do trabalho científico defende que as etapas do “Método Científico” seriam: (1) fazer uma observação; (2) levantar hipóteses; (3) reproduzir o fenômeno em laboratório; (4) coletar dados por meio de um procedimento experimental rigoroso e diligente (sem influência de fatores subjetivos); (5) derivar leis e teorias

científicas por algum tipo de raciocínio lógico. O conhecimento científico obtido a partir do emprego do “Método Científico” seria, portanto, exato e infalível, neutro, objetivo e imparcial.

Diante dessa perspectiva equivocada da NdC, é importante destacar o papel desempenhado nas investigações científicas pelo pensamento divergente. Ele está presente em todas as etapas da investigação, incluindo a criação de hipóteses, de suposições, do desenho de experiências, da interpretação e da análise de resultados, e nos processos de modelagem científica. Os cientistas raciocinam, em última instância, tomando-se por base hipóteses, observações experimentais e teorias pré-estabelecidas. Esse caráter hipotético faz parte da essência da natureza provisória do conhecimento científico. É precisamente em virtude dessas características que o processo de tentativa e erro na busca por soluções inevitavelmente contempla dúvidas sistemáticas, incertezas, redefinições e a procura por novas ideias. Todos esses elementos realçam o papel indispensável da imaginação e da criatividade, em oposição à visão de uma metodologia científica rígida, algorítmica e infalível (Cachapuz *et al.*, 2005).

“O mito do Método Científico é uma das concepções errôneas mais amplamente difundidas sobre a ciência é a existência do método científico” (Lederman *et al.*, 2002, p. 501), e acreditar nele equivale a transformar o pesquisador em um autômato passivo, desprovido de imaginação, iniciativa, ambições e criatividade. Mas, não apenas isso. Considerando as significativas transformações conceituais e metodológicas que ocorreram na ciência a partir do século XVII, com a valorização da matemática e da experimentação, a ideia de um “Método Científico” está relacionada à concepção de que a ciência é um corpo de conhecimento distinto e superior em comparação com outras formas de expressão intelectual humano, como a pintura, a poesia, a música, a religião e a filosofia. Sob essa perspectiva, o “Método Científico” é visto como a “pedra de toque” da ciência, sendo considerado não apenas o caminho confiável para a obtenção do verdadeiro conhecimento científico, mas também a base argumentativa necessária para justificar as descobertas realizadas (Peduzzi; Raicik, 2020).

(f) Sobre o Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico

6. A disputa entre teorias pelo domínio do conhecimento envolve aspectos internos e externos à ciência; e seus mecanismos de aceitação são complexos e sutis.

O processo de validação e aceitação de novos conhecimentos científicos tem sido, por muito tempo, objeto de controvérsia acadêmica entre os historiadores, filósofos e sociólogos da ciência. A perspectiva positivista, que predominou no século XIX e na primeira metade do

século XX, representada, em grande medida, pela interconexão entre todas as sete imagens deformadas do trabalho científico, relatadas no estudo de Cachapuz *et al.* (2005), promove uma concepção equivocada da NdC na qual o peso relativo do critério “corroboração empírica” – obtida por meio da aplicação rigorosa, algorítmica e infalível do “Método Científico” – é excessivamente enfatizado. No entanto, em uma perspectiva epistemológica contemporânea sobre a NdC, compreende-se que esse enfoque desproporcional no papel da experimentação tem como efeito a desvalorização da relevância de outros critérios igualmente importantes.

O filósofo Hugh Lacey, em seus livros *Valores e atividade científica 1 e 2*, defende a visão de que o trabalho científico é orientado tanto por “valores cognitivos” quanto por “valores não cognitivos”, os quais são compartilhados e defendidos pelos membros das comunidades científicas. Para Lacey (2008, 2010), a corroboração empírica é um valor cognitivo essencial na confirmação ou refutação de novas ideias. Contudo, esse valor corresponde somente à fase inicial eliminatória em um intrincado processo de aceitação de novos conhecimentos científicos. Ele argumenta que, em períodos de controvérsias científicas, as duas teorias concorrentes e incompatíveis, em geral, apresentam sólido apoio experimental para seus enunciados. Além disso, afirma que é bastante comum que os mesmos resultados experimentais possam ser interpretados de forma satisfatória por ambas as teorias, diminuindo, assim, a importância relativa da corroboração empírica no processo de decisão entre elas. Lacey (2008, 2010) sustenta que, diante do impasse, as duas teorias são avaliadas com base em critérios adicionais, ou seja, “valores não cognitivos”, como coerência lógica, consistência teórica (tanto interna, quanto externa, em relação a outras teorias estabelecidas), simplicidade, capacidade de explicar uma ampla gama de fenômenos e, não menos significativo, a fecundidade para estudos de novos fenômenos e projetos de pesquisa.

Hugh Lacey (2008, 2010) e Thomas Kuhn (2013 [1962], 1977) apontam que, em períodos de controvérsias científicas, diversos valores (critérios avaliativos) desempenham um papel relevante. Esses critérios englobam a corroboração empírica, a coerência lógica, a consistência interna e externa, a simplicidade e a capacidade de explorar e prever novos fenômenos (fecundidade). Enquanto Lacey (2008, 2010) categoriza os critérios avaliativos como “cognitivos” e “não cognitivos”, Kuhn (2013 [1962], 1977) os designa como “primários” ou “princípios epistêmicos”.

Ambos os filósofos ressaltam que a aplicação e a importância individual desses critérios são inevitavelmente influenciadas por fatores subjetivos, como crenças pessoais, valores socioculturais, pressupostos filosóficos, concepções metafísicas e teológicas, preferências teórico-metodológicas e interesses de grupos de pesquisa. Para eles, a diversidade subjetiva na

atribuição de peso relativo a cada um desses critérios fortalece cada vez mais o empreendimento científico. Isso ocorre porque, em diferentes tomadas de decisão, os cientistas sempre realizam uma análise de risco assumido, o que leva indivíduos ou grupos de pesquisa a fazer escolhas particulares (Kuhn, 2013 [1962], 1977; Lacey, 2008, 2010).

Assim, com base em uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC, pode-se entender as razões pelas quais nem todos os membros da comunidade científica respondem a uma nova anomalia como uma fonte iminente de crise em seu campo de pesquisa. Muito menos todos adotam, rapidamente na prática, uma nova e audaciosa hipótese científica como promissora de uma teoria revolucionária. Do mesmo modo, nem todos rejeitam a fecundidade e as possibilidades surgidas a partir da anomalia e da nova hipótese sugerida. Em resumo, torna-se possível transmitir saberes epistemológicos que mostram que, de certa forma, “[a liberdade de escolha individual sobre a aplicação dos ‘valores primários’] é talvez a maneira que a comunidade científica encontra para distribuir o risco e assegurar o sucesso de seu empreendimento a longo prazo” (Kuhn, 2013 [1962], p. 295).

Nesse contexto, é válido discutir a imagem deformada do trabalho científico identificada por Cachapuz *et al.* (2005), designada “*visão exclusivamente analítica*”. Essa perspectiva retrata a NdC como algo puramente analítico e reducionista, enfatizando apenas a necessidade de dividir os estudos em partes cada vez menores para aprofundar a compreensão dos fenômenos naturais. As áreas de pesquisas são apresentadas de forma isolada, ignorando a complexidade, a interdependência e as unificações entre os diferentes campos de estudo.

No entanto, uma imagem mais precisa e bem informada sobre a NdC, que reconhece o propósito principal da ciência como a construção de um *corpus* coerente de conhecimento sobre o universo, requer que professores e estudantes percebam a relevância crucial dos valores “coerência” e “consistência” entre diferentes teorias científicas. Ao destacar “[...] os esforços posteriores de unificação e de construção de corpos coerentes de conhecimentos cada vez mais amplos (ou o tratamento de “problemas-ponte” entre diferentes campos de conhecimento que podem chegar a unificar-se)” (Cachapuz *et al.*, 2005, p. 132), percebe-se que a corroboração empírica é um critério essencial para a validação e a aceitação do conhecimento científico, todavia, não constitui um critério isolado.

(g) *Sobre Leis e Teorias Científicas*

7. Leis e teorias científicas são conceitos metacientíficos distintos, portanto, não há uma relação hierárquica entre eles; além disso, leis não podem se tornar teorias, e vice-versa.

Em primeiro lugar, a natureza provisória do conhecimento científico se manifesta por um processo de tentativa e erro, procedendo por meio da formulação de hipóteses (conjecturas especulativas) a respeito do fenômeno investigado. As hipóteses funcionam como uma premissa de argumentação, sendo uma afirmação ou uma suposição para um fato científico fundamentada no raciocínio lógico, empiricamente testável e compatível com o conhecimento científico prévio, ou seja, trata-se de uma explicação culta, racional e falsificável. Uma hipótese é frequentemente utilizada para designar uma teoria em seu estágio inicial de desenvolvimento, ou uma lei especulativa, ou ainda uma predição de um resultado que ainda não foi corroborado empiricamente de maneira satisfatória (McComas, 1998).

No entanto, considerando a situação na qual as consequências lógicas de uma determinada hipótese ainda não foram testadas diversas vezes e sob variadas e rigorosas observações experimentais, essa suposição hipotética está sujeita a dúvidas razoáveis quanto à sua validade. Portanto, é legítimo e comum que uma hipótese não seja plenamente aceita pela comunidade científica (Bunge, 1969). Na História da Ciência, muitas controvérsias científicas emergiram precisamente de disputas e debates acadêmicos sobre a validade de uma nova hipótese proposta, como a ideia revolucionária de “*quantum* de luz”.

Em segundo lugar, a ciência, desde os seus primórdios, depende do pressuposto metafísico de que a natureza é inteligível. O empreendimento científico pressupõe, entre outros postulados, a ordem da realidade, ou seja, que eventos e processos aparentemente aleatórios seguem padrões estáveis e replicáveis. Em relação a esses padrões, a ciência formula hipóteses que são testadas empiricamente como “leis” (Peduzzi; Raicik, 2020).

Bunge (1985) enfatiza que os campos de conhecimentos de investigação científica têm como metas e objetivos a formulação de leis que governam as propriedades dos objetos de estudo, a sistematização em teorias com base em hipóteses e o refinamento dos métodos de pesquisa. O autor destaca a importância fundamental da existência de leis na ciência, afirmando que “onde não há leis, não há ciência”.

Cupani e Pietrocola (2002) afirmam que o constructo “lei científica” é importante não apenas para distinguir a ciência da pseudociência, mas também para estabelecer um limite entre a ciência e as disciplinas das humanidades (*e.g.*, a crítica literária e a história da arte), que são respeitáveis do ponto de vista epistemológico, mas não se inserem no âmbito da atividade científica.

Assim, uma “lei científica” pode ser definida como um conjunto de assertivas singulares ou um enunciado, de caráter geral, derivada de um modelo teórico sistemático (ou seja, deve

encontrar-se inserida em um conjunto de enunciados logicamente interconectados), expressando uma relação de causa e efeito entre grandezas físicas. Em outras palavras, uma “lei” corresponde a uma relação constante identificada na natureza (ou seja, um padrão) com base em um conhecimento científico prévio. Muitas vezes, também é denominada de “*princípio*”. Por definição lógica, as leis científicas apresentam um caráter condicional, isto é, obedecem ao esquema “*Se X ocorrer, então sempre ocorrerá Y*” (Bunge, 1969).

A validação e aceitação de uma “lei científica” se caracteriza pela corroboração empírica completa do seu conjunto de assertivas singulares e de suas respectivas consequências lógicas. Devido à relação causal estabelecida por uma “lei científica”, é possível empregá-la para formular novas hipóteses e realizar previsões altamente precisas para além das nossas observações limitadas sobre um fenômeno natural. Um exemplo é a previsão da dependência linear entre a velocidade máxima dos elétrons emitidos da superfície metálica e a frequência da luz incidente, baseada na “lei do efeito fotoelétrico” [equação fotoelétrica], derivada por Einstein em 1905, a partir da aplicação heurística da “hipótese de *quantum* de luz”, mesmo sem dados que corroborassem sua validade naquele momento.

Em terceiro lugar, o termo “teoria científica” é muitas vezes usado sem muita parcimônia, de maneira imprecisa, sendo confundido com o significado de convicção teórica, conjectura, hipótese ou lei. Mesmo entre os filósofos da ciência, sua definição ou caracterização varia consideravelmente. O filósofo canadense Ian Hacking (2012), por exemplo, define “teorias” como redes conceituais, cuja função é servir como instrumentos intelectuais de explicação, predição, controle e pesquisa.

Neste estudo, apoiando-se em Bunge (1969), uma teoria científica corresponde à síntese sistemática de um extenso *corpus* de conhecimentos, anteriormente fragmentado e isolado em suas partes, incluindo leis correlacionadas, observações experimentais, postulados e hipóteses. As teorias são, assim, “sistemas hipotético-dedutivos” que representam a realidade, cujo objetivo principal é fornecer explicações acerca de um conjunto específico de fenômenos naturais. Uma vez que as teorias científicas incorporam e integram as leis que descrevem as relações causais nesses fenômenos, elas também possuem um sentido preditivo, ou seja, possibilitam a elaboração de novas hipóteses, deduções e a realização de previsões científicas, que também extrapolam as limitações das observações empíricas disponíveis. Dessa maneira, observa-se que, no trabalho científico, são as teorias subjacentes que direcionam as pesquisas, ao introduzirem ou redesenharem questões, apontarem dados inéditos ou fomentarem o surgimento de abordagens questionadoras adicionais – como ocorreu com o desenvolvimento da “Teoria Quântica da Radiação” e da “Teoria da Relatividade” no início do século XX.

No contexto desta pesquisa de doutorado, espera-se que os estudantes compreendam que os cientistas formulam (elaboram, inventam, criam) teorias e leis com o propósito de interpretar e explicar as propriedades observadas nos fenômenos naturais. É importante reconhecer que, epistemologicamente, teorias e leis são conceitos metacientíficos distintos e, portanto, não comparáveis. Embora ambas se fundamentem em sólidas evidências empíricas, não há uma relação hierárquica entre elas, e uma não pode ser transformada na outra pela simples acumulação de corroborações empíricas (Lederman *et al.*, 2002).

Segundo Cachapuz *et al.* (2005), a articulação entre a “visão empírico-indutivista e a-teórica” e a “visão rígida, algorítmica e infalível”, ao atribuir a essência das práticas científicas à experimentação e à aplicação rigorosa do “Método Científico”, fomenta concepções simplistas de “descobertas científicas” associadas a observações fortuitas, como se surgissem por mero acaso, e reforça a imagem distorcida e estereotipada, transmitidas pelos meios de comunicação de massa, de que uma teoria científica surge naturalmente com base em observações empíricas realizadas em “dados puros”. Além disso, os autores advertem que essa imagem deformada do trabalho científico também pode induzir a uma concepção equivocada de hierarquia entre leis e teorias, sugerindo que uma teoria científica, após inúmeras corroborações experimentais, eventualmente evolua para se tornar uma lei científica.

(h) *Sobre a Natureza dos Modelos Científicos*

8. Nenhuma teoria ou modelo científico abrange todos os aspectos da realidade. Os modelos científicos são, portanto, representações da realidade, não a realidade em si. A realidade tal qual ela é, permanece inacessível.

Na subseção anterior, estabeleceu-se que as teorias científicas são “*sistemas hipotético-dedutivos*” representativos da realidade (Bunge, 1969). Contudo, é importante ressaltar que nenhuma teoria pode abranger todos os aspectos da realidade. Em outras palavras, uma teoria científica enfoca tão somente certos elementos da realidade, considerando apenas algumas variáveis e reconhecendo apenas algumas relações de causalidade entre elas. Portanto, pode-se afirmar que as ciências investigam os fenômenos naturais de forma esquemática, associando-se cada teoria a um “modelo ideal” como objeto de estudo, ou seja, à uma abstração da realidade, e não à realidade em si, em toda a sua riqueza e complexidade (o que, aliás, seria impossível). De acordo com Bunge (2008 [1974], p. 25), “a teoria não ‘retrata’, pois, a

realidade, nem se refere imediatamente a ela. A teoria trata, por assim dizer, do ‘objeto-modelo’, que constitui uma representação convencional, embora não arbitrária, e aproximada da realidade”.

Observa-se que o entendimento adequado de professores e estudantes sobre processo de modelagem científica é fundamental para uma compreensão mais autêntica sobre a NdC. De fato, a função de uma teoria científica é fornecer uma explicação desse objeto-modelo, e não da realidade tal qual ela é. Em outros termos, a função de uma teoria é oferecer um “*modelo teórico*” do objeto-modelo. Nesse sentido, os objetos-modelo e seus respectivos modelos teóricos tem o objetivo de consolidar-se como a estrutura racional subjacente ao mecanismo de produção dos acontecimentos reais que são representados por eles (Bunge, 2008 [1974]).

No entanto, a maneira pela qual os modelos são interpretados na ciência difere das concepções de senso comum. Na literatura de ensino de ciências, tem-se constatado que muitos estudantes e professores equivocadamente consideram os modelos científicos como reproduções exatas da realidade, uma concepção fundamentada em um “*realismo ingênuo*” (Cupani; Pietrocola, 2002). Essa constatação deriva, em grande medida, do fato de que a palavra “modelo” é amplamente empregada no dia a dia, resultando em uma diversidade de significados atribuídos a ela, com predominância para o sentido de representação concreta de algo (e.g., modelo de avião em miniatura, modelo de conduta ética profissional etc.). Além do mais, as abordagens históricas e as definições inadequadas do termo “modelo” nos livros didáticos fazem com que os estudantes, por exemplo, aceitem o modelo atômico como uma representação real (isto é, como se fosse uma fotografia da estrutura atômica), em vez de compreendê-lo como uma construção científica e social sujeita a alterações, evidenciando o caráter dinâmico da NdC (Melo; Neto, 2013).

A concepção de senso comum de modelo científico como algo concreto e uma cópia fiel da realidade é reforçada pela “*visão empírico-indutivista e a-teórica*” conforme apontado por Cachapuz *et al.* (2005), pois essa concepção está implicitamente interligada à noção empirista ingênua de “descoberta científica”, no sentido de algo cuja presença na natureza foi revelada, muitas vezes descrita como uma observação experimental afortunada ou uma revelação quase divina a um cientista predestinado (e.g., o *Eureka*, de Arquimedes).

É importante realçar que a ideia de “descoberta científica” transmite implicitamente a inadequada noção epistemológica de “verdade absoluta”. Isso ocorre porque, uma vez “revelada” a existência de algo, acredita-se que esse algo deve se tornar imutável e definitivo. Portanto, se algo foi “descoberto”, considera-se que esse algo não pode deixar de existir.

Evidentemente, essas concepções inadequadas não condizem e nem refletem a natureza do processo de construção do conhecimento científico.

Na próxima seção, exploraremos os principais resultados das pesquisas empíricas quanto ao uso de diferentes abordagens didáticas para o ensino de aspectos da NdC.

1.4 COMO ENSINAR SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA?

1.4.1 Abordagem contextual, explícita e reflexiva

No que concerne aos tipos de abordagens e estratégias didáticas adotadas para o ensino sobre a NdC, a literatura em ensino ciências tem valorizado a importância da incorporação da História da Ciência, seja por meio de narrativas breves, (micro)episódios históricos específicos, estudos de caso, ou outros recursos. Além disso, destaca-se a análise de controvérsias científicas (históricas ou contemporâneas), do ensino por investigação, entre outras técnicas, enquanto recurso didático-metodológico para promover discussões e reflexões sobre os aspectos da NdC em sala de aula (Matthews, 1994; Lederman, 2007; Martins, 2015).

Na análise das dimensões pertinentes à integração dos temas abordados pela NdC nos currículos escolares e nos cursos de formação de professores de disciplinas científicas, Martins (2015) enfatiza que o estudo de episódios históricos (com uso de textos de fontes primárias e/ou secundárias) tem desempenhado um papel crucial no entendimento das questões relacionadas à NdC. Matthews (1994), argumenta que, dadas as diversas limitações no contexto educacional, os estudantes deveriam adquirir algum conhecimento, pelo menos, sobre os marcos significativos no avanço da ciência, como a revolução copernicana, o desenvolvimento da ciência experimental e da matemática vinculada a Newton e Galileo, a Teoria da Evolução proposta por Charles Darwin e as teorias da relatividade formuladas por Albert Einstein.

A organização didática fundada em uma perspectiva histórica do desenvolvimento científico, especialmente ao abordar controvérsias científicas, oferece uma rica oportunidade de ilustrar e contextualizar debates sobre diversos aspectos relacionados à NdC, explorando questões epistemológicas essenciais, como a gênese do conhecimento científico, os métodos, procedimentos e processos de coleta e análise dados, sua diversidade e limitações, assim como

a própria natureza do conhecimento científicos; além das influências histórico-sociais na pesquisa científica (Matthews, 1994, Lederman, 2007; Martins, 2015).

De um modo geral, as pesquisas que avaliam a eficácia de currículos e/ou materiais instrucionais direcionados para o desenvolvimento de uma compreensão mais precisa e bem informadas sobre NdC indicam duas formas de abordagem principais para tratar os aspectos da NdC nas aulas de disciplinas científicas: implícita ou explícita.

Na abordagem implícita, busca-se desenvolver a compreensão da NdC por meio da prática científica, oferecendo elementos subentendidos e subliminares sobre o processo de construção do conhecimento científico. Os estudantes aprendem sobre a NdC como resultado de sua participação em atividades de aprendizagem orientadas sob a forma de investigação científica, mesmo sem uma referência direta a aspectos específicos da NdC. Adota-se como premissa que o aprendizado sobre a NdC se desenvolve a partir da prática experimental do fazer ciência (Abd-El-Khalick; Lederman, 2000).

No entanto, os estudiosos apontam para uma ineficácia da abordagem implícita no ensino da NdC tanto nas aulas de ciências da Educação Básica quanto nos cursos de formação de professores, em níveis de Graduação e Pós-graduação. Isso ocorre porque equivocadamente se presume que apenas os esforços direcionados para desenvolver e implementar tais currículos e/ou disponibilizar os materiais instrucionais seriam suficientes para proporcionar uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC, sem considerar adequadamente o papel fundamental do professor como uma variável significativa. A implicação dessa suposição inicial é a falsa hipótese de que os professores poderiam facilitar uma compreensão mais bem informada da NdC aos seus estudantes, mesmo que eles próprios não possuíssem tal conhecimento epistemológico aprofundado. Na abordagem implícita, pressupõe-se que a simples exposição dos estudantes a currículos e/ou materiais instrucionais com ênfase na NdC seria suficiente para alcançar os objetivos pré-estabelecidos (Lederman, 1992, 2007).

Atualmente, reconhece-se as íntimas relações e conexões entre as concepções epistemológicas dos professores, suas práticas pedagógicas e as concepções sobre a NdC de seus estudantes. Além disso, admite-se que um determinado currículo ou material instrucional pode ser adequado e eficaz para um grupo de professores e estudantes, mas não para outros, e tendo sido controlada a variável habilidade dos estudantes, então, a profundidade do conhecimento epistemológico dos professores sobre a NdC e sua correspondente didática no ensino de ciências se constitui em um fator significativo no processo de ensino e de aprendizagem (Lederman, 1992, 2007).

Por outro lado, na abordagem explícita, os aspectos da NdC são apresentados de forma clara desde o início da atividade, seguidos por estímulos à argumentação, discussão e reflexão. Defensores dessa abordagem argumentam que o desenvolvimento de concepções epistemológicas é mais eficaz quando os aspectos da NdC são diretamente abordados por meio de análises, discussões e reflexões, abertas e em caráter coletivo. Contudo, ressalta-se que a argumentação deve estar fundamentada em informações extraídas de textos históricos, sejam fontes primárias ou secundárias, ou em textos específicos que exploram os aspectos da NdC. Acredita-se, portanto, que a aprendizagem epistemológica sobre a NdC se consolida por meio de leituras e debates explícitos sobre o assunto (Abd-El-Khalick; Lederman, 2000).

De modo geral, há um aparente consenso na literatura de pesquisa empírica em ensino de ciências de que uma abordagem explícita é mais eficaz do que uma abordagem implícita para promover a compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC (Lederman, 2007; Hodson, 2014). Abd-El-Khalick e Lederman (2000), em sua revisão crítica da literatura, constataram que todos os estudos analisados que optaram por uma abordagem explícita registraram ganhos significativos na melhoria das concepções dos professores sobre a NdC, enquanto apenas metade dos estudos que adotaram uma abordagem implícita alcançaram o mesmo objetivo.

Assim, a partir da análise e discussão até aqui empreendida, percebe-se dois pontos importantes em relação aos resultados das pesquisas empíricas em ensino de ciências com vistas a oferecer uma resposta à pergunta: “*Como ensinar sobre a NdC?*”. Em primeiro lugar, entre as iniciativas que alcançaram algum êxito na promoção de uma melhor compreensão acerca da NdC entre professores e estudantes, prevaleceu aquelas que defendiam a adoção de uma abordagem explícita em contraposição à abordagem implícita. Em segundo lugar, essas propostas eficazes incorporaram no processo de ensino e de aprendizagem, ou seja, no contexto do conteúdo e das atividades tradicionais em sala de aula, a análise e discussão de episódios da história da ciência, preferencialmente aqueles envolvendo controvérsias científicas relevantes para o avanço da ciência (Abd-El-Khalick; Lederman, 2000; Lederman, 2007; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

Doravante, neste estudo, adotamos o termo “*abordagem contextual explícita sobre a NdC*” para designar uma abordagem instrucional com essas características. A literatura brasileira em ensino de ciências registra algumas pesquisas empíricas conduzidas no ensino superior, especificamente em cursos de formação de professores de disciplinas científicas, que adotam essa escolha desse tipo de abordagem de ensino. Sem pretender ser exaustivos, destacamos quatro trabalhos que dialogam com nossa proposta de pesquisa.

Gatti (2005) explorou a integração da História da Ciência especificamente na disciplina de Prática de Ensino de Física, em um curso de formação de professores de Física. Objetivo da autora foi fomentar discussões sobre concepções alternativas e o desenvolvimento histórico do tema atração gravitacional, além de leituras e debates de textos contemplando discussões recentes sobre o ensino de Ciências, de modo a gerar insatisfações com o modelo tradicional de ensino. Além disso, buscou estimular os estudantes a desenvolverem propostas inovadoras de ensino, baseadas nas discussões em sala de aula e na utilização de elementos da História da Ciência e das concepções alternativas dos estudantes. A análise das propostas de minicursos elaboradas pelos estudantes, juntamente com a comparação entre suas concepções iniciais e finais, permitiu evidenciar a relação entre o desenvolvimento conceitual e a elaboração de propostas de ensino mais alinhadas às discussões do curso. Dos onze participantes, quatro adotaram uma abordagem mais construtivista no ensino, embora ainda mantivessem algumas resistências à adoção de metodologias inovadoras.

Teixeira, Freire Jr e El-Hani (2009) desenvolveram uma pesquisa qualitativa sobre as modificações das concepções sobre a NdC de estudantes de um curso de graduação em Física de uma universidade pública no sudeste brasileiro, a partir da organização e implementação da disciplina de Fundamentos de Física I com base nos pressupostos de uma abordagem contextual explícita de aspectos sobre a NdC. Os resultados indicaram uma alteração expressiva e positiva nas concepções epistemológicas dos estudantes em diversos aspectos da NdC, embora certas ideias profundamente arraigadas se mantiveram predominantes ao término da disciplina, como a crença no mito do “método científico” e indícios de uma “visão empírico-indutivista e a-teórica” do trabalho científico.

Cordeiro e Peduzzi (2011) examinam a construção, implementação e avaliação de uma unidade de ensino potencialmente significativa de seis encontros, direcionada a grupo de quatro pesquisadores em educação científica e tecnológica, fundamentada em uma abordagem contextual de elementos da NdC e do processo científico que podem ser explorados por meio do episódio histórico intitulado “Fissão nuclear e valores: possibilidades para educação científica”, que trata do desenvolvimento da radioatividade durante o período de 1899 a 1913, com vistas a promover discussões e reflexões sobre o papel dos juízos de valor na ciência. Os autores apontam que foi possível notar, por meio da análise dos mapas conceituais, a apreensão de detalhes profundos das diferentes teses filosóficas discutidas, sinalizando indícios da ocorrência de aprendizagem significativa.

Oliveira (2019) desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de investigar as potencialidades e limitações de abordar contextualmente e explicitamente temas e questões

sobre NdC em um curso de formação de professores de Física de uma universidade pública do nordeste brasileiro, valendo-se de narrativas históricas (construída pela autora), tomando como base os debates sobre a natureza da luz no início do século XIX. Para coletar os dados, foram utilizados questionários, entrevistas, gravações em áudio das discussões em sala e anotações de campo da professora-pesquisadora. A análise indicou que a narrativa histórica contribuiu para explorar e problematizar vários temas e questões da NdC, com a maioria dos estudantes, ao término da intervenção didática, apresentando compreensão epistemológica mais precisa e bem informada sobre a NdC. A autora destaca que a leitura prévia da narrativa histórica por parte dos estudantes, o engajamento e participação deles nas discussões e reflexões realizadas em sala foram fatores preponderantes para a melhoria na compreensão que eles tiveram acerca dos temas de NdC.

De maneira semelhante, esses estudos sinalizam que a integração e contextualização efetiva de episódios históricos no ensino de ciências, para abordar aspectos da NdC, não é uma tarefa simples e requer, entre outros fatores, orientações da historiografia moderna da ciência. Em outras palavras, um fator essencial para a organização didático-pedagógica e implementação de uma abordagem contextual explícita sobre a NdC diz respeito à disponibilidade de materiais instrucionais de natureza histórica, em linguagem acessível e sem erros grosseiros, com informações relevantes e fecundas para promoção de discussões e reflexões sobre aspectos da NdC. Com efeito, a carência de materiais instrucionais adequados é apontada na literatura como uma das causas principais para persistente transmissão de imagens estereotipadas e distorcidas sobre o trabalho científico que, muitas vezes, são reforçadas diretamente (ou por omissão) nas aulas de disciplinas científicas (Lederman, 1992; Cachapuz *et al.*, 2005).

Forato, Pietrocola e Martins (2011) destacam que todas as narrativas históricas refletem, de forma implícita ou explícita, os valores, crenças e as preferências teórico-metodológicas dos autores. O relato histórico da formulação e do desenvolvimento de um conceito científico ou de uma disputa entre teorias concorrentes transmite concepções sobre a NdC e sobre os procedimentos envolvidos em sua construção. Nesse sentido, alertam os autores, que aqueles se aventuram a estudar e a escrever sobre a história da ciência, devem respeitar ao máximo as particularidades do contexto histórico, social e cultural, sem cometer o erro gravíssimo de analisar e interpretar os fatos históricos anacronicamente, isto é, aplicando valores, ideias e crenças de outras épocas, ou utilizando normas e padrões contemporâneos.

Além das orientações da historiografia moderna da ciência para a construção de narrativas históricas com base em estudos de episódios históricos, a incorporação dessas

narrativas no ensino de ciências depende, em grande medida, do papel mediador dos professores.

Boss *et al.* (2016), com base em suas experiências com uso de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores, enquanto recurso didático nas disciplinas de Física Geral e de História da Física, apresentam algumas considerações sobre as dificuldades de leitura e entendimento relatadas pelos estudantes. Os autores observaram que, muitas vezes, os estudantes só conseguiram compreender certos aspectos dos textos históricos com a mediação dos professores-pesquisadores em sala de aula, concluindo que é necessário ter cautela na seleção dos textos e, não raramente, encontrar maneiras de tornar esse tipo de material inteligível para os indivíduos envolvidos no processo educacional. Em relação às dificuldades de leitura, os autores destacaram: (i) vocabulário desconhecido; (ii) falta de comparações com termos conhecidos; (iii) parágrafos extensos; (iv) ausência de ilustrações sobre os experimentos descritos. Nesse sentido, o uso de figuras, glossários e notas explicativas, além de breve biografia do autor, linha do tempo e informações introdutórias, foram sugeridos pelos estudantes como elementos que poderiam ser inseridos pelos professores no texto original para facilitar a leitura e o entendimento.

Silva e Guerra (2015), em seu livro *História da ciência e ensino: fontes primárias e propostas para sala de aula*, abordam a promoção da educação científica de qualidade por meio da perspectiva histórica-filosófica da ciência no ensino de ciências. O livro apresenta traduções de textos históricos originais relacionados à eletricidade, magnetismo e termodinâmica, permitindo que os professores desenvolvam suas próprias abordagens com um viés histórico-filosófico. Além disso, oferece sequências didáticas para a implementação de práticas pedagógicas que visam introduzir a História da Ciência na sala de aula por meio de diferentes abordagens, como experimentação, narrativas históricas, uso de materiais complementares, conexões entre ciência e arte, interdisciplinaridade e análise das relações entre ciência, tecnologia e sociedade. O objetivo é não apenas abordar os conteúdos científicos, mas também promover discussões sobre a Natureza da Ciência e a complexidade do conhecimento científico

Portanto, embora não seja esperado que os professores de ciências se transformem em historiadores da ciência, é essencial que eles desenvolvam certas habilidades para incorporar narrativas históricas no ensino sem promover concepções distorcidas e estereotipadas da NdC entre seus estudantes. Nesse sentido, argumenta-se que os professores devem estar familiarizados com alguns princípios fundamentais da historiografia moderna, o que pode facilitar a integração e a contextualização da HFSC no ensino de ciências.

Evidentemente, a integração e a contextualização histórica ocorrem de maneira específica com a seleção do conteúdo conceitual a ser abordado. Para este trabalho, isso será feito com base nas informações referentes à história da construção do conhecimento científico sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, no período de 1887 a 1927 (cf. Capítulo 2).

Neste estudo, adota-se a perspectiva de que a seleção do tema curricular “o efeito fotoelétrico” é fecunda para uma análise empírica das abordagens contextuais e explícitas em relação à NdC, devido às constantes e rápidas mudanças teóricas ocorridas no início do século XX. Isso o torna especialmente adequado para facilitar momentos de argumentação, discussão, reflexão e exemplificação da interação dinâmica entre dados experimentais e conceitos teóricos. Além disso, essa escolha é reforçada pela sua posição como um dos primeiros temas abordados nos currículos da disciplina de Física Quântica (ou Física Moderna e Contemporânea).

Finalmente, é importante destacar que a organização sequencial, o desenvolvimento, a seleção de materiais, bem como o planejamento eficaz das atividades para serem realizadas ao longo de uma disciplina, requerem a escolha adequada de um referencial teórico de ensino e de aprendizagem. Para este propósito, adotamos os fundamentos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), proposta por Ausubel (2003). Essa escolha se justifica não apenas pela familiaridade e experiência dos autores com esse referencial em estudos anteriores¹¹, mas também pela coerência entre os objetivos de aprendizagem – relacionados aos diferentes aspectos da NdC – e os princípios ausubelianos.

Na subseção a seguir, será apresentada uma visão geral dos conceitos e princípios fundamentais da TAS. Posteriormente, no Capítulo 3 (A Pesquisa Empírica), retomaremos o tema, abordando suas implicações na organização da disciplina de História da Ciência 2023-1.

1.4.2 A Teoria da Aprendizagem Significativa - TAS

A TAS fornece uma explicação teórica sobre o processo de aprendizagem fundamentada em uma perspectiva cognitivista. Como tal, ela se baseia fundamentalmente na premissa de que cada indivíduo possui uma “estrutura cognitiva” hierarquicamente organizada na sua mente. De acordo com Ausubel (2003), a aprendizagem significativa resulta de um processo cognitivo psicológico que provoca modificações nessa estrutura cognitiva pré-existente. Esse processo

¹¹ cf. Silva e Errobidart (2015); Suttini, Errobidart e Caluzi (2021).

envolve, por um lado, a interação significativa entre novas ideias logicamente conectadas e conhecimentos específicos já estabelecidos na estrutura cognitiva do indivíduo; por outro, um mecanismo mental que organiza e estrutura o conhecimento, permitindo sua aquisição e a retenção a longo prazo.

1.4.2.1 Conceitos Fundamentais

Ausubel (2003) define a “*estrutura cognitiva*” como o conjunto total de ideias, conceitos e proposições previamente armazenados e organizados hierarquicamente na mente de um indivíduo, referentes a área específica do conhecimento. Essas ideias, as quais são resultados naturais de experiências e vivências anteriores, apresentam certos graus de clareza (bem compreendidas e precisas), diferenciação (distintas de outros conceitos) e estabilidade (integradas por longos períodos de tempo). Dessa forma, cada ser humano possui uma estrutura cognitiva única, particular e idiossincrática, cujas ideias pré-existentes têm significados próprios, resultantes de experiências passadas.

Segundo Ausubel (2003), a estrutura cognitiva de um indivíduo tem uma tendência à organização conceitual organizada hierarquicamente em uma rede de conexões, cuja representação esquemática é análoga a uma pirâmide. No cume da pirâmide, encontram-se os elementos mais gerais, mais inclusivos, mais abstratos e mais abrangentes, que se conectam progressivamente a elementos menos inclusivos, mais diferenciados e mais específicos, que ocupam os níveis imediatamente inferiores.

Quando alguns elementos específicos da estrutura cognitiva do indivíduo são conscientemente ativados pela memória para integrar significados com novas informações ou novos conceitos, funcionando como pontos de ancoragem para essas novas ideias, esses elementos são denominados “*conceitos subsunçores*” ou, simplesmente, “*subsunçores*”¹². Nessa perspectiva de processo de aprendizagem, a nova informação é incorporada ou

¹² Não se deve confundir “conhecimentos prévios” com “subsunçores”. Por exemplo, um estudante possui em sua estrutura cognitiva inúmeros conhecimentos sobre física adquiridos ao longo de seus anos de estudo. No entanto, para aprender significativamente o conceito de “*quantum* de luz” ou de “função trabalho” de um metal no estudo do efeito fotoelétrico, são relevantes apenas os significados atribuídos aos conceitos de onda-eletromagnética, estrutura atômica, força de atração eletrostática, lei de conservação da energia e quantização. Em outras palavras, esses seriam os “subsunçores”, com elevado grau de clareza, estabilidade e diferenciação, necessários para a ancoragem dos novos conceitos na estrutura cognitiva.

subsumida à estrutura cognitiva de forma substantiva¹³ e não arbitrária¹⁴. Moreira (2014, p. 152), enfatizando o papel crucial desempenhado pelos subsunçores, afirma que, para Ausubel, “o fator isolado que mais influencia a aprendizagem [significativa] é aquilo que o aluno já sabe (cabe ao professor identificar isso e ensinar de acordo)”.

Portanto, qualquer ideia pré-existente na estrutura cognitiva tem o potencial para se tornar um subsunçor para algum novo conhecimento. E, para cada nova ideia incorporada ou subsumida à estrutura cognitiva, há uma ideia pré-existente específica e relevante que atua como seu subsunçor. Isso implica que, qualquer nova ideia é potencialmente subsumível pela estrutura cognitiva, desde que possa ser relacionada de maneira substantiva e não literal a subsunçores adequados.

Quando efetivamente ocorre a aprendizagem significativa, não apenas nova informação adquire significados e sentidos para os estudantes, mas, ao mesmo tempo, o próprio subsunçor original é enriquecido, tornando-se mais diferenciado, elaborado e estável. Assim, o subsunçor original é modificado pelo processo de aprendizagem significativa, tornando-se mais inclusivo e apto a servir como ponto de ancoragem para outras novas informações relacionadas à sua área de conhecimento. Essas características conferem à estrutura cognitiva um caráter idiossincrático e dinâmico (Ausubel, 2003).

1.4.2.2 Aprendizagem Significativa *versus* Aprendizagem Mecânica

Ausubel (2003) faz a distinção fundamental entre experiências cognitivas de “aprendizagem significativa” e “aprendizagem mecânica”, ressaltando a diferença entre os dois processos que explicam, em grande parte, a superioridade da primeira no que diz respeito à aquisição, retenção e aplicação do conhecimento.

A “aprendizagem significativa” caracteriza-se pela aquisição e retenção duradora de conhecimentos, ocorrendo quando novas informações se integram aos subsunçores específicos pré-existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Esse processo implica em uma atribuição de significados próprios aos novos conteúdos e sua incorporação/assimilação à estrutura

¹³ “Substantiva” refere-se a um aprendizado não literal, ou seja, não somente ao pé da letra, mas que vai além da simples memorização.

¹⁴ “Não arbitrária” significa que a interação não ocorre com qualquer ideia prévia, mas sim com aquela que apresenta algum conhecimento pré-existente especificamente relevante da estrutura cognitiva do aprendiz, ou seja, com o subsunçor.

cognitiva de forma substantiva (não literal) e não arbitrária, além de promover maior clareza, diferenciação, estabilidade e inclusividade dos subsunçores ativados.

Nessa condição de incorporação substantiva e não literal de novos conhecimentos na estrutura cognitiva, o entendimento dos estudantes se amplia, possibilitando a realização mais eficaz de tarefas como interpretar (clarificando, parafraseando, representando, traduzindo), exemplificar (ilustrando, esclarecendo), classificar (categorizando, subsumindo), sumarizar (abstraindo, generalizando), inferir (concluindo, extrapolando, interpolando, prevendo), comparar (contrastando, mapeando) e explicar (construindo modelos). Ausubel (2003) observa ainda que a aprendizagem significativa facilita a transferência e aplicação dos significados atribuídos a novos conhecimentos na solução de questões e problemas não familiares, os quais requerem uma reorganização contínua e adaptativa da estrutura cognitiva.

Em contraste, a “aprendizagem mecânica” ocorre quando as novas informações se relacionam com a estrutura cognitiva de maneira literal e arbitrária, sem que os estudantes construam e atribuam significados próprios a essas informações ou reorganizem suas estruturas cognitivas. Assim, a “aprendizagem mecânica” envolve apenas uma associação superficial, sem uma construção de significados profundos. Nesse tipo de aprendizagem, os estudantes apenas realizam tarefas de aprendizagem relativamente simples, como a memorização de informações isoladas (nomes, datas, fórmulas etc.), que são geralmente retidas apenas por curtos períodos de tempo e facilmente esquecidas (Ausubel, 2003; Moreira, 2011, 2014).

Ausubel (2003), contudo, ressalta que a aprendizagem significativa e a mecânica não são processos completamente antagônicos, mas partes de um contínuo. Em certas situações extremas, nas quais são observadas a ausência de subsunçores, como no caso da apresentação de uma temática considerada totalmente desconhecida, pode ser necessário que alguns elementos de conhecimento sejam introduzidos de forma mecânica e repetitiva até que se integrem à estrutura cognitiva e possam, posteriormente, cumprir minimamente a função de subsunçores, servindo de pontos de ancoragens para novas informações. Dessa forma, à medida que as experiências de aprendizagem se tornam mais significativas, esses subsunçores tendem a se tornar cada vez mais elaborados, diferenciados, estáveis e mais inclusivos, fortalecendo sua capacidade de ancorar informações durante o processo de assimilação de novos conceitos.

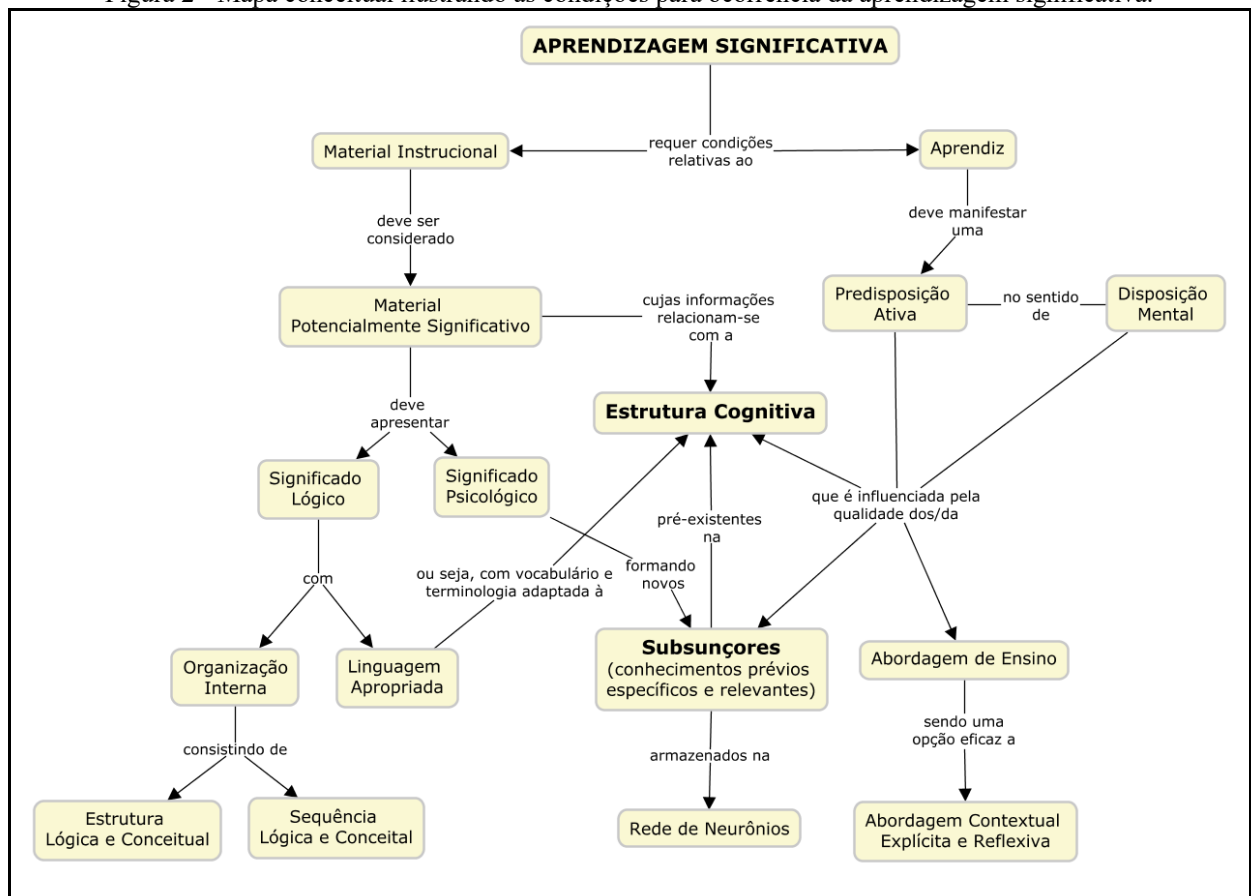
1.4.2.3 Condições para a ocorrência da aprendizagem significativa

De acordo com Ausubel (2003), o conceito de aprendizagem significativa envolve, em última instância, a construção e aquisição de significados próprios a partir da interação entre o material de estudo e o conhecimento pré-existente dos estudantes. Para que esse tipo de aprendizagem ocorra, duas condições são fundamentais: (1) um mecanismo mental de aprendizagem significativa. Ou seja, os estudantes devem apresentar uma *predisposição ativa* (no sentido de interesse e comprometimento emocional) para integrar o novo conhecimento de maneira substantiva e não literal ao conhecimento pré-existente em sua estrutura cognitiva; e (2) a apresentação de um material instrucional *potencialmente significativo*. Essa segunda condição subdivide-se em dois aspectos essenciais: i) o material instrucional deve possuir um significado lógico, apresentando uma estrutura organizada e sequencial (não consistindo apenas em um arranjo aleatório de conteúdos), com coerência lógica e conceitual que permita relacioná-lo, de forma não literal e não arbitrária a qualquer estrutura cognitiva apropriada e relevante; e ii) os estudantes devem possuir ideias específicas e relevantes em sua estrutura cognitiva (subsunçores), de forma clara, estável e bem definida, com as quais o novo material possa se relacionar e estabelecer pontos de ancoragem.

Ausubel (2003) também destaca a distinção entre “aprendizagem significativa” e “aprendizagem de material potencialmente significativo”. Mesmo que o conteúdo apresentado seja potencialmente significativo, ele só se tornará efetivamente significativo se houver, por parte dos estudantes, um mecanismo mental de aprendizagem significativa (conforme a condição 1). Caso contrário, o conteúdo do material instrucional, por mais logicamente compreensível que seja, poderá ser apenas memorizado mecanicamente, sem uma compreensão genuína e profunda. Se o aluno optar por memorizar os conteúdos de forma literal (“ao pé da letra”) e arbitrária, o resultado será, provavelmente, a mera reprodução das informações sem a construção de significados próprios. Além disso, independentemente da estrutura cognitiva do aluno e sua pré-disposição ativa, uma abordagem de ensino pode falhar em promover a aprendizagem significativa se todas as tarefas propostas exigirem apenas memorização, sem estimular a construção de significados próprios de novos conhecimentos.

Essas ideias estão sintetizadas no mapa conceitual ilustrado na Figura 2, elaborado segundo os princípios propostos por Joseph D. Novak (1932–2023), um dos principais divulgadores da teoria de Ausubel e reconhecido mundialmente pelo desenvolvimento da teoria dos mapas conceituais na década de 1970.

Figura 2 - Mapa conceitual ilustrando as condições para ocorrência da aprendizagem significativa.



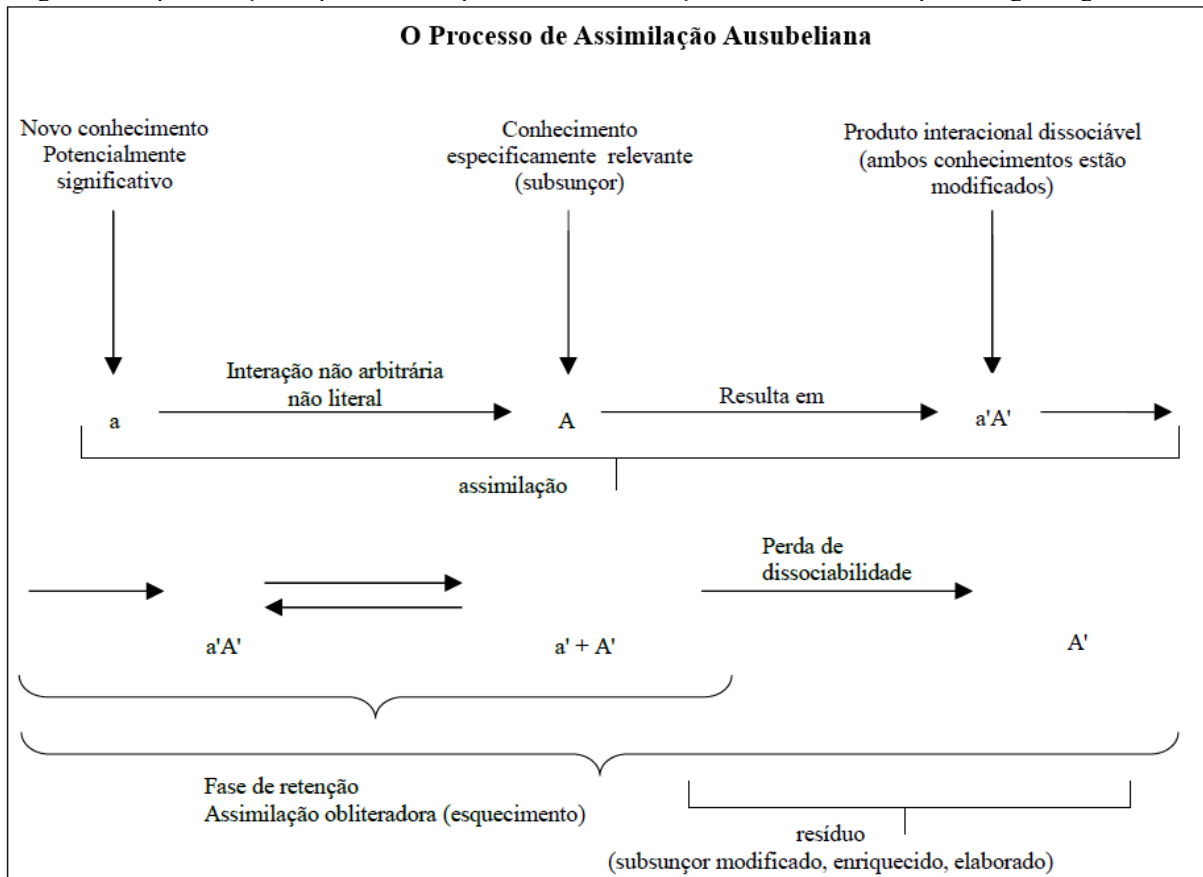
1.4.2.4 O Processo de Assimilação Ausubeliana

Para compreender melhor o processo de aquisição e organização de significados na estrutura cognitiva, Ausubel (2003) propôs a “Teoria da Assimilação”. Essa teoria possui valor explicativo tanto para a aprendizagem quanto para a retenção significativas de novos conhecimentos, descrevendo como novos conceitos são integrados e organizados na estrutura cognitiva. A “Teoria da Assimilação” pode ser representada esquematicamente conforme ilustrado na Figura 3.

Partindo do pressuposto de que há uma predisposição genuína do aprendiz em aprender significativamente e de que o material apresentado atende às duas condições essenciais para caracterizá-lo como “potencialmente significativo” – (i) significado lógico e (ii) disponibilidade de subsunçores na estrutura cognitiva dos estudantes –, o processo de assimilação, segundo a teoria ausubeliana da aprendizagem significativa, ocorre quando um novo conceito [mais específico, menos inclusivo] (a) interage de forma não arbitrária e não literal com o conceito

subsunçor (**A**) [mais geral, mais inclusivo e mais estável] pré-existente na estrutura cognitiva particular dos estudantes. Como principal produto dessa interação, não apenas o novo conceito (**a**), mas também o conceito subsunçor original (**A**), são modificados, resultando em uma nova entidade conceitual (**a'A'**), que representa o conceito subsunçor modificado, agora enriquecido pelos significados atribuídos às novas ideias introduzidas pelo material de instrução (Ausubel, 2003; Moreira, 2011).

Figura 3 - Representação esquemática do processo de assimilação ausubeliana e de aprendizagem significativa.



Fonte: Moreira (2011, p. 158).

Ausubel (2003) sugere que esse processo de assimilação pode desempenhar um papel importante na fase de retenção de novas informações, admitindo que, por algum tempo, a nova entidade conceitual (**a'A'**) possa ser dissociável em suas entidades individuais **a' + A'**. Entretanto, conforme indicado no esquema da Figura 3, o esquecimento natural e inevitável pode ser interpretado como uma extensão sequencial da aprendizagem significativa – fase denominada “assimilação obliteradora” –, deixando, contudo, um resquício: o subsunçor modificado (**A'**). Nessa fase, embora as novas ideias possam ser parcialmente esquecidas, seus traços permanecem integrados ao subsunçor modificado (**A'**), preservando partes dos significados atribuídos ao conhecimento original e facilitando o processo de reaprendizagem.

1.4.2.5 Os Princípios da *Diferenciação Progressiva* e da *Reconciliação Integrativa*

A essência e as circunstâncias da aprendizagem significativa requerem que a organização de uma abordagem de ensino leve em consideração os princípios da *diferenciação progressiva* e da *reconciliação integrativa* presentes dos materiais potencialmente significativos. Essa abordagem também deve influenciar a forma como os estudantes aprendem, retêm e organizam o novo conhecimento em sua estrutura cognitiva.

Segundo Ausubel (2003), o princípio organizacional da *diferenciação progressiva* reconhece que a maioria das aprendizagens, bem como a retenção e a organização dos conteúdos, possui natureza hierárquica, começando por regiões superiores e avançando para as inferiores quanto aos níveis de abstração, generalidade e inclusão. Cada nível está ligado ao imediatamente superior na hierarquia por meio de um processo de subsunção.

Do ponto de vista da Teoria da Assimilação ausubeliana, a *diferenciação progressiva* refere-se ao processo de construção de novos significados a partir de um subsunçor específico, por meio de sucessivas exposições a materiais potencialmente significativos. Isso ocorre por meio da utilização repetida de conceitos em diferentes situações não familiares. Dessa forma, por meio de interações contínuas com as novas informações, o subsunçor vai progressivamente adquirindo novos significados, tornando-se mais enriquecido, refinado e diferenciado, além de mais apto a servir como ponto de ancoragem para novas aprendizagens significativas.

No entanto, não basta apenas refinar e diferenciar gradualmente um determinado conceito reutilizando-o em vários contextos possíveis com novos materiais potencialmente significativos. É essencial, simultaneamente, enfatizar de maneira explícita as semelhanças e diferenças confusas entre as novas ideias e os subsunçores. De acordo com Ausubel (2003) [1963], essa tarefa didática representa a essência do princípio denominado *reconciliação integrativa* ou *reconciliação integradora* da estrutura cognitiva. Sua aplicação adequada visa eliminar os significados conflituosos e inconsistentes entre as novas ideias e os subsunçores, os quais dificultam a integração entre ideias semelhantes que sejam logicamente relacionais.

Ausubel (2003) aponta quatro consequências negativas de uma abordagem segmentada no ensino de conceitos científicos, caracterizada por negligenciar a importância da aplicação do princípio da *reconciliação integrativa*, a saber: (i) o uso de múltiplos termos diferentes para conceitos essencialmente idênticos causa confusão e incentiva a aprendizagem por memorização, em vez da significativa; (ii) criam-se divisões artificiais entre tópicos interligados, obscurecendo aspectos importantes e dificultando a aquisição de discernimentos

sobre tais aspectos; (iii) a falta de integração com conhecimentos específicos e relevantes dificulta a assimilação de novas informações, que poderiam ser melhor compreendidas; e (iv) a ausência de distinção clara entre conceitos aparentemente semelhantes leva a percepções equivocadas de que esses conceitos são idênticos.

1.4.2.6 Aprendizagem Significativa e Abordagem Contextual Explícita

Em nosso estudo, assumimos que uma abordagem contextual explícita sobre diferentes temas e questões da NdC é essencial para a aprendizagem significativa de conceitos metacientíficos (e.g., “neutralidade científica”, “modelos”, “leis”, “teorias”, “metodologia científica”, “paradigmas científicos”, entre outros) e, portanto, para a construção de uma imagem mais bem informada e precisa sobre as práticas científicas.

Indo um pouco mais além, argumentamos que a TAS oferece uma base teórica consistente para explicar por que estudos com os Lederman (2007) e Hodson (2014) sugerem que abordagens explícitas tendem a ser mais eficazes do que abordagens implícitas na promoção de uma compreensão mais bem informada sobre a NdC. Em primeiro lugar, os momentos de discussão, argumentação e reflexão são oportunidades cruciais para que os estudantes construam significados em relação aos conceitos principais, compreendam suas relações lógicas, expressem seus entendimentos e compartilhem suas ideias. Esses momentos podem propiciar o confronto de diferentes pontos de vista e a clarificação de dúvidas e significados confusos ou incorretos.

Em segundo lugar, os momentos de argumentação e reflexão contribui para que os estudantes analisem o novo conteúdo, questionem-se e, assim, associem-no de forma substantiva e não literal ao seu conhecimento prévio sobre aspectos epistemológicos e sociológicos da atividade científica. Dessa forma, a argumentação e a reflexão explícita promovem a reorganização da estrutura cognitiva, visando à incorporação e integração do novo conhecimento de maneira profunda e duradoura.

Em terceiro lugar, uma abordagem contextual explícita estimula os estudantes a refletirem sobre seu próprio processo de aprendizagem, incentivando a metacognição. Isso os torna mais conscientes de suas estratégias de aprendizado e das conexões que estão estabelecendo, o que pode aumentar a predisposição ativa do estudante para aprender de forma

significativa e a probabilidade de que o novo conhecimento seja integrado de forma substancial e não literal.

No entanto, nesse contexto de discussão sobre a aprendizagem significativa de conceitos metacientíficos, preocupa-nos o fato de que tanto os professores de disciplinas científicas quanto os estudantes frequentemente manifestam concepções distorcidas e estereotipadas sobre as práticas científicas, conforme aponta a vasta literatura (Lederman, 2007). Isso sugere que, em nosso planejamento de pesquisa empírica deve estar prevista a elevada possibilidade de encontrar concepções ou ideias prévias conceitualmente incorretas pré-existentes na estrutura cognitiva dos estudantes, ainda que com qualidades de clareza, diferenciação e estabilidade. Essa situação pode ser problemática, pois o processo de assimilação ausubeliana pode gerar dúvidas e dificuldades de entendimento, acarretando uma sobrecarga de esforço consciente para a diferenciação e reorganização da estrutura cognitiva. Por isso, ao longo da disciplina, será fundamental a revisão dos conceitos prévios imprecisos, distorcidos ou alternativos, por meio de abordagens explícitas e reflexivas, permitindo que os estudantes confrontem e reorganizem suas ideias, substituindo concepções distorcidas por conceitos mais adequados, capazes de atuar como subsunçores para conhecimentos.

Por fim, é importante destacar que consideramos fundamental a organização lógica e sequencial da disciplina de História da Ciência 2023-1, a fim de torná-la potencialmente significativa. Essa organização deve incorporar os princípios da *diferenciação progressiva* e *reconciliação integrativa*. Além disso, é essencial a seleção de materiais instrucionais que não apenas contenham conteúdo histórico e científico relevante, mas também estejam em linguagem acessível e adequada para estudantes universitários. Ademais, textos que estimulem a reflexão crítica e a discussão podem favorecer a construção de significados mais profundos sobre a NdC, contribuindo para uma compreensão mais precisa e mais bem informada. Esses aspectos organizacionais serão discutidos em mais detalhes no Capítulo 3 (Subseção 3.1.3: A Disciplina de História da Ciência 2023-1).

2 A PESQUISA HISTORIOGRÁFICA

A etapa inicial deste estudo é delineada como uma pesquisa qualitativa, sem intervenção direta, do tipo análise documental, fundamentada na historiografia moderna das ciências. Trata-se de uma investigação com um recorte histórico específico, configurando-se como um “estudo de caso”, que busca informações consideradas essenciais em documentos classificados como fontes primárias ou secundárias, como as contidas em livros, artigos científicos, entre outros (Rosa, 2013).

Nessa fase, o objetivo principal foi responder à seguinte questão de pesquisa: “Como se deu a gênese e o desenvolvimento do conhecimento científico sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no período entre 1887 e 1927?”

Além disso, enquanto objetivo secundário, essa pesquisa historiográfica procurou realizar análises críticas, discussões e reflexões quanto à forma e ao conteúdo das narrativas históricas em livros didáticos e textos acadêmicos a respeito do processo de construção do conhecimento científico acerca do fenômeno do efeito fotoelétrico.

2.1 NARRATIVAS PSEUDO-HISTÓRICAS DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A questão de pesquisa para este capítulo é orientada pelas diferentes constatações de que muitas das narrativas históricas sobre o efeito fotoelétrico, seja em livros didáticos ou em textos acadêmicos, quando não ignoradas, revelam-se descontextualizadas, conceitualmente problemáticas e apócrifas (Whitaker, 1979a, 1979b; Kragh, 1992; Klassen, 2011 [2008]; Niaz *et al.*, 2010; Klassen *et al.*, 2012; Franklin, 2013, 2016; Soares, 2016; Lima *et al.*, 2017; Passon, 2022). De acordo com esses autores, essas narrativas caracterizam-se pela tendência de omitir, distorcer e simplificar em excesso informações consideradas importantes. Ademais, é identificada uma supervalorização do papel da experimentação, o que reforça uma perspectiva empírico-indutivista e a-teórica do empreendimento científico. Ao mesmo tempo, os pesquisadores apontam para a existência de um falso corte epistemológico entre a Física Clássica e a Física Moderna.

Whitaker (1979a, 1979b) expõe como a sequência lógica adotada na narrativa educacional muitas vezes contrasta com a ordem cronológica revelada pela análise histórica. Trata-se de uma narrativa mítica especialmente elaborada para promover certas perspectivas metodológicas e educacionais, especialmente a racionalidade interna da ciência. Ele categoriza essas narrativas históricas distorcidas e apócrifas “quasi-história”.

Whitaker (1979a) discute as descrições inadequadas das relações entre as teorias de Planck (1900) e Einstein (1905) presentes em livros didáticos. O autor afirma que é uma distorção histórica afirmar que, à época do trabalho de Einstein (1905), a teoria da radiação de corpo negro proposta por Planck já era plenamente compreendida e amplamente aceita pela comunidade científica, ou que Einstein fundamentou sua teoria quântica da radiação em evidências experimentais abundantes e precisas sobre o efeito fotoelétrico. Além disso, ele afirma que outro erro histórico significativo é considerar os trabalhos de Robert Millikan, conduzidos entre 1914 e 1916, como provas definitivas da teoria de Einstein. Isso porque Millikan somente aceitou seriamente a ideia de “*quantum* de luz” após a consolidação dos estudos de Arthur H. Compton a respeito do fenômeno atualmente conhecido como “efeito Compton”, por volta de 1927.

Prosseguindo com a discussão anterior, Whitaker (1979b) argumenta que as narrativas apresentadas nos livros didáticos, de caráter retrospectivo, eliminam a dimensão social da ciência e produzem distorções históricas em relação à descrição dos principais avanços científicos de duas maneiras distintas. De um lado, essas narrativas transmitem a imagem distorcida de que as ideias científicas são quase triviais, surgindo por instinto científico, como o relato do “ato de desespero” de Max Planck em 1900 na formulação da teoria da radiação de corpo negro. No lado extremo oposto, sugere que as ideias científicas surgem nas mentes brilhantes de indivíduos excepcionais e inigualáveis, de uma maneira quase mística, como na descrição da ideia revolucionária de “*quantum* de luz” de Albert Einstein.

Segundo o historiador da ciência dinamarquês Helge S. Kragh (1992), no caso específico das narrativas “quasi-históricas” sobre o efeito fotoelétrico, há pelos menos seis distorções ou mitos principais: (1) a teoria quântica da radiação de Albert Einstein de 1905, enquanto explicação para as emissões fotoelétricas, está fundamentada e foi uma extensão natural da teoria de radiação de corpo negro de Max Planck de 1900; portanto, Einstein apenas adotou e aplicou as ideias Planck à natureza da luz; (2) o famoso artigo de Einstein (1905) tem como objetivo principal fornecer uma teoria explicativa para o efeito fotoelétrico; (3) o aspecto central da teoria quântica da radiação de Einstein (1905) é sua explicação inédita para as inesperadas observações experimentais que indicavam que a energia cinética máxima dos

elétrons ejetados depende linearmente da frequência de luz incidente, mas é independente de sua intensidade; (4) as observações experimentais obtidas a partir do fenômeno do efeito fotoelétrico (item 3) são totalmente inexplicáveis sem a aplicação da “hipótese do *quantum* de luz” (“fóton”), ou seja, a teoria quântica da radiação é inevitável; (5) como não havia nenhuma alternativa clássica para rivalizar, a teoria quântica da radiação de Einstein (1905) foi rapidamente aceita e adotada pela comunidade científica; e, finalmente, (6) a verificação final e definitiva da teoria quântica da radiação de Einstein (1905) foi obtida nos experimentos cruciais realizados por Robert A. Millikan em 1916.

Entre 2008 e 2012, um grupo de pesquisadores das Universidades de Manitoba e Winnipeg, no Canadá, conduziram algumas pesquisas sobre a integração e reconstrução mais precisa das narrativas históricas do efeito fotoelétrico (Klassen, 2011 [2008]; Niaz *et al.* 2010; Klasse *et al.*, 2012).

Klassen (2011 [2008]), com base nos estudos de Kragh (1992), examina a história e os fatos científicos associados ao efeito fotoelétrico e, como resultado, fornece uma base para reformulação das narrativas históricas sobre esse fenômeno nos livros didáticos, particularmente de ensino superior. A narrativa desenvolvida pelo autor – denominada “O Nascimento do Conceito de Fóton” – consiste em uma sequência de cinco episódios históricos que, na perspectiva do autor, abrange os cinco momentos de maior destaque no processo de construção do conhecimento científico sobre o efeito fotoelétrico, a saber: (i) a observação do efeito fotoelétrico por Heinrich Hertz em 1887; (ii) a caracterização e a explicação inicial do efeito fotoelétrico; (iii) a publicação do artigo revolucionário de Einstein (1905) sobre a “hipótese de *quantum* de luz” e sua explicação quântica do efeito fotoelétrico; (iv) a verificação experimental de Robert Millikan da equação fotoelétrica de Einstein (1905) e sua rejeição à teoria quântica da radiação; e (v) as investigações e interpretação quântica de Arthur Compton sobre o “efeito Compton”, e sua contribuição decisiva para a aceitação por parte dos últimos cientistas céticos em relação à teoria quântica da radiação.

A partir do estudo de Klassen (2011 [2008]), Niaz *et al.* (2010), em um primeiro momento, definiram os cinco aspectos fundamentais para a construção de uma narrativa histórica que incorpora aos principais eventos que levaram à proposição da teoria quântica da radiação por Einstein (1905) e à subsequente controvérsia na comunidade científica, a saber: (a) A interpretação clássica Lenard (1902) do efeito fotoelétrico, conhecida como “hipótese de gatilho”; (b) A formulação da “hipótese de *quantum* de luz” de Einstein (1905) e sua interpretação quântica do efeito fotoelétrico; (c) O período de rejeição da comunidade científica à teoria quântica da radiação de Einstein (1905); (d) As observações experimentais de Robert

Millikan a respeito da equação fotoelétrica de Einstein (1905) e sua determinação empírica do valor da constante de Planck (h); e (e) As suposições de Millikan sobre a natureza da luz. Em um segundo momento, considerando a presença e a qualidade descritiva desses cinco episódios históricos como critérios avaliativos das narrativas do efeito fotoelétrico, somada à sua apresentação e interpretação dentro de uma perspectiva histórica e filosófica da ciência, Niaz *et al.* (2010) examinaram 103 livros universitários de Física Geral. De acordo com os autores, os resultados indicam que esses cinco episódios históricos são frequentemente ignorados ou distorcidos na maioria dos livros, com apenas três sendo classificados como “satisfatórios” e nenhum como “excelente”.

De maneira semelhante, Klassen *et al.* (2012) realizaram uma análise de 38 manuais de laboratório destinados a estudantes de cursos de graduação em física sobre as atividades experimentais referentes ao efeito fotoelétrico. O estudo concentrou-se na representação das bases históricas desse fenômeno nesses manuais. Os critérios de avaliação dos manuais foram derivados da reconstrução histórica e filosófica do efeito fotoelétrico nos trabalhos de Klassen (2011 [2008]) e de Niaz *et al.* (2010). Como resultado, os autores observam que nenhum dos manuais foi classificado como “excelente” e, em geral, negligenciam o contexto histórico e os dados experimentais que poderiam levar a interpretações alternativas do efeito. Os autores sugerem fortemente o uso de uma abordagem histórica para lidar com as dificuldades de compreensão conceitual do efeito fotoelétrico, algo que, segundo eles, não é facilitado pelas investigações laboratoriais.

O professor Allan Franklin (2013, 2016), da Universidade do Colorado, nos Estados Unidos, também investigou as narrativas do efeito fotoelétrico nos livros didáticos, com ênfase nas pesquisas experimentais de Robert A. Millikan, entre 1914 e 1916, a respeito da determinação fotoelétrica da constante de Planck (h). Por meio da análise do artigo publicado por Millikan (1916c), o autor mostra que, somente quando observado retrospectivamente, pode-se afirmar que os resultados experimentais de Millikan forneceram suporte para a teoria quântica da radiação de Einstein (1905). Com base nos registros históricos, pelo menos até 1927, Millikan e muitos outros cientistas não acreditavam que esse fosse o caso. Para Millikan, os seus resultados corroboravam empiricamente apenas a “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905), e não a ideia revolucionária de “*quantum* de luz”.

No contexto brasileiro, Soares (2016) evidenciou que existe uma supervalorização na descrição dos experimentos realizado por Robert A. Millikan em 1916 nos livros didáticos, sugerindo a ideia de que a aceitação da teoria quântica da radiação se efetivou logo após a publicação de seus resultados experimentais, caracterizando-os como “experimentos cruciais”.

A autora relatou a ausência de referência a outros cientistas que colaboraram com o trabalho de Millikan e criticou a descrição linear e acumulativa do desenvolvimento científico por desconsiderar controvérsias ou problemas de aceitação e validação das ideias revolucionárias de Albert Einstein.

Na mesma perspectiva, Lima *et al.* (2017) realizaram uma análise bakhtiniana dos enunciados sobre o efeito fotoelétrico encontrados em três livros didáticos de ensino superior. Segundo os autores, os discursos apresentados nesses livros podem ser identificados com uma visão epistemológica de ciência empirista-indutivista, linear, universal e infalível – características de uma visão positivista de NdC – evidenciada, por um lado, pela supervalorização do papel do experimento e o papel do modelo de energia quântica de Max Planck, pela transmissão de uma falsa noção de divisão clara entre física clássica e moderna e, por outro lado, pelo silenciamento das crenças metafísicas de Einstein, das contribuições da termodinâmica e da mecânica estatística, e também pela ausência de qualquer referência à utilização por Einstein do modelo de Wilhelm Wien (anterior ao de Planck) para determinação da entropia da radiação eletromagnética.

Como último artigo dessa breve revisão, Passon (2022) problematiza diferentes aspectos das narrativas “quase-históricas” do desenvolvimento inicial da teoria quântica da radiação presentes nos livros didáticos, mostrando que, muitas vezes, tem-se uma abordagem a-histórica, acumulativa e de crescimento linear, com várias distorções históricas graves. O autor explora os seguintes tópicos: (a) Max Planck e problema da radiação de corpo negro; (b) Albert Einstein e a “hipótese de *quantum* de luz”; (c) Niels Bohr e seu modelo atômico; (d) Arthur Compton e o “*quantum* de luz”; e (e) O conceito atual de fóton. O autor argumenta que as narrativas “quasi-históricas” da teoria quântica não contém apenas erros acidentais, mas desempenham o papel de retratar sistematicamente um quadro da pesquisa científica como um processo cumulativo no qual anomalias (*e.g.*, “catástrofe ultravioleta”), previsões bem-sucedidas (*e.g.*, “equação fotoelétrica de Einstein”) ou experimentos cruciais (*e.g.*, “efeito Compton”) impulsionam o desenvolvimento inevitavelmente em direção ao nosso entendimento atual.

De maneira geral, a literatura aponta que as narrativas do efeito fotoelétrico presentes nos livros didáticos aderem – assim como para quaisquer outros tópicos ou conteúdos de disciplinas científicas – intencionalmente, a uma estrutura textual que segue as etapas supostamente obrigatórias e sequenciais do “Método Científico” (1. Observação; 2. Hipóteses; 3. Experimentação; 4. Resultados; 5. Conclusões), distorcendo o curso real dos acontecimentos e apresentando a história da ciência como uma sequência linear e cumulativa que levou à inevitável aceitação das teorias científicas atuais (Whitaker, 1979a, 1979b; Klein, 1972; Kragh,

1992; Allchin, 2004). Em outras palavras, da maneira como os livros didáticos fazem, as organização e o conteúdo das narrativas históricas parecem desempenhar uma função essencial: transmitir aos estudantes o que é considerado um método adequado de investigação científica.

Essas narrativas, embora baseadas e fundamentadas em fatos estabelecidos e episódios históricos reais, selecionam de modo específico alguns eventos (e omitem outros) com o propósito deliberado de distorcer as bases da autoridade científica, promover e transmitir imagens estereotipadas, distorcidas e injustificadas sobre o processo de construção do conhecimento científico. Daqui em diante, conforme a definição empregada por Douglas Allchin (2003, 2004), denominaremos de “*narrativas pseudo-históricas*” esse tipo de organização e construção textual.

A abordagem e a narrativa pseudo-histórica do fenômeno do efeito fotoelétrico no livro didático de Young e Freedman (2016), *Física IV – Sears e Zemansky: ótica e física moderna*, comumente adotado nos estudos de cursos universitários, podem ser tomadas como exemplos típicos dessa estrutura textual.

O texto começa com uma breve introdução sobre a natureza da luz, apresentando um relato das observações empíricas obtidas entre 1887 e 1905 sobre o efeito fotoelétrico, sem mencionar o nome dos cientistas envolvidos. Há ênfase na explicação do funcionamento de um aparato experimental para testar o fenômeno, na definição de conceitos fundamentais e, em especial, na discussão das contradições inesperadas entre as observações e as previsões da teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (1831-1879), que possuía uma sólida corroboração empírica e ampla aceitação no fim do século XIX (*1. Observação*).

Os autores encerram essa etapa da narrativa pseudo-histórica com uma afirmação que prepara o leitor para a apresentação posterior da inevitável hipótese solucionadora (*2. Hipóteses*):

Esses resultados contradizem diretamente a descrição da luz feita por Maxwell, como uma onda eletromagnética. Uma solução para esse dilema foi fornecida por Albert Einstein em 1905. Sua proposta consistia em nada menos que uma nova teoria para a natureza da luz (Young; Freedman, 2016, p. 205).

Em seguida, são definidos os principais conceitos da teoria quântica proposta por Einstein em 1905, denominada de “teoria do fóton” pelos autores, apesar de o termo “fóton” ter se tornado comum somente em 1923. Os autores afirmam que Einstein postulou, de maneira radical, a hipótese de que um feixe de luz é constituído por pacotes de energia, denominados “fótons” ou “*quanta*”. Contudo, advertem que esse postulado não é totalmente original, mas “[...] a extensão de uma ideia desenvolvida cinco anos antes por Max Planck para explicar as propriedades da radiação de corpo negro” (Young; Freedman, 2016, p. 205) (*2. Hipótese*).

Na sequência, todas as observações experimentais inicialmente mencionadas, descritas como contraditórias e incompatíveis com a teoria clássica do eletromagnetismo, são agora explicadas na perspectiva da “teoria do fóton” de Einstein. Nesse momento, não há qualquer menção a conflitos, período de rejeição, incertezas ou controvérsias científicas emergentes (3. *Experimentação*; 4. *Análise de Resultados*; e 5. *Conclusão*). Os autores concluem:

Portanto, o postulado de Einstein explica por que o efeito fotoelétrico ocorre apenas para frequências superiores a um limite mínimo de frequência. Esse postulado também é consistente com a observação de que maior intensidade provoca maior corrente fotoelétrica. [...] O postulado de Einstein também explica por que não existe intervalo algum entre a iluminação e a emissão de fotoelétrons. [...] Finalmente, o postulado de Einstein explica por que o potencial de corte para uma determinada superfície depende apenas da frequência de luz (Young; Freedman, 2016, p. 206).

É evidente que esse tipo narrativa pseudo-histórica não incorpora todas as complexidades do processo de validação e aceitação de teorias científicas, uma vez que omite informações relevantes que tratam de questões históricas, epistemológicas e sociológicas fundamentais. Aspectos como a origem do conhecimento científico, métodos, procedimentos e processos da ciência, bem como a própria natureza do conhecimento produzido e a influência do contexto histórico-social sobre as investigações científicas são deixados de lado.

Assim, fundamentando-se nessa revisão da literatura a respeito da historicidade e do desenvolvimento não linear do processo de construção do conhecimento científico do efeito fotoelétrico no final do século XIX e início do século XX, o tema central da pesquisa historiográfica relatada neste capítulo foi dividido em sete subtópicos principais:

- I. 1887: H. R. Hertz “Tropeça” e Investiga a Interação entre Faíscas Elétricas.
- II. 1888-1898: As Primeiras Investigações sobre o Efeito Fotoelétrico.
- III. 1898-1902: As Investigações de Phillipp Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico.
- IV. 1905: Albert Einstein e sua Hipótese Heurística de “*Quantum* de Luz”.
- V. 1910-1913: Tentativas Clássicas de Interpretação do Efeito Fotoelétrico.
- VI. **1914-1917: As Investigações de R. A. Millikan sobre o Efeito Fotoelétrico.**
- VII. 1917 -1927: O Efeito Compton e a Aceitação da Teoria Quântica da Luz.

O Quadro 4 apresenta os principais documentos selecionados, categorizados em publicações científicas (fontes primárias) e estudos historiográficos anteriores (fontes secundárias). Esses últimos foram subdivididos em específicos (que abordam apenas um subtópico) e gerais (que abordam vários subtópicos). A escolha desses documentos derivou da identificação nas listas de referências em outras pesquisas historiográficas, consideradas

proeminentes na literatura acadêmica sobre o desenvolvimento inicial da teoria quântica, como os trabalhos de Jammer (1966), Heilbron (1968), Hermann (1971), Kuhn (1978) e Wheaton (1983). Especial destaque é dado ao estudo de John L. Heilbron (1968), intitulado *Quantum Historiography and the Archive of History of Quantum Physics*, que proporcionou uma lista contendo mais de cem referências.

Quadro 4 - Documentos selecionados para fundamentar a pesquisa historiográfica.

Tópico	Fontes Primárias	Fontes Secundárias	
		Específica	Geral
(i)	Hertz (1887, 1892)	Mulligan (1994, 1999)	Hughes (1914)
(ii)	Hallwachs (1888) Righi (1888, 1890) Stoletow (1888) Elster e Geitel (1889, 1891a, 1891b, 1892)	Wheaton (1978) Bonzel e Kleint (1995) Merritt (1896a, 1896b) Merritt e Stewart (1900)	Jammer (1966) Heilbron (1968) Stuewer (1970, 1975) Hermann (1971) Wheaton (1983)
(iii)	Lenard (1902, 1998 [1906], 1918) Lenard e Wolf (1889)	Wheaton (1978) Mosse (1966) Hentschel (1996) Ball (2014, 2020)	Kuhn (1978) Kragh (1992) Klassen (2011)
(iv)	Einstein (1905, 1906)	Klein (1962, 1963, 1967, 1980) Stachel (1989, 2005) Dionísio (2005) Martins e Rosa (2014)	
(v)	Thomson (1894, 1904a, 1904b, 1910, 1913) Haas (1910a, 1910b) Debye e Sommerfeld (1913) Richardson (1912, 1914, 1929)	McCormmach (1967) Nisio (1973) Stuewer (1975) Mehra (1975) Mehra e Rechenberg (1982) Katzir (2006) Eckert (2013, 2015)	
(vi)	Millikan (1916a, 1916b, 1916c, 1917)	Holton (1999) Franklin (2013, 2016) Santos (2018)	
(vii)	Compton (1923, 1928a, 1928b, 1928c)	Stuewer (1970, 1975) Kragh (1992) Passon (2022) Friedman (2022)	

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Em nosso estudo, dentre as várias abordagens possíveis na pesquisa em História da Ciência, predominou a “abordagem conceitual” (interna ou internalista) em relação à “abordagem não conceitual” (externa ou externalista). Na abordagem conceitual, a análise prioriza aspectos epistemológicos do processo de construção do conhecimento científico, como o problema da origem do conhecimento científico, as controvérsias científicas, os métodos, procedimentos e processos da ciência e o conteúdo e a natureza do conhecimento produzido. Além disso, busca-se abordar questões referentes à solidez da base teórica em determinado contexto científico histórico (Kragh, 1987; Martins, 2005).

Entretanto, em circunstâncias específicas, também foi viável fazer uso da abordagem não conceitual, quando foram explorados alguns aspectos históricos, sociológicos e epistemológicos sobre a Natureza da Ciência (NdC), tais como o papel desempenhado por indivíduos e pela comunidade científica, influências históricas e sociais, além de considerações morais, éticas e políticas. Esses elementos, em geral, não estão evidentes nas fontes científicas primárias (Kragh, 1987; Martins, 2005).

Em um desses momentos, destacado no subtópico (iii), “1898-1902 – As Investigações de Philipp Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico”, o emprego da “abordagem não conceitual” tornou-se viável pelo fato de o físico alemão ter sido um membro fanático e influente do Partido Nacional-Socialista dos Trabalhadores Alemães (Partido Nazista). Considerando esse cenário em particular, foi possível ampliar a análise além dos fatores internos à atividade científica, abrangendo discussões e reflexões sobre questões éticas, morais e políticas envolvendo a produção do conhecimento científico.

É importante ressaltar que os resultados obtidos por meio desta pesquisa documental, apresentados nas próximas subseções sob a forma de narrativa, fornecem subsídios teóricos e recursos didáticos de caráter histórico. A intenção dos pesquisadores é contribuir para mitigar a problemática da escassez de materiais históricos, acessíveis em língua portuguesa, adequados para serem utilizados na disciplina de História da Ciência, no contexto de formação de professores de física, tanto de Graduação quanto de Pós-Graduação.

Em resumo, considera-se que esses subsídios têm o potencial de servir como suporte didático para a elaboração de outras abordagens investigativas sobre temas e questões relacionadas à problematização de narrativas pseudo-históricas e de aspectos históricos, sociológicos e filosóficos da atividade científica.

Antes de iniciarmos, deve-se enfatizar que, embora estejamos tentando contribuir para a correção de várias distorções históricas, omissões e erros comuns presentes nas narrativas pseudo-históricas (e/ou quase-históricas) do efeito fotoelétrico, não reivindicamos que estamos fornecendo a história definitiva e “absolutamente verdadeira” dos fatos e acontecimentos. Embora nosso trabalho apresente informações fundamentadas nos registros históricos e nos estudos historiográficos de outros autores, reconhecemos que a nossa narrativa pode não capturar totalmente a motivação original dos protagonistas.

2.2 A HISTÓRIA NÃO LINEAR DO EFEITO FOTOELÉTRICO

2.2.1 1887: H. R. Hertz “Tropeça” e Investiga a Interação entre Faíscas Elétricas

Heinrich Rudolf Hertz nasceu em Hamburgo, Alemanha, em 22 de fevereiro de 1857. Nesse período, a cidade se destacava como principal porto comercial do país e um importante centro industrial. Hertz cresceu em um ambiente familiar com condições socioeconômicas e culturais privilegiadas, que incentivou e viabilizou as oportunidades para o desenvolvimento de seus talentos e interesses pessoais. Sua mãe, Anna Elisabeth Pfefferkorn Hertz (1835-1910), era filha de um médico da cidade de Frankfurt e membro da Igreja Evangélica Luterana. Seu pai, Gustav Ferdinand Hertz (1827-1914), de descendência judaica (depois convertido à doutrina protestante), foi um advogado bem-sucedido, e mais tarde tornou-se “Chefe do Sistema Judicial de Hamburgo” e também senador (Mulligan, 1994, 1999).

Inclinado a seguir estudos na área de engenharia, Hertz redirecionou sua formação acadêmica para o âmbito da Física no ano de 1878, exibindo uma rara combinação de interesse e habilidades em física experimental e teórica. Ao longo de sua trajetória profissional, estudou e trabalhou em diferentes universidades alemãs, a saber: Munique (1877-1878), Berlim (1878-1883), Kiel (1883-1885), Karlsruhe (1885-1889) e Bonn (1889-1894). Desenvolveu vários projetos de pesquisa com outros proeminentes cientistas de sua época, destacando-se as colaborações nas investigações sobre a teoria clássica do eletromagnetismo com Gustav Kirchhoff (1824-1887) e Hermann von Helmholtz (1821-1894) (Mulligan, 1994, 1999).

Os resultados obtidos por Hertz nas pesquisas experimentais sobre a teoria clássica do eletromagnetismo, no Instituto de Física da Universidade de Karlsruhe de Ciências Aplicadas, tornaram-no mundialmente reconhecido como o primeiro cientista a confirmar a existência das ondas eletromagnéticas¹⁵. De maneira extremamente precisa, constatou-se que as características e propriedades observadas dessas ondas eram aquelas previstas vinte e cinco anos antes por James C. Maxwell para as relações entre luz e eletricidade¹⁶.

¹⁵ Em 1888, Heinrich R. Hertz foi agraciado com a *Medalha Matteucci* pela Sociedade Científica Italiana. No ano seguinte, em 1889, conquistou o *Prêmio Baumgartner* da Academia de Ciências de Viena e o *Prêmio La Caze* da Academia de Ciências de Paris. Em 1890 recebeu a *Medalha Rumford* da Royal Society of London, e, em 1891, foi laureado com o *Prêmio Bressa* pela Academia Real de Turim (Mulligan, 1994).

¹⁶ No período compreendido entre 1861 e 1862, uma série de quatro artigos foi lançada sob o título “Sobre as linhas de força físicas”, nos quais James C. Maxwell expôs sua teoria. Posteriormente, em 1873, sua contribuição

Isso foi decisivo para estabelecer a teoria clássica do eletromagnetismo em uma posição bastante sólida no fim do século XIX, com status de aceitação acadêmica similar à mecânica newtoniana. Os trabalhos experimentais de Hertz ampliaram o espectro eletromagnético enquanto campo promissor de pesquisa, fornecendo os fundamentos teóricos para o desenvolvimento posterior da telegrafia sem fio. Com efeito, nos últimos 150 anos, a importância dos trabalhos de Hertz sobre a teoria de Maxwell é evidente na área da Engenharia elétrica, especialmente em relação ao avanço científico-tecnológico das comunicações por ondas de rádio e de micro-ondas (Mulligan, 1994, 1999).

Em 1889, após a morte do físico e matemático alemão Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), Hertz, aos 30 anos de idade (cf. Figura 4). Decidiu aceitar o convite para ocupar o cargo vago de diretor do Instituto de Física da Universidade de Bonn. Naquela época, sua atenção estava direcionada para as pesquisas sobre raios catódicos produzidos em tubos de descargas elétricas com gases muito rarefeitos (conhecidos como “tubos de Crookes”). Embora esses raios tivessem sido descobertos 20 anos antes, em 1869, por Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), sua natureza ainda era incompreendida e controversa na comunidade científica. Contudo, a situação mudou significativamente em 1892, quando Hertz observou que os raios catódicos podiam atravessar finas folhas metálicas, possibilitando estudos experimentais inéditos desses raios em sua forma “pura”, isto é, na parte de fora evacuada do tubo, sem a interferência dos gases rarefeitos (Mulligan, 1994, 1999).

Figura 4 - Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), fotografado por volta de 1890.



Fonte: Biblioteca Niels Bohr, Museu Alemão.

na área de eletromagnetismo foi consolidada em formato de livro, com o título “Um tratado sobre eletricidade e magnetismo” (em inglês, “A treatise on electricity and magnetism”). cf. Maxwell (1873, 1965).

Na Universidade de Bonn, Hertz também estava se dedicando ao estudo do fenômeno recém-observado da influência da luz ultravioleta em descargas elétricas e em superfícies metálicas¹⁷. Por algum tempo, esse fenômeno ficou conhecido como “efeito Hertz”, mas anos mais tarde (e atualmente) tornou-se reconhecido como “efeito fotoelétrico”, por sugestão do físico italiano Augusto Righi (1850 – 1920).

A primeira observação e estudo sistemático desse efeito foram conduzidos por Hertz em 1887, ainda que de forma limitada e experimental, enquanto investigava a teoria clássica do eletromagnetismo na Universidade de Karlsruhe. Na introdução de seu artigo intitulado “Sobre um efeito da luz ultravioleta em descargas elétricas”, Hertz descreve como suas investigações experimentais sobre os efeitos de ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas o levaram, de forma inesperada, a “tropeçar” em um novo fenômeno:

Em uma série de experimentos para estudar os efeitos da ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas, que eu conduzi e publiquei recentemente¹⁸, duas faíscas (ou centelhas elétricas) eram produzidas pela mesma descarga de uma bobina de indução e, conseqüentemente, ocorriam de maneira simultânea. Uma delas, a faísca *A*, era a faísca de descarga da bobina de indução e servia para excitar a oscilação primária. A segunda, a faísca *B*, pertencia à oscilação secundária ou induzida. Essa última não era muito luminosa; nos experimentos, seu máximo comprimento tinha que ser habilmente medido. Ocasionalmente, eu colocava a faísca *B* no interior de uma caixa escura para realizar mais facilmente as observações; e, ao fazer isso, percebi que o máximo comprimento das faíscas era visivelmente menor quando a faísca *B* estava dentro da caixa. Ao remover sucessivamente as várias partes da caixa, verifiquei que a única parte que exercia esse efeito prejudicial era o anteparo que bloqueava a faísca *B* da faísca *A*. O anteparo desse lado da caixa exibia esse efeito não apenas quando estava na vizinhança imediata da faísca *B*, mas também quando estava interposta a distâncias maiores que entre *A* e *B* da faísca *B*. Um fenômeno tão notável exigia uma investigação mais detalhada (Hertz, 1887, p. 247)¹⁹.

Cinco anos mais tarde, na introdução do seu livro *Ondas Elétricas: pesquisas sobre a propagação da ação elétrica com velocidade finita através do espaço*, que compila seus artigos

¹⁷ Para uma compreensão mais precisa dos eventos históricos, é importante distinguir o “efeito fotovoltaico” do “efeito fotoelétrico”. Em 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) observou o surgimento (e o aumento) de corrente elétrica quando uma célula eletroquímica (um eletrodo de cloreto de prata imerso em uma solução eletrolítica) era exposta à luz solar, denominando esse fenômeno de “efeito fotovoltaico” (Becquerel, 1839a; 1939b). Posteriormente, em 1873, o engenheiro elétrico britânico Willoughby Smith (1828-1891) constatou que a luz influenciava as propriedades elétricas do selênio (Se) – um mineral semicondutor de eletricidade – durante a passagem de uma corrente elétrica, classificando-o como material fotocondutor. Em pouco tempo, diversas pesquisas foram conduzidas sobre os diferentes “tipos de células” e materiais em que o “efeito fotovoltaico” poderia ocorrer. Nesse contexto histórico-científico-tecnológico, os estudos experimentais de Hertz e Hallwachs se destacaram, levando eventualmente à observação do “efeito fotoelétrico” em superfícies metálicas e ao desenvolvimento das fotocélulas alcalinas. Desde então, as pesquisas sobre o “efeito fotovoltaico” constituem a base científico-tecnológica que sustenta o funcionamento dos modernos painéis solares.

¹⁸ cf. Heinrich R. Hertz, “Über sehr schnelle elektrische Schwingungen” (Sobre oscilações elétricas muito rápidas), *Annalen der Physik*, Leipzig, v. 31, p. 421-48, 1887.

¹⁹ Todas as citações em outro idioma foram traduzidas pelos autores.

publicados entre 1886 e 1891, Hertz recorda o momento histórico em que foi confrontado com aquela inesperada observação. Ele descreve sua perplexidade ao notar a ação recíproca entre faíscas elétricas, reconhecendo uma inevitável curiosidade despertada: “Eu não tinha a intenção de permitir que esse fenômeno desviasse minha atenção do objetivo principal que eu tinha em mente; no entanto, ele se manifestou de maneira tão definida e intrigante que não pude negligenciá-lo completamente” (Hertz, 1892, p. 4).

As narrativas pseudo-históricas presentes nos livros didáticos e em alguns textos acadêmicos, contém duas distorções principais a acerca da descoberta do efeito fotoelétrico. A primeira refere-se à suposta caracterização e descrição desse efeito por Hertz em 1887. Alguns autores afirmam que, enquanto investigava a produção de descargas elétricas entre dois eletrodos como uma fonte de ondas eletromagnéticas, Heinrich Hertz teria observado que o comprimento de uma descarga elétrica aumentava quando os eletrodos eram iluminados com luz ultravioleta, *sugerindo que ocorria a emissão de elétrons da superfície iluminada* (e.g. ver Alonso e Finn, 2000, p. 12). Entretanto, na época das investigações experimentais de Hertz (1887), o conceito de “elétron” como diminuta partícula de matéria, negativamente carregada e menor do que o átomo de hidrogênio, ainda não estava amplamente consolidado e estabelecido como um “fato científico”. Sua aceitação era controversa entre físicos germânicos e ingleses, especialmente nas pesquisas sobre raios catódicos.

Ao contrário da versão distorcida transmitida pelas narrativas pseudo-históricas, Hertz e seus assistentes não aceitavam a “teoria corpuscular do elétron” de Joseph John Thomson (1856 – 1940) e seus colaboradores ingleses. De fato, os físicos germânicos, em geral, compartilhavam o entendimento de que os raios catódicos eram um fenômeno ondulatório-eletromagnético no éter, de natureza semelhante à luz visível. Foi somente entre 1897 e 1900, portanto, cerca de uma década após a observação da primeira manifestação fotoelétrica, que o conceito de “elétron”, definido como uma partícula fundamental da eletricidade, foi estabelecido e amplamente aceito na comunidade científica.

A segunda distorção refere-se à escrita sugestiva de que, ao fazer essa observação empírica inesperada e acidental – logo, um “feliz tropeço” –, Hertz prontamente reconheceu que a luz ultravioleta emitida pela “faísca A” facilitava a produção da “faísca B”, ou seja, que a luz era a causa primária do novo fenômeno identificado. Em virtude de sua apresentação em retrospectiva, essa narrativa faz parecer que a primeira observação do efeito fotoelétrico tenha sido bastante óbvia e trivial, transmitindo a ideia ingênua e equivocada de que nenhuma investigação científica aprofundada foi necessária para sua caracterização.

No entanto, tanto o artigo de 1887 quanto o livro de 1892 publicados por Hertz revelam que ocorreu um típico caso de “serendipidade”, conceito que se refere a situações nas quais um investigador, com uma mente perspicaz e preparada, percebe que sua “pesquisa direcionada a testar uma hipótese específica resulta acidentalmente em um subproduto fortuito, uma observação inesperada que se relaciona com teorias que não estavam inicialmente em questão” (Merton, 1968, p. 158), ou ainda, “(...) que parece inconsistente com a teoria predominante ou com outros fatos científicos estabelecidos” (p. 159). Em ambos os casos, a discrepância desperta curiosidade e interesse do cientista, levando-o a buscar uma compreensão mais profunda para a observação anômala, tentando caracterizá-la em um contexto mais amplo de conhecimento. Isso o impulsiona a investigar mais detalhadamente, realizar novas observações e extrair conclusões baseadas, em geral, com base em sua perspectiva teórica adotada (Merton, 1968).

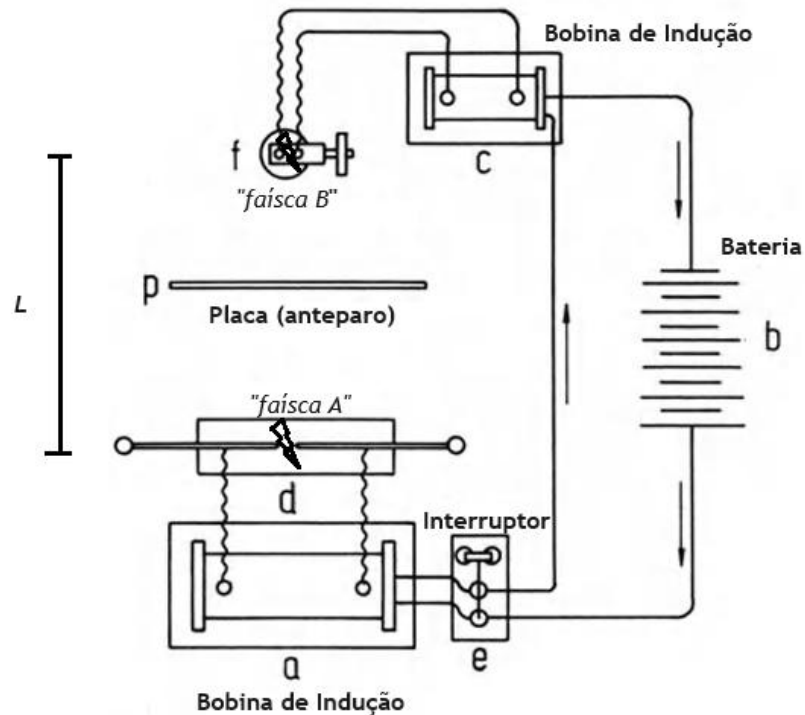
Segundo Bonzel e Kleint (1995), de acordo com as anotações diárias, logo após a surpreendente observação, entre 14 e 27 de maio de 1887, Hertz realizou algumas modificações cuidadosas nas condições experimentais e conduziu uma série de testes com o objetivo de identificar a causa primária desconhecida da interação entre as faíscas elétricas simultâneas. Além do mais, a investigação sobre o novo fenômeno era relevante para a continuidade das investigações experimentais de ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas, e não apenas uma mera curiosidade científica. Isso porque a interação entre as faíscas elétricas simultâneas representava uma fonte de interferência indesejada e não controlada durante a coleta de dados de sua pesquisa principal.

Para a realização dos testes experimentais, Hertz (1887) construiu um aparato cuja representação esquemática original é ilustrada na Figura 5. A “faísca A” era produzida por uma bobina Ruhmkorff de alta voltagem (a), com 52 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro. A corrente elétrica necessária era fornecida por uma bateria de Bunsen (b), passando por um interruptor de mercúrio (e). A “faísca A”, em sua forma regular e ideal para as medições, possuía cerca de 1 cm de comprimento entre as extremidades de dois eletrodos metálicos (d). Em contrapartida, a “faísca B” era produzida por uma bobina menor (c), cuja corrente elétrica também era fornecida pela bateria de Bunsen (b), apresentando apenas 1 a 2 mm de comprimento entre as extremidades de dois eletrodos de um micrômetro de faísca Riess (f).

Com ambas as lacunas das faíscas (d) e (f) alinhadas paralelamente e afastadas por uma distância não muito grande (L) – cerca de 50 cm na maioria das vezes –, o interruptor (e) era acionado, produzindo uma “faísca A” regular e fixa. Em seguida, Hertz reduzia a lacuna entre os polos dos eletrodos do micrômetro de faísca Riess (f) apenas o suficiente para permitir o surgimento e a passagem regular da “faísca B”, e assim medir o seu máximo comprimento. Ao

interpor uma placa (p) feita de metal, vidro ou outro material entre as faíscas, observava-se que a “faísca B” desaparecia de imediato e completamente. Após a remoção da placa (p), a faísca retornava instantaneamente.

Figura 5 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hertz para investigar a ação elétrica recíproca entre as descargas elétricas simultâneas em 1887.



Fonte: Adaptado pelos autores para fins didáticos de Hertz (1887, p. 248).

Em termos gerais, Hertz investigou de maneira sistemática a separação crítica entre os dois polos dos eletrodos do micrômetro (f), ou seja, o máximo comprimento da “faísca B”, como função de diversas variáveis no arranjo experimental (e.g., material da placa (p), distância (L), alinhamento entre (d) e (f), entre outros), buscando identificar quais alterações exerciam efetiva influência sobre esse parâmetro.

Ao contrário da versão transmitida pelas narrativas pseudo-históricas, a hipótese de que a luz emitida pela “faísca A” influenciava a “faísca B” como causa primária do fenômeno foi, a princípio, descartada por Hertz. Essa conclusão se deu em razão das observações preliminares de que placas de vidro transparente (p) interrompiam a interação entre as faíscas elétricas simultâneas. Em suas palavras:

A eficiência da faísca ativa [“faísca A”] não se limita a nenhuma forma especial dessa faísca. Essa afirmação pode ser verificada ao colocar *um tubo de vidro* sobre a lacuna entre os polos dos eletrodos (d). *O vidro não permite a passagem do efeito e, portanto, a faísca nessas condições é inativa.* Mas o efeito reaparece assim que uma pequena parte da faísca é exposta em um dos polos ou no meio (Hertz, 1987, p. 250, grifo nosso).

Por algum tempo, de fato, fiquei em dúvida se não tinha diante de mim uma forma totalmente nova de ação elétrica à distância. *A suposição de que a ação se devia à luz parecia estar excluída pelo fato de que placas de vidro cessavam o efeito e, naturalmente, demorou algum tempo até que eu fizesse experiências com placas de cristal de rocha [cristais de quartzo]* (Hertz, 1892, p. 4, grifo nosso).

Após abandonar a hipótese inicial de que a luz emitida pela “faísca A” era a causa primária da interação elétrica à distância, Hertz explorou outras hipóteses plausíveis por meio um processo sucessivo de tentativas e erros, o qual foi relatado em dezoito itens em seu artigo científico (Hertz, 1887). Entre as diversas possibilidades, ele investigou a influência:

1. de um suposto efeito de blindagem de natureza eletrostática ou eletromagnética resultante dos diferentes materiais usados na placa (p), concluindo que não havia indícios, fosse em materiais bons condutores (metais) ou isolantes (vidro, parafina, ebonite etc.);
2. da frequência e do tipo das oscilações elétricas, observando que isso não era relevante, visto que o mesmo efeito surgia com tipos diferentes de faíscas;
3. da distância (L) entre as faíscas A e B, conseguindo produzir o efeito a uma distância de até 3 m de separação. Além disso, Hertz observou que a influência da “faísca A” diminuía em intensidade à medida que a distância aumentava, de maneira qualitativamente semelhante à diminuição na intensidade da luz de uma fonte pontual com o aumento da distância;
4. da interposição da placa (p) em anular uma “ação específica desconhecida” proveniente da “faísca A”, concluindo que anulação de fato ocorria e era facilitada com o aumento da distância (L);
5. do formato geométrico da “faísca A”, verificando que tanto faíscas curtas e retas (com eletrodos esféricos) quanto longas e irregulares (com eletrodos pontiagudos) eram igualmente efetivas. Hertz também observou que não havia diferenças se a “faísca A” fosse azulada e quase invisível ou brilhante e branca. Notou que a “ação” não era proveniente de nenhuma parte especial da “faísca A”, isto é, todas as partes eram efetivas. Ademais, concluiu que o tipo de metal que constituía os polos dos eletrodos da “faísca A” não era importante e que um alinhamento entre (d) e (f) era essencial;
6. do formato geométrico da “faísca B”, constatando que o efeito era mais suscetível e mais bem exibido por faíscas curtas entre eletrodos esféricos (f). Hertz afirmou que não notou nenhuma grande influência perceptível em virtude do tipo de metal dos polos dos eletrodos da “faísca B” (cobre, latão, ferro, alumínio, estanho, zinco e chumbo). Mas ressaltou que, se houvesse, a suscetibilidade do efeito seria maior com o ferro;
7. de uma ação recíproca entre a “faísca A” e a “faísca B”, inferindo que tal reciprocidade de fato ocorria, ou seja, que ambas se reforçavam mutuamente;

8. da mudança de posicionamento da “faísca A”, observando que a “ação específica desconhecida” se propagava em todas as direções em linhas retas, de acordo com as leis da propagação da luz, ou seja, a suscetibilidade do efeito parecia depender das faíscas estarem em linha direta de visão. Interrupções no “contato visual” entre elas, fosse por uma tela opaca ou mesmo por uma placa de vidro transparente, contribuíam para a anulação da “faísca B”.

Essa última observação, somada àquelas mencionadas em (3) acerca da influência da distância (L), levou Hertz a revisitar a ideia de que a ação desconhecida poderia ser a luz proveniente da “faísca A”. Contudo, não exatamente a luz visível, como havia inicialmente imaginado, mas outro tipo de luz. Hertz decidiu investigar novamente a influência do tipo de material da placa (p) na propagação da “ação” proveniente da “faísca A”. Nessa segunda etapa, ele observou que:

9. enquanto a maioria dos corpos sólidos dificultava ou mesmo interrompia a interação entre as faíscas elétricas simultâneas, alguns poucos cristais se mostravam transparentes para ela, embora reduzindo sua intensidade, tais como açúcar cristalizado, alúmen, calcário e sal-gema. Contudo, outros cristais, dependendo da espessura, revelaram-se transparentes, como o gesso (selenita) e, sobretudo, o cristal de rocha (cristal de quartzo), que interferia muito pouco na propagação da “ação”, mesmo quando presente em camadas com vários centímetros de espessura;
10. alguns líquidos também se mostraram transparentes (água, ácido sulfúrico, álcool e éter). Outros parcialmente transparentes (ácido hidrocloreídrico, ácido nítrico e amônia líquida). E outros opacos à propagação da “ação” (parafina líquida, benzeno, petróleo, dissulfeto de carbono, sulfeto de amônio, fucsina e permanganato de potássio);
11. alguns gases também permitiam a transmissão da “ação” mesmo a distâncias (L) consideráveis (hidrogênio, ar e dióxido de carbono). No entanto, alguns gases mostraram-se bastante opacos (“gás de carvão mineral”: metano e etano, óxido nitroso), enquanto em outros, embora fosse observada uma nítida absorção, ocorria de maneira menos efetiva (cloro, vapores de bromo e iodo);
12. a intensidade do efeito da “ação” sobre a “faísca B” aumentava quando o ar circundante era mais rarefeito (cerca de 100 mmHg), pelo menos até certo ponto. Em outras palavras, o máximo comprimento da “faísca B” era influenciado pela pressão atmosférica. Entretanto, a uma baixa pressão específica, quando surgia uma luz azulada de baixa intensidade, a “faísca B” alterava seu caráter regular, e não era mais possível perceber qualquer influência em virtude da “faísca A”;

13. o fenômeno também ocorria quando o centelhamento da “faísca A” acontecia em gases diferentes do ar, assim como quando as duas faíscas eram produzidas nas vizinhanças de dois gases distintos. Contudo, embora a eficiência das faíscas como faíscas ativas (“faísca A”) fosse semelhante em diferentes gases, observou-se uma notável diferença em sua suscetibilidade quando utilizadas como faíscas passivas (“faísca B”);
14. nem todas as partes da “faísca B” participavam igualmente do efeito. A ocorrência se dava mais próxima aos polos dos eletrodos, mais especificamente próxima ao polo negativo. Ao impedir a transmissão da “ação” sobre o ânodo, observou-se apenas uma leve absorção, entretanto, quando feito o mesmo sobre o cátodo, notou-se a anulação quase completa da “ação”.

Prosseguindo na investigação da hipótese de que a ação específica desconhecida poderia ser algum tipo de luz proveniente da “faísca A”, ele identificou que essa “ação” podia ser refletida por superfícies polidas e espelhadas, seguindo as leis da reflexão regular da luz visível (item 15). Ademais, observou que, ao passar do ar para um meio sólido transparente, como um cristal de quartzo, a transmissão dessa “ação” exibia propriedades idênticas às da refração da luz visível, mas com um desvio de trajetória mais significativo que o obtido para a luz azul ou violeta (item 16). No entanto, não obteve sucesso em sua tentativa de observar uma dupla refração durante a transmissão da “ação” (Hertz, 1887).

Com base nessa série de observações experimentais, nas quais testou mais de sessenta substâncias diferentes, Hertz (1887) inferiu que a “ação específica desconhecida” era, de fato, um efeito exclusivo da luz ultravioleta emitida pela “faísca A” sobre a “faísca B” (e vice-versa, pois o efeito era recíproco), considerando-a como a causa primária do fenômeno (item 17).

Para reforçar suas conclusões, ele testou se o mesmo efeito, resultante da interação à distância entre descargas elétricas simultâneas, podia ser reproduzido utilizando diferentes fontes comuns de luz ultravioleta (item 18). Ele corroborou sua hipótese de que a luz ultravioleta era causa primária do efeito ao usar a luz emitida pelas chamas de diversos materiais, como vela (parafina), madeira, gás, benzeno, álcool, hidrogênio, oxigênio e magnésio. Entre todas as fontes testadas, afirmou que o “arco elétrico” (arco de solda), especialmente de Zn e Al, era de longe o único que podia competir com a faísca elétrica da bobina de indução, que ainda permanecia a fonte de luz mais eficiente. No entanto, ressaltou que em nenhuma ocasião obteve um efeito notável utilizando luz solar, assumindo como explicação que a maior parte da radiação ultravioleta é absorvida na atmosfera superior da Terra por meio de reações fotoquímicas envolvendo o ozônio e o oxigênio molecular (Hertz, 1887).

Em essência, os resultados do estudo experimental de Hertz (1887) mostraram, de maneira inequívoca, que a iluminação por luz ultravioleta de um intervalo de faísca (espaçamento entre os eletrodos) facilita a produção de descargas elétricas. Ou seja, para uma dada diferença de potencial fixa, a distância de ruptura é aumentada ou, para uma distância de ruptura fixa, o potencial de descarga necessário é reduzido.

Em suas considerações finais, Hertz (1887) ressaltou a complexidade das condições em que conduziu sua série de testes experimentais, indicando a necessidade de uma abordagem mais simples, sem o uso de bobinas de indução para produção de descargas elétricas. Além disso, enfatizou que, naquele momento, não ousaria propor uma explicação física do porquê a luz ultravioleta era capaz de influenciar o comprimento máximo das descargas elétricas. Em suas palavras:

De acordo com os resultados dos experimentos, a luz ultravioleta possui a propriedade de aumentar a distância de centelhamento da descarga de uma bobina de indução e de outras descargas. As condições sob as quais ela exerce seu efeito em tais descargas são certamente muito complicadas, sendo desejável estudar a ação em condições mais simples, especialmente sem o uso de uma bobina de indução. Ao tentar progredir nessa direção, encontrei-me em dificuldades. Portanto, por enquanto, limito-me a comunicar os resultados obtidos, sem tentar formular qualquer teoria explicativa sobre a maneira como o fenômeno observado é produzido (Hertz, 1887, p. 263).

Após a publicação desse estudo sobre o efeito da luz ultravioleta em descargas elétricas, Heinrich Hertz retornou à sua investigação sobre a teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell. Os resultados de sua pesquisa experimental confirmaram a observação de um novo fenômeno manifestado pela influência da luz ultravioleta em descargas elétricas. O anúncio da observação do “efeito Hertz” despertou imediatamente o interesse de outros cientistas, especialmente entre os mais jovens. Em pouco tempo, novas investigações científicas forneceram pistas adicionais não apenas para a compreensão dos fenômenos fotoelétricos e da natureza da eletricidade, mas lançaram as bases para um novo entendimento sobre a natureza da luz e da estrutura da matéria.

2.2.2 1888-1898: As Primeiras Investigações sobre o Efeito Fotoelétrico

Ao anunciar uma nova maneira de transformar luz em eletricidade, além do já reconhecido “efeito fotovoltaico”, Hertz (1887) sugeriu que estudos adicionais sobre as manifestações fotoelétricas, conduzidos em condições experimentais mais simples,

contribuiriam para ampliar o conhecimento científico a respeito das relações intrínsecas entre a luz e eletromagnetismo. O fato de não propor ou especular qualquer mecanismo explicativo para a influência da luz ultravioleta sobre as descargas elétricas, implicitamente sinalizava uma oportunidade promissora para investigações futuras, deixando o caminho aberto para que outros cientistas pudessem explorar o novo fenômeno por meio de outras abordagens. Nesse contexto histórico-científico-tecnológico do final do século XIX, o “efeito Hertz” tornou-se um objeto de investigação frutífero e fecundo, atraindo o interesse de vários outros pesquisadores.

De acordo com a revisão das obras originais que tratam dos fenômenos fotoelétricos realizada por Egon Schweidler (1904) e Rudolf Ladenburg (1909), foram publicados quase 200 artigos científicos sobre o assunto entre 1887 e 1904. O catálogo dos autores mostra que nos três primeiros anos, foram publicados, em média, dezesseis artigos anuais sobre o assunto. Esse número caiu para cinco artigos anuais entre 1891 e 1894, antes de subir novamente para dez por ano no período de 1895 a 1904. Em consonância com esses dados, em outros dois artigos de revisão bibliográfica abrangendo os primeiros 10 anos de pesquisa, publicados por Ernest Merritt (1896a, 1896b), são listadas cerca de 114 contribuições científicas sobre a influência da luz na descarga de corpos eletrificados.

Esses estudos produziram avanços importantes no conhecimento científico sobre o efeito fotoelétrico, caracterizando-o como um processo localizado na superfície do metal e unipolar. Foi estabelecido o consenso de que a iluminação do cátodo no intervalo de faísca era o fator importante, enquanto a iluminação do ânodo ou apenas do espaço do ar circundante, em geral, não exercia influência significativa. Foi constatado que o efeito consistia na emissão de eletricidade ou de fluxos elétricos provocados pela incidência de luz (incluindo a parte invisível do espectro eletromagnético) sobre sólidos, líquidos e gases; nestes dois últimos, observando-se a ocorrência de ionização. Foi mostrado que à medida que o comprimento de onda da luz irradiada aumenta, o número de substâncias sensíveis à luz diminui. Entretanto, nesses primeiros anos de pesquisa, não foi observada a emissão fotoelétrica por luz infravermelha em nenhuma substância (Schweidler, 1904; Merritt, 1906a, 1906b).

Em termos quantitativos, foi determinado que a corrente fotoelétrica é proporcional à área iluminada e à intensidade da luz incidente, o que suscitou objeções teóricas quanto à validade desta segunda relação. Foi verificado que a corrente fotoelétrica depende de uma série de fatores complexos, incluindo a intensidade e a forma do campo elétrico (ou seja, da diferença de potencial, tamanho, forma e distância dos eletrodos), a natureza química e a condição da superfície do cátodo (pureza, suavidade), a natureza e a pressão do gás circundante,

e várias outras condições, como temperatura, presença e direção de campos magnéticos (Schweidler, 1904; Merritt, 1906a, 1906b).

Entre os cientistas cujas contribuições foram mais proeminentes nessa fase inicial de investigação experimental, destacam-se: os físicos alemães Wilhelm L. F. Hallwachs (1859-1922), Julius Elster (1854-1920), Hans Geitel (1855-1923) e Philipp E. A. von Lenard (1862-1947); o físico italiano Augusto Righi (1850-1920); o físico russo Aleksandr Grigorievich Stoletow (1839-1896) e o físico britânico Joseph J. Thomson (1856-1940).

A seguir, serão apresentadas três investigações realizadas em 1888, logo após a publicação de Hertz (1887): Wilhelm Hallwachs (Alemanha), Aleksandr Stoletow (Rússia) e Augusto Righi (Itália), este último propondo a hipótese de “convecção fotoelétrica” como explicação para o efeito fotoelétrico, a qual foi sistematicamente investigada e debatida por outros pesquisadores durante alguns anos. Em seguida, serão discutidas as contribuições de Julius Elster e Hans Geitel (Alemanha) para a difícil observação dos fenômenos fotoelétricos com luz solar.

2.2.2.1 A Influência da Luz Ultravioleta em Corpos Eletrizados e Neutros

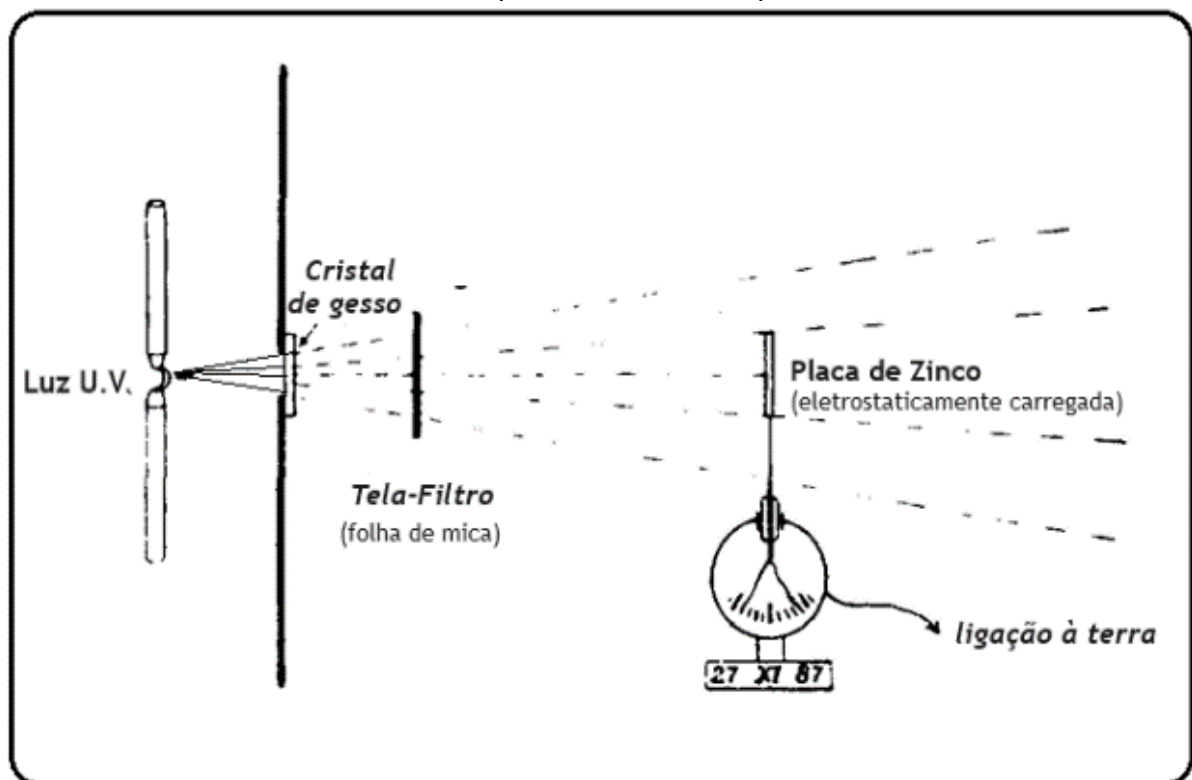
No Instituto de Física da Universidade de Leipzig (Alemanha), seguindo as sugestões apontadas por Hertz (1887) em suas considerações finais, o físico alemão Wilhelm L. F. Hallwachs, que tinha certa experiência em medições eletrométricas, conduziu uma investigação mais simples, isto é, sem o emprego de bobinas de descargas elétricas de alta frequência. Em sua primeira publicação, submetida somente seis meses após o artigo de Hertz (1887), foram descritos os resultados obtidos em dois experimentos. Hallwachs (1888a) investigou a hipótese de que o “efeito Hertz” poderia ser um fenômeno caracterizado como uma “dispersão fotoelétrica”, associado à emissão unipolar de eletricidade de corpos sólidos eletrostaticamente carregados ou neutros quando iluminados por radiação ultravioleta. Na introdução, ele escreveu:

Em um tratado publicado recentemente, o Sr. Hertz descreveu experimentos sobre a dependência do comprimento máximo de uma faísca de indução pela irradiação de uma segunda faísca. Ele mostrou que o fenômeno observado era causado pela luz ultravioleta; no entanto, uma clarificação adicional do fenômeno em virtude das complicadas condições experimentais da descoberta não pôde ser fornecida. Tentei fazer observações relacionadas sob condições experimentais mais simples, para ter um acesso mais fácil a uma explicação do fenômeno. Consegui investigar a influência da luz em corpos eletrostaticamente carregados. [...] Carregando negativamente uma

placa e um eletroscópio, que não podem ser atingidos por radiação luminosa, as folhas de ouro começam a se colapsar rapidamente assim que a luz atinge a placa; para uma carga positiva, esse colapso não ocorre à primeira vista, mas após um período mais longo em uma quantidade perceptível (Hallwachs, 1888a, p. 301-302).

No primeiro teste experimental, Hallwachs (1888a) observou que um disco metálico de zinco, com 8,0 cm de diâmetro, recém-polido, isolado e conectado a um eletroscópio de folha de ouro simples, perdia imediatamente sua carga elétrica ao ser negativamente carregado e depois exposto à luz ultravioleta de uma lâmpada de mercúrio (Hg). No entanto, quando a placa de zinco estava carregada positivamente, nenhum colapso imediato era observado, exceto atribuído à dispersão comum após um longo período de tempo (cf. Figura 6).

Figura 6 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hallwachs (1888a) para investigação do efeito da luz ultravioleta sobre uma placa de zinco eletrostaticamente carregada utilizando um eletroscópio de folha de ouro simples.

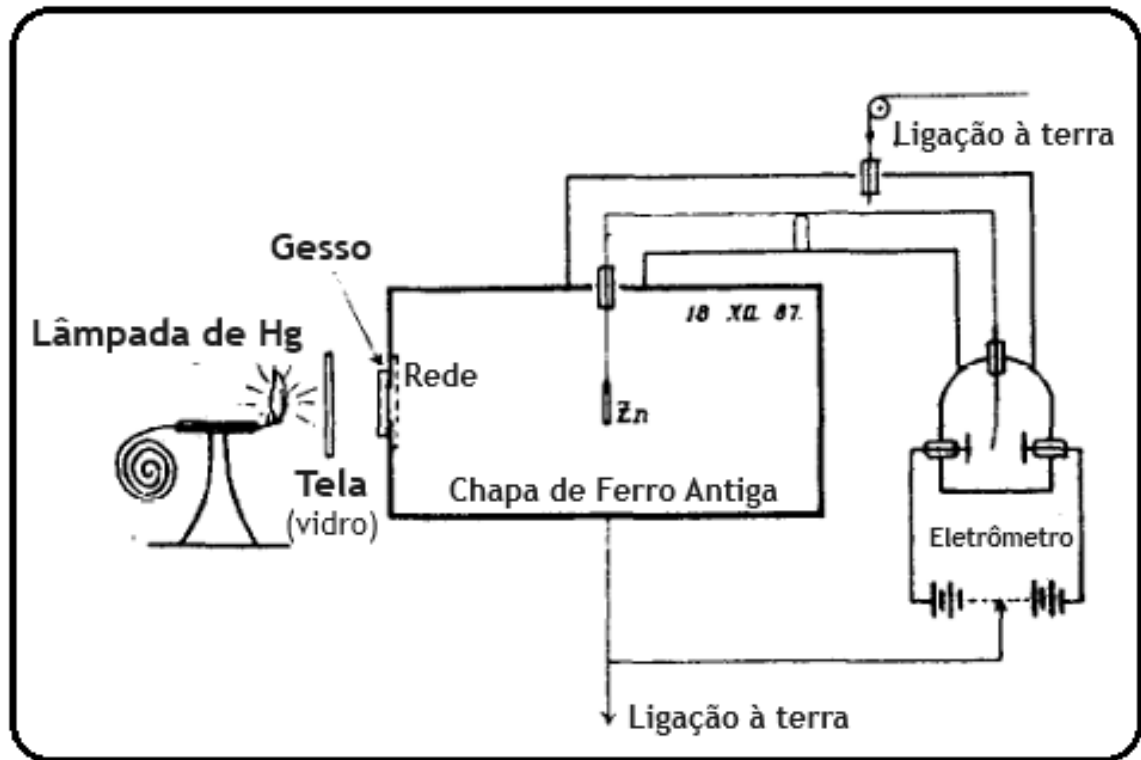


Nota: Na figura, é possível identificar a anotação de 27/11/1887, data da realização do teste experimental.
Fonte: Adaptado pelos autores para fins didáticos de Bonzel e Kleint (1995, p. 112).

Figura 7 - Representação esquemática original do aparato experimental usado por Hallwachs (1888b) para investigação do efeito da luz ultravioleta sobre uma placa de zinco eletrostaticamente neutra utilizando um eletrômetro sensível.

No segundo experimento, em vez de descarregar o disco metálico de zinco, o objetivo era mostrar o efeito oposto, ou seja, carregá-lo eletricamente. Hallwachs (1888a) observou que uma placa de zinco eletricamente neutra, ligada a um eletrômetro, suspensa e isolada dentro de uma caixa metálica, adquiria um pequeno potencial positivo quando iluminada por luz

ultravioleta. Esse potencial, que podia ser mensurado, indicava a perda de certa quantidade de carga elétrica negativa²⁰ (cf. Figura 7). Os resultados mostraram um potencial máximo de +0,5 volts para o alumínio, +1,0 volts para o latão, e um potencial um pouco maior para o zinco.



Nota: Na figura, é possível identificar a anotação de 18/12/1887, data da realização do teste experimental.

Fonte: Adaptado pelos autores para fins didáticos de Bonzel e Kleint (1995, p. 112).

Em essência, esses primeiros resultados obtidos por Wilhelm Hallwachs confirmaram a hipótese de que o “efeito Hertz” causava uma espécie de “dispersão elétrica”, não deixando dúvidas de que corpos neutros ou negativamente carregados, ao serem expostos à luz ultravioleta, liberam certa quantidade de eletricidade negativa que se dispersa no ar ou gás circundante, até que um limite de carga positiva seja alcançado na superfície do corpo iluminado. Consequentemente, o gás circundante se torna um condutor unipolar (negativamente carregado), capaz de anular a carga positiva de outro objeto ou fornecer uma carga negativa adicional a outro objeto inicialmente neutro²¹.

Heinrich Hertz tomou conhecimento dos resultados obtidos por Hallwachs e os mencionou em uma carta para seus pais datada de 29 de janeiro de 1888:

²⁰ Em outra publicação, três meses depois, Hallwachs descreveu os procedimentos e os resultados desse segundo experimento de forma mais detalhada. cf. Hallwachs (1888b, 1888c).

²¹ A eletrização positiva de corpos neutros por iluminação foi observada quase simultaneamente e de forma independente por Augusto Righi (1888) e Wilhelm Hallwachs (1888a); a prioridade na descoberta do fenômeno é atribuída a Righi, enquanto Hallwachs foi o primeiro a fornecer a interpretação correta para a observação (Schweidler, 1904).

Dois artigos sobre a ação da luz na descarga também foram publicados na edição mais recente, um de autoria do jovem Wiedemann [filho de Eilhard Wiedemann (1852-1928), professor de Física em Leipzig de 1878 a 1886] e o outro de um docente privado, Dr. Hallwachs, em Leipzig. Especialmente esse último vai muito além das minhas investigações, e assim, de certa forma, eu praticamente repassei esse problema para toda a comunidade científica. Tenho que me contentar por ter previsto isso, e também por ter alcançado o que eu queria (*apud* Bonzel; Kleint, 1995, p. 114).

Hallwachs continuou suas investigações, embora com algumas interrupções entre 1890 e 1894 em razão de suas responsabilidades como professor assistente. Ele investigou a hipótese de que as emissões fotoelétricas pudessem estar relacionadas ao tipo de metal utilizado na placa de seus experimentos. Nesse período, determinou o valor da “função trabalho” e da “fadiga fotoelétrica” para diversos metais, sendo esta última definida como a perda da sensibilidade fotoelétrica do material. Por algum tempo, alguns cientistas passaram a designar o recém-observado “efeito Hertz” também como “efeito Hallwachs”. Com o passar dos anos, Hallwachs tornou-se reconhecido especialista nessa área de pesquisa, estabelecendo, na Universidade de Dresden (Alemanha), na qual havia assumido a cátedra de professor de Física a partir de 1893, uma duradoura tradição de pesquisa local sobre os fenômenos fotoelétricos. Hallwachs resumiu suas contribuições científicas realizadas até 1914 em seu tratado *A eletricidade da luz* (Bonzel; Kleint, 1995).

Ainda em 1888, o físico russo Aleksandr Grigorievich Stoletow, na Universidade de Moscou, influenciado pelas recentes publicações de Hertz (1887) e Hallwachs (1888a, 1888b, 1888c), concebeu a ideia de explorar se um efeito semelhante poderia ser obtido por um método mais simples, cujas medições pudessem ser mais acessíveis com eletricidade de baixo potencial.

O arranjo experimental projetado por Stoletow consistia em duas placas metálicas (ambas com 22 cm de diâmetro), uma de tela metálica e outra sólida, posicionadas verticalmente uma em frente à outra. Com um galvanômetro sensível introduzido no circuito, o polo positivo de uma bateria foi conectado à placa de tela metálica e o polo negativo à placa sólida. A placa sólida foi iluminada por uma lanterna com arco voltaico alimentada por um dínamo de 12 ampères e 70 volts. Nessas condições, uma corrente elétrica²² foi obtida e permaneceu constante enquanto a radiação ultravioleta incidia sobre a placa sólida (negativa). Ao inverter as conexões da bateria, o galvanômetro mostrou apenas uma pequena deflexão, indicando que a iluminação na tela metálica (positiva) não era eficaz e que a corrente elétrica definitivamente se tratava de um fluxo de eletricidade negativa. Assim, nessas condições, o arranjo possibilitava uma

²² Também denominada como “fotocorrente” ou “corrente fotoelétrica”.

investigação dos efeitos da luz ultravioleta na fotocorrente de forma controlada e sistemática (Stoletow, 1888a).

Stoletow ressaltou que a limpeza e área iluminada das placas metálicas, assim como a intensidade do arco voltaico, influenciavam a magnitude da fotocorrente elétrica produzida. Com base em sua análise de dados, concluiu que:

- (1) Se a superfície iluminada for reduzida (cobrindo $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ com o auxílio de uma tela opaca), a fotocorrente é reduzida proporcionalmente;
- (2) Quando a distância (L) entre as placas é alterada, a fotocorrente elétrica também varia; no entanto, não em uma relação proporcionalmente inversa, mas, em vez disso, parece seguir a lei $i = \frac{E}{a+b.L}$;
- (3) Quando a força eletromotriz (E) que carrega eletricamente as placas é aumentada, a fotocorrente aumenta constantemente; enquanto (E) é pequeno (até 2 volts), é diretamente proporcional e, para valores maiores de (E), aumenta mais lentamente. A resistência aparente da camada de ar circundante às placas parece, assim, aumentar com a força eletromotriz (Stoletow, 1888a, p. 318).

Stoletow (1888a) notou que nenhuma fotocorrente era registrada pelo galvanômetro quando a placa sólida era carregada com carga positiva pela força eletromotriz (E) fornecida pela bateria. Esse resultado o levou a considerar a hipótese de que o efeito poderia ser reproduzido em qualquer circuito, mesmo sem uma bateria de alimentação, desde que existisse uma diferença de eletropositividade entre as placas. Nessa configuração, Stoletow (1888a) conseguiu obter uma fotocorrente utilizando uma placa de zinco perfurada como tela metálica e uma placa sólida de cobre prateado, correspondendo a uma força eletromotriz de +1,0 volt.

Stoletow (1888a) notou que nenhuma corrente elétrica era registrada pelo galvanômetro quando a placa sólida era carregada com carga positiva pela força eletromotriz (E) fornecida pela bateria. Esse resultado o levou a considerar a hipótese de que o efeito poderia ser reproduzido em qualquer circuito, mesmo sem uma bateria de alimentação, desde que existisse uma diferença de eletropositividade entre as placas. Nessa configuração, ele conseguiu obter uma corrente elétrica utilizando uma placa de zinco perfurada como tela metálica e uma placa sólida de cobre prateado, correspondendo a uma força eletromotriz de +1,0 volt.

Nos demais trabalhos publicados naquele ano, Stoletow (1888b, 1888c) apontou que o arranjo experimental concebido é análogo a um condensador de placas, no qual o ar entre as placas transmite a corrente elétrica, desempenhando um papel semelhante ao de um material dielétrico (mau condutor de eletricidade). Por isso, sugeriu que investigações adicionais se concentrassem na influência da natureza química do gás circundante e da pressão atmosférica.

De fato, naquele ano, foram publicados resultados de observações divergentes a respeito da influência da natureza e da pressão do gás que circunda o cátodo sensível à luz irradiada, os quais podem ser explicados pela diversidade das condições experimentais entre os diferentes cientistas. Hertz (1887) observou que a intensidade do efeito variava inversamente com a pressão do gás ao redor do espaçamento de centelhamento, alcançando um máximo em uma dada “pressão crítica” (em torno de 300-400 mmHg), cujo valor depende da diferença de potencial aplicada. Por outro lado, os resultados de Wiedemann e Ebert (1888a, 1888b) indicaram que, após atingir essa “pressão crítica”, o efeito diminuía novamente com a redução progressiva da pressão do gás, desaparecendo em pressões muito baixas (em torno de 100 mmHg). No entanto, este último resultado contestado por Righi (1890a), que mostrou que o efeito ainda era detectável na menor pressão alcançada. Além do mais, verificou-se que a natureza química dos gases exercia influência significativa, sendo o efeito mais pronunciado em CO₂, tornando-o perceptível até mesmo com luz visível²³.

Nos três anos seguintes, Aleksandr Stoletow publicou outros quatro trabalhos sobre a produção de correntes elétricas sob a influência de raios ultravioletas – denominadas por ele de “correntes actínio-elétricas” – e sua transmissão através do ar rarefeito (Stoletow, 1889a, 1889b, 1889c, 1890). Entre os principais resultados encontrados, destaca-se a observação importante, embora pouco conhecida, de que a criação de um estado estacionário com o início ou a interrupção súbita da iluminação ocorria em um tempo imensuravelmente pequeno. Ou seja, empregando uma luz que seja reconhecidamente capaz de provocar uma emissão fotoelétrica, observou-se que não há um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz incide sobre a superfície metálica e o surgimento da corrente fotoelétrica (Stoletow, 1889a, 1889b). Esse resultado, a princípio, surpreendeu Stoletow e outros cientistas, pois, no caso de uma luz muito fraca incidir sobre a superfície metálica, seria esperado algum intervalo de tempo antes que a energia absorvida pelo metal atingisse uma quantidade mínima para desencadear o efeito fotoelétrico. Na época, essa aparente contradição levou muitos cientistas a acreditarem na inexistência de um processo de transferência de energia entre luz e matéria.

Simultaneamente às pesquisas de Wilhelm Hallwachs e Aleksander Stoletow, físico italiano Augusto Righi, na Universidade de Pádua, conduzia outra investigação experimental

²³ Os resultados de observações discrepantes não se restringiam apenas à influência da natureza química e pressão do gás, mas também quanto ao efeito da temperatura. Foi constatado que, em células de potássio (K), a sensibilidade aumenta com a temperatura; por outro lado, para o zinco (Zn), observou-se uma diminuição da sensibilidade no intervalo entre 18° e 55°C (Hoor, 1888, 1889). De maneira ainda mais divergente, Stoletow (1889a) encontrou um comportamento irregular da sensibilidade com a temperatura no platina (Pt). Ele observou um aumento na sensibilidade quando o material foi aquecido a cerca de 200°C, mas também surgiram máximos e mínimos secundários.

sobre o efeito da luz ultravioleta em corpos sólidos eletrizados. Righi trabalhava há cerca de 10 anos em uma extensa série de pesquisas sobre descargas elétricas no ar e no vácuo, um tema explorado de diversas formas até o fim de sua vida.

Em 6 de março de 1888, Augusto Righi apresentou um breve relatório à *Reale Accademia dei Lincei* (“*Nota Preliminare*”) de sua pesquisa recente sobre ação da luz ultravioleta em metais²⁴. No relatório, são detalhados o arranjo experimental empregado e a observação de que placas metálicas, recém-polidas, de diferentes materiais (alumínio, zinco, cobre e latão), negativamente carregadas ou eletricamente neutras, atingiam potenciais elétricos positivos sob iluminação de radiação ultravioleta proveniente de uma lâmpada de mercúrio (Hg). Ele afirmou que o aumento da superfície e a redução da distância em relação à fonte de radiação produziam uma manifestação fotoelétrica mais significativa. Fontes luminosas de arco elétrico de magnésio ou de carbono e zinco mostraram-se bastante eficazes. Todavia, assim como Hertz (1887) e Hallwachs (1888a), não observou nenhum efeito perceptível utilizando luz solar como fonte de radiação. Em suas palavras:

Buscando a explicação para os fenômenos recentemente estudados por Hertz [1887], E. Wiedemann e Ebert [1888] e Hallwachs [1888], fui levado a estudar a ação da luz nos fenômenos da eletricidade de contato entre metais, e aqui está um breve resumo dos primeiros resultados obtidos. Um disco metálico vertical A pode ser posicionado mais ou menos próximo a uma malha metálica B esticada paralelamente ao disco. Essa disposição foi por mim idealizada com o propósito de possibilitar a iluminação de partes de um dos metais que estão muito próximas ao outro metal. Um dos dois metais, por exemplo, A, está conectado a uma das duplas de quadrantes de um eletroscópio de sensibilidade adequada (em que 1 volt corresponde a uma deflexão de cerca de 130 subdivisões da escala). O outro metal B se conecta à outra dupla de quadrantes e à terra, enquanto a agulha do instrumento é mantida a um potencial constante (com uma célula de cobre-água-zinco). Se, por um instante, permitimos que A também se comunique com a terra e, em seguida, o iluminamos intensamente, obtemos uma deflexão [da agulha do eletroscópio] que aumenta até atingir um valor definitivo. Esse valor é alcançado quanto mais perto estiver a fonte luminosa e quanto mais extensas forem as duas superfícies metálicas. A deflexão é negativa se A for zinco e B for latão, e o mesmo valor final é obtido se A for carregado primeiro para ter uma deflexão maior. Se A estiver muito próximo de B, a deflexão, uma vez formada, não varia significativamente se A se afasta subitamente de B, o que prova que os dois metais são reduzidos pela luz ao mesmo potencial²⁵ (Righi, 1888, “*Nota Preliminare*”, p. 186-187).

O termo “fotoelétrico” aparece nas publicações científicas pela primeira vez nesse relatório de Augusto Righi, para então designar o novo fenômeno estudado: “O sistema dos

²⁴ Os resultados das investigações de Augusto Righi foram relatados e registrados progressivamente ao longo do ano de 1888 nas atas dos encontros da *Reale Accademia dei Lincei* (Righi, 1888, p. 185-187).

²⁵ De acordo com a descrição de Augusto Righi, a deflexão constante obtida deveria provavelmente ser uma medida da força eletromotriz de contato (f.e.m.) entre os metais.

dois metais A e B, quando iluminados, comporta-se assim como um par voltaico, que pode ser chamado de ‘*par fotoelétrico*’” (Righi, 1888, Nota Preliminare, p. 186, grifo do original).

De acordo com os registros documentais da época, nota-se uma situação de competitividade científica na fase inicial das investigações sobre os fenômenos fotoelétricos, incluindo disputas pela reivindicação de prioridades nas observações experimentais (cf. Righi, 1889b, 1890b; Hallwachs, 1890; Stoletow, 1889c). Nesse contexto, a denominação alternativa de Righi para o novo fenômeno parece objetivar, sobretudo, a reivindicação para si da primazia das observações dos efeitos da luz ultravioleta em corpos sólidos negativamente carregados ou neutros.

Nas reuniões subsequentes daquele ano, Augusto Righi relatou que tentativas de observar o efeito fotoelétrico em placas carregadas positivamente foram realizadas, mas sem sucesso (Notas II e III), seguindo o exemplo de Hallwachs (1888a, 1888b, 1888c). Além disso, apontou que o efeito não se limita a metais, podendo ocorrer em diversos materiais. Alguns isolantes, como o enxofre e a ebonite (borracha-preta), adquiriram certa quantidade de carga elétrica positiva quando expostos à radiação ultravioleta (Notas IV e V) (Righi, 1888).

2.2.2.2 A Hipótese de “Convecção Fotoelétrica”

Embora a natureza da eletricidade fosse objeto de controvérsias científicas no fim do século XIX, as investigações experimentais de Hallwachs, Stoletow e Righi ajudaram a estabelecer, de maneira conjunta, que a iluminação de superfícies metálicas com luz ultravioleta iniciava um fluxo de eletricidade negativa para fora dessas superfícies. Hallwachs (1888a) sugeriu a seguinte explicação para o mecanismo da influência da luz ultravioleta em corpos sólidos eletricamente carregados:

Portanto, é justificado assumir que as superfícies das placas de metal, limpas e carregadas negativamente, quando expostas à luz [ultravioleta], são alteradas de tal maneira que *partículas elétricas negativas*²⁶ emergem delas e seguem as forças eletrostáticas do campo. [...] §5. Como nosso fenômeno é causado por um processo na superfície das placas e como a resposta é bastante diferente para eletricidade positiva e negativa, parece-me mais provável que de alguma forma ocorra uma separação de eletricidades na superfície (Hallwachs, 1888a, p. 302, 311, grifo nosso).

²⁶ Nota-se que Hallwachs empregou a expressão “partículas elétricas negativas” em seu artigo de 1888, sinalizando um apoio à “teoria do elétron” (como partícula elementar) do físico britânico J. J. Thomson. No entanto, naquela época, a aceitação da natureza corpuscular da eletricidade ainda era controversa na comunidade científica alemã.

Hallwachs, Righi e Stoletow compartilhavam a ideia de que o fluxo de eletricidade era constituído por partículas elétricas negativas liberadas durante a incidência da radiação ultravioleta, ou seja, o fluxo de eletricidade estava relacionado a algum tipo de dissociação de átomos ou moléculas. Para eles, a “dispersão fotoelétrica” de cargas negativas e a eletrização positiva de corpos iluminados decorria de um processo de “convecção fotoelétrica”, formada por partículas que eram átomos ou moléculas negativamente carregadas do gás circundante e aderente às superfícies metálicas, que, por algum motivo desconhecido, era causado ou acelerado pela radiação ultravioleta (Merritt, 1896a, 1896b; Schweidler, 1904).

Righi (1888) justificou essa conclusão com base em um dos resultados dos testes experimentais realizados no início de suas investigações sobre o efeito fotoelétrico. Utilizando o mesmo aparato inicial, que consistia em um disco metálico vertical A posicionado mais ou menos próximo a uma malha metálica B esticada paralelamente ao disco, Righi inseriu uma placa isolante de gesso entre o disco e a malha, observando que a placa de gesso se tornava negativamente carregada no lado mais próximo do disco metálico de zinco. Se duas placas de gesso fossem usadas, apenas aquela mais próxima do disco tornava-se carregada. Essas observações podiam ser explicadas pela hipótese de “convecção fotoelétrica”. Além disso, Stoletow (1890) realizou vários testes experimentais com o objetivo de analisar a influência da redução da pressão atmosférica sobre a corrente fotoelétrica. Em sua maioria, os resultados estavam em consonância com as observações do físico italiano (Merritt, 1896a).

No entanto, do ponto de vista da análise fenomenológica, os três cientistas possuíam interpretações distintas em relação à origem das partículas envolvidas na “convecção fotoelétrica”, bem como em relação ao papel desempenhado pelo gás circundante às placas metálicas no surgimento do fluxo de partículas elétricas negativas. Conforme a teoria da época sobre os processos elétricos em gases rarefeitos, três hipóteses principais ainda eram consideradas para a natureza dos portadores da carga elétrica negativa: 1. Moléculas do gás; 2. Partículas, possivelmente moléculas ou átomos do objeto iluminado; 3. Íons do gás (Merritt, 1896a, 1896b; Schweidler, 1904).

A primeira hipótese [moléculas do gás] foi defendida por Max von Hoor (1888, 1889). Ele sugeriu que a luz removeria camadas de gás condensado nas superfícies de corpos fotoeletricamente sensíveis, e que as moléculas liberadas carregariam uma carga negativa. No entanto, Righi (1889a) demonstrou experimentalmente que a remoção de camadas de gás condensado não elimina a sensibilidade fotoelétrica de uma superfície, indicando que essa hipótese não explica muitas das características fundamentais da fotoeletricidade, nem oferecia recursos para aprofundar a compreensão do fenômeno ou promover avanços heurísticos na área.

A segunda hipótese [moléculas ou átomos do objeto iluminado] sugeria que a pulverização da superfície iluminada era o fenômeno básico da “dispersão fotoelétrica”. Em suas investigações iniciais com folhas de ouro, prata e cobre, Lenard e Wolf (1889) esperavam identificar a perda de partículas por meio de alterações na capacidade óptica de transmissão desses materiais. Após uma exposição de 50 horas desses materiais à intensa radiação ultravioleta, os pesquisadores observaram que as áreas não protegidas se tornavam ásperas, irregulares e com rugosidades e, em alguns casos, a radiação foi capaz até mesmo de pulverizar essas áreas. Esses resultados sugeriam que partículas de metal efetivamente transportavam a carga elétrica negativa para fora das folhas sob a influência da radiação ultravioleta. Entretanto, dez anos depois, Lenard (1900a) mostrou que, no caso de uma superfície de sódio (Na), altamente sensível à luz visível, os átomos de sódio não poderiam ser os portadores da corrente fotoelétrica. Se essa suposição fosse verdadeira, uma quantidade detectável de sódio deveria se depositar no ânodo em uma configuração experimental específica, o que não ocorreu, pois nenhuma reação espectral de sódio foi detectada. Assim, a suposição de que partículas maiores, e não átomos, fossem os portadores de carga elétrica negativa foi descartada por esse argumento.

A terceira hipótese [íons gasosos] foi inicialmente proposta por Righi, Stoletow e outros (e.g. Arrhenius, 1887, 1888; Schuster, 1889). Foi sugerido que a emissão fotoelétrica, na verdade, não ocorria diretamente pela ação da luz ultravioleta nos átomos da superfície metálica, mas estaria associada à influência direta da radiação na condutibilidade do ar ou gás circundante das placas metálicas, fossem elas negativamente carregadas ou neutras. Em outras palavras, foi sugerida a ideia de que a radiação ultravioleta provocava a ionização direta do gás na vizinhança da placa metálica e uma condensação de íons negativamente carregados sobre a placa. Em virtude da diferença de potencial de contato entre o gás condutor condensado e a placa metálica, uma quantidade de carga elétrica era repelida da placa, originando um fluxo de eletricidade negativa que podia ser mensurado (Merritt, 1896a; 1896b; Bonzel; Kleint, 1995). Essa hipótese foi testada e confirmada por Righi (1888), que observou um pequeno movimento do cátodo, desde que estivesse suficientemente móvel, causado pela repulsão eletrostática entre as cargas negativas do gás e da superfície do cátodo.

Baseando-se nesses resultados, desenvolveu-se, assim, a teoria segundo a qual uma intensa radiação ultravioleta destrói uma camada dupla na superfície metálica, resultando em uma carga positiva no objeto iluminado e uma carga negativa no gás circundante. Isso explicava o caráter unipolar da “dispersão fotoelétrica”, bem como a eletrização positiva de corpos não carregados.

Todavia, outras experiências mostravam-se difíceis de serem explicadas com base na hipótese de “convecção fotoelétrica”. Hallwachs, por exemplo, não era adepto à hipótese de importância primária do gás próximo às placas metálicas para ocorrência das emissões fotoelétricas. Em uma de suas investigações experimentais concebidas para testar essa hipótese, duas placas metálicas foram posicionadas paralelamente, mantendo-se uma distância de 3 cm entre elas. Ambas foram carregadas negativamente e conectadas a um eletroscópio. Quando a radiação ultravioleta emitida por uma lâmpada de mercúrio (Hg) passava entre as placas, tangenciando as superfícies, quase nenhum efeito era observado. No entanto, se as placas fossem giradas em 90°, de modo que uma delas recebesse a radiação diretamente, sua carga elétrica começava a diminuir imediatamente, sugerindo que a ação da luz ultravioleta ocorria nos átomos da superfície metálica e que, se o meio exercia algum tipo de influência nos fenômenos fotoelétricos, ela era apenas de importância secundária (Merritt, 1896a).

Além disso, alguns cientistas levantaram objeções à perspectiva de Righi (1889a) de que as partículas de ar condensado se carregavam eletricamente na superfície ou com a luz ultravioleta e, imediatamente, eram repelidas. Eles argumentaram que era impossível que moléculas gasosas adquirissem cargas elétricas, ao contrário de moléculas de vapor d’água ou partículas de poeira.

No final da década de 1890, o físico francês Eugène Édouard Désiré Branly (1844-1940) observou que a radiação de comprimento de onda curto (cerca de 200-300 nm) também era capaz de provocar a “dispersão fotoelétrica” de cargas positivas, e não somente de cargas negativas (Branly, 1890, 1891). A hipótese de que partículas de poeira desempenhavam um papel relevante nos fenômenos fotoelétricos emergiu como uma interpretação possível para esse resultado inesperado. Considerou-se que partículas de poeira suspensas no gás, sob a influência da radiação ultravioleta, poderiam liberar eletricidade negativa no gás circundante, permanecendo carregadas positivamente. De fato, era sabido que um pó composto de substâncias fotossensíveis exibia fenômenos semelhantes, equivalentes à ionização de um gás (Merritt, 1896a, 1896b; Schweidler, 1904).

Lenard (1900c) discutiu essa interpretação e a rejeitou. No entanto, outros cientistas não concordaram que seus argumentos eram totalmente convincentes. J. J. Thomson (1903, p. 214-215) considerou a hipótese de partículas de poeira (ou vapor d’água) como provável. Ele afirmou que segundo as medições realizadas por Lenard (1900c) em experimentos com objetivo de demonstrar a ionização direta de um gás pela luz ultravioleta, foi observado, nesse caso, que os íons positivos possuem uma velocidade específica extremamente baixa (cerca de $\frac{1}{2000}$ da

velocidade dos íons negativos), sugerindo esses íons positivos não são idênticos aos íons moleculares normalmente presentes nos gases, o que poderia indicar eles podem ser partículas de poeira ou gotículas de água.

Diante dessas observações e interpretações divergentes, vários cientistas se dedicaram, nos anos seguintes, na tentativa de resolver o enigma da natureza e origem dos portadores de carga elétrica negativa nas emissões fotoelétricas, a analisar as trajetórias dessas partículas em um campo eletromagnético e determinar sua relação carga-massa (Wheaton, 1978). Em pouco tempo, com base em diversos resultados experimentais, a ideia de que impurezas acidentais no gás (poeira ou vapor d'água) desempenhavam um papel significativo nos fenômenos fotoelétricos foi prontamente descartada (Schweidler, 1904).

Em trabalhos de revisão bibliográfica da época, Merritt (1896a, 1896b) e Schweidler (1904) sintetizam os resultados das pesquisas de Righi, Stoletow, Lenard e Wolf, Hoor, J. J. Thomson, entre outros, afirmando que grande parte das observações fornecem suporte empírico à hipótese de que o efeito fotoelétrico se deve a um processo de “convecção fotoelétrica”. Além disso, os autores destacam que os resultados das investigações conduzidas por Bichat e Blondlot (1888) também fornecem suporte à hipótese de “convecção fotoelétrica”. Utilizando um arranjo experimental idêntico ao de Righi (1888), o disco metálico foi exposto a um fluxo de ar, ora por meio de ventilação, ora pela liberação controlada de ar comprimido. Eles observaram um aumento expressivo no potencial elétrico e na intensidade da corrente fotoelétrica se um forte fluxo de ar atinge o cátodo iluminado, chegando a seis ou oito vezes o valor inicial. Esses resultados sugeriam que a explicação para o fenômeno poderia residir na maior propensão à ocorrência de “convecção fotoelétrica” sob a influência do fluxo de ar.

O conjunto de informações até aqui apresentadas aponta para a conclusão de que nos primeiros anos de investigações experimentais sobre o efeito fotoelétrico, tornou-se amplamente aceita a visão de que o surgimento do fluxo de eletricidade negativa estava associado a algum tipo de processo de caráter convectivo, embora ainda com controvérsias vigentes a respeito da natureza e origem dos portadores de carga.

De fato, cerca de uma década depois da descoberta de Hertz (1887), a controvérsia científica sobre a origem das partículas portadoras de carga na descarga de corpos eletrizados sob luz ultravioleta ainda não seria completamente resolvida. No entanto, em suas conclusões, Merritt (1896a) ressalta que os resultados mais recentes parecem apontar para a validade da hipótese de que a influência do gás é de importância secundária para a ocorrência dos fenômenos fotoelétricos, com a origem das partículas eletrizadas na própria superfície metálica. Em suas palavras:

Resumindo os resultados em relação à “convecção fotoelétrica”, parece que quase todos os observadores concordam com a crença de que a carga negativa é removida por algum tipo de convecção. Se as partículas que removem a carga provêm do ar, da camada gasosa condensada ou do material do próprio corpo, ainda está em disputa. Parece-me que a maior parte das evidências favorece a última hipótese. No entanto, não devemos esquecer a possibilidade de que os fenômenos possam ser complicados pela condução eletrolítica no meio que envolve o corpo carregado (* Em um artigo inicial, Arrhenius sugeriu que o ar conduzia eletrólise sob a influência de raios ultravioleta) (Merritt, 1896a, p. 865).

Todavia, quatro anos depois, na virada do século XX, Merritt e Stewart (1900) descreveram o contexto histórico-científico-tecnológico das pesquisas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico da seguinte forma:

Já é sabido há muito tempo que a descarga de eletricidade negativa, sob a influência da luz ultravioleta, é o resultado de convecção [fotoelétrica]. Todos os observadores concordam com a conclusão de que partículas negativamente eletrificadas de algum tipo atuam como transportadoras da carga que escapa; se essas partículas provêm do ar circundante, da camada de gás condensado sobre a superfície eletrificada ou do próprio material do corpo carregado, ainda não é conhecido definitivamente (Merritt; Stewart, 1900, p. 230).

A semelhança entre ambas as citações, durante o período de 1896 e 1900, sugere uma carência de avanços científicos significativos sobre a controvérsia da origem das partículas eletrificadas na descarga de corpos eletrizados sob luz ultravioleta. Nesse contexto, os experimentos realizados por Righi (1890a), J. J. Thomson (1894, 1897, 1899), Lenard (1900a, 1900b, 1900c) e, um pouco mais tarde, de forma independentemente, por Merritt e Stewart (1900), foram de grande relevância para a elucidação da natureza dos portadores de carga nos fenômenos fotoelétricos.

Em suas pesquisas sobre movimento de partículas portadoras de cargas na “convecção fotoelétrica”, Righi (1890a) evidenciou que, em gases muito rarefeitos, as trajetórias das partículas emitidas pela ação da luz ultravioleta não seguem as linhas de força do campo elétrico como em experiências com pressões normais, mas se tornam mais lineares e alinhadas com a linha normal à superfície metálica, da mesma forma que um feixe de raios catódicos.

De acordo com a interpretação de Righi (1890a), esse resultado indicava que o fluxo de eletricidade negativa emitido por uma “dispersão fotoelétrica”, em virtude da incidência de luz ultravioleta em uma superfície metálica, possuía propriedades peculiares idênticas às de um feixe de raios catódicos emitidos nos tradicionais experimentos conduzidos em tubos de descargas elétricas com gases rarefeitos (“tubos de Crookes”). De outro modo, esses resultados levaram-no a inferir que os “raios fotoelétricos” poderiam ser da mesma natureza elétrica dos já conhecidos “raios catódicos”, embora ainda estivesse em disputa se essa natureza era ondulatória ou corpuscular.

Aparentemente, esses importantes resultados encontrados por Righi (1890a) não foram amplamente reconhecidos pela comunidade científica. Foi somente cerca de dez anos mais tarde que outros cientistas souberam desses resultados e retomaram a discussão. Com base em medições da razão carga/massa para os portadores de carga elétrica em baixa pressão, Lenard (1900a, 1900b, 1900c) e Merritt e Stewart (1900) forneceram suporte à hipótese de que os “raios fotoelétricos” seriam uma variedade de “raios catódicos”, porém bastante lentos. Essa hipótese foi testada e confirmada por J. J. Thomson (1894, 1897, 1899, na Inglaterra), Jean Perrin (1895, na França) e Wilhelm Wien (1897, na Alemanha). Por exemplo, o físico britânico afirmou:

O artigo a seguir apresenta um relato das medidas de e/m [carga/massa] para a eletrificação negativa descarregada pela luz ultravioleta, bem como de e/m para a eletrificação negativa produzida por um filamento de carbono incandescente em uma atmosfera de hidrogênio. Posso antecipar a descrição desses experimentos ao afirmar que eles levam à conclusão de que o valor da razão e/m no caso da luz ultravioleta, bem como no caso do filamento de carbono, é o mesmo que para os raios catódicos” (Thomson, 1899, p. 548).

Esses estudos levaram à conclusão inequívoca de que os “raios catódicos”, que aparecem como um efeito secundário da descarga elétrica em gases rarefeitos, eram da mesma natureza elétrica do feixe de partículas emitidos de superfícies metálicas sob a incidência de luz ultravioleta (“raios fotoelétricos”). Reconheceu-se que ambos os raios podiam ser defletidos por campos eletromagnéticos e eram constituídos de partículas negativamente carregadas com relação constante de carga/massa. Em essência, concluiu-se que os dois fenômenos se diferenciavam apenas em relação ao tipo de processo de geração e na velocidade inicial das partículas emitidas (Wheaton, 1978).

Nesse contexto histórico-científico-tecnológico da virada do século XX, as investigações científicas sobre as propriedades do efeito fotoelétrico no vácuo²⁷ (cerca de 0,001 mmHg), bem como sobre a propagação dos raios catódicos em tubos de descargas elétricas com gás muito rarefeito, proporcionavam novas maneiras experimentais para explorar tanto a natureza da eletricidade quanto da estrutura atômica. Isso possibilitou a unificação dessas duas áreas de pesquisas até então consideradas distintas e a consolidação da “teoria do elétron” que, por um lado, considera a emissão de elétrons negativos pela superfície iluminada como o

²⁷ Certamente, tal vácuo não pode ser considerado teoricamente como absoluto, mas somente como o mais alto grau de rarefação tecnicamente possível na época. No entanto, como pequenas variações absolutas de pressão (por exemplo, resfriando um recipiente do sistema em uma mistura refrigerante) são percentualmente muito significativas, os cientistas concluíram que, devido à sua falta de influência, os resíduos de gás remanescentes no arranjo experimental não estão diretamente envolvidos na produção de raios catódicos por luz ultravioleta, mas apenas modificam sua intensidade à medida que a densidade aumenta (Schweidler, 1904).

fenômeno fundamental das emissões fotoelétricas, e, por outro lado, modificou e precisou consideravelmente as concepções sobre a natureza dos íons gasosos.

2.2.2.3 A Difícil Observação do Efeito Fotoelétrico com Luz Solar

A publicação de Hertz (1887) também chamou a atenção de dois professores de física da educação básica: Julius Johann Philipp Elster (1854-1920) e Hans Friedrich Karl Geitel (1855-1923) (cf. Figura 8). As contribuições de ambos para o avanço do conhecimento científico sobre o efeito fotoelétrico incluíram investigações sobre a suscetibilidade de diversos materiais expostos à luz ultravioleta e o desenvolvimento de dispositivos instrumentais inovadores para medir a intensidade luminosa.

Desde a infância, a família de Elster e Geitel era próxima, e foram colegas de classe ao longo de todo o período educacional em Blankenburg, Alemanha. Iniciaram a graduação em Física na Universidade de Heidelberg em 1875, concluindo os estudos na Universidade de Berlin em 1878. Terminada a graduação, Geitel optou por ir morar com a mãe em Braunschweig e, uma vez qualificado, aceitou o cargo de professor de Matemática, Física e Química nas tradicionais escolas secundárias alemãs, primeiramente na “*Realschulen*” e no “*Gymnasien*” no ano seguinte. Enquanto isso, Elster escolheu retornar à Universidade de Heidelberg para defender sua tese de doutorado (PhD.), em 1879. Sob a supervisão de Georg Hermann Quincke (1834-1924), Elster conduziu um estudo sobre fenômenos elétricos em líquidos finamente dispersos. Após esse breve período de separação, em 1881, Elster e Geitel assumiram posições de professores de Física no *Gymnasium Grosse Schule*, em Wolfenbüttel, às margens do rio Oker, na Baixa Saxônia (Bonzel; Kleint, 1995; Fricke; Schlegel, 2017).

Figura 8 - Julius Elster e Hans Geitel experimentando um fotômetro rudimentar no jardim da casa de Elster.



Fonte: Fricke e Schlegel (2017, p. 2).

As investigações conduzidas por Elster e Geitel ocorreram em laboratório particular, instalado em uma segunda residência de propriedade de Elster, em Wolfenbüttel. Os interesses dos dois pesquisadores abrangiam diversos campos científicos, incluindo fenômenos elétricos em gases e líquidos, técnicas experimentais, ciência de materiais, meteorologia, fotoeletricidade, fotometria e radioatividade. Ao longo de suas trajetórias profissionais, publicaram cerca de duzentos artigos científicos, muitos dos quais buscavam aprimorar o conhecimento científico sobre o efeito fotoelétrico, destacando sua relevância para compreensão do fenômeno da “eletricidade atmosférica”, que constituía o cerne de suas pesquisas científicas (Bonzel; Kleint, 1995; Fricke; Schlegel, 2017).

Uma das questões que intrigaram Elster e Geitel na leitura do artigo de Hertz (1887) foi a aparente ausência de efeito fotoelétrico notável ao utilizar luz solar (Ver item 18 no artigo). Hertz (1887) justificou que essa observação possivelmente era decorrente da absorção da radiação ultravioleta na atmosfera, resultado de reações fotoquímicas envolvendo o ozônio e o oxigênio molecular. De fato, outras investigações também falharam em detectar qualquer ação fotoelétrica produzida pela luz solar (Hoor, 1889; Righi, 1889a; Merritt, 1896a, 1896b).

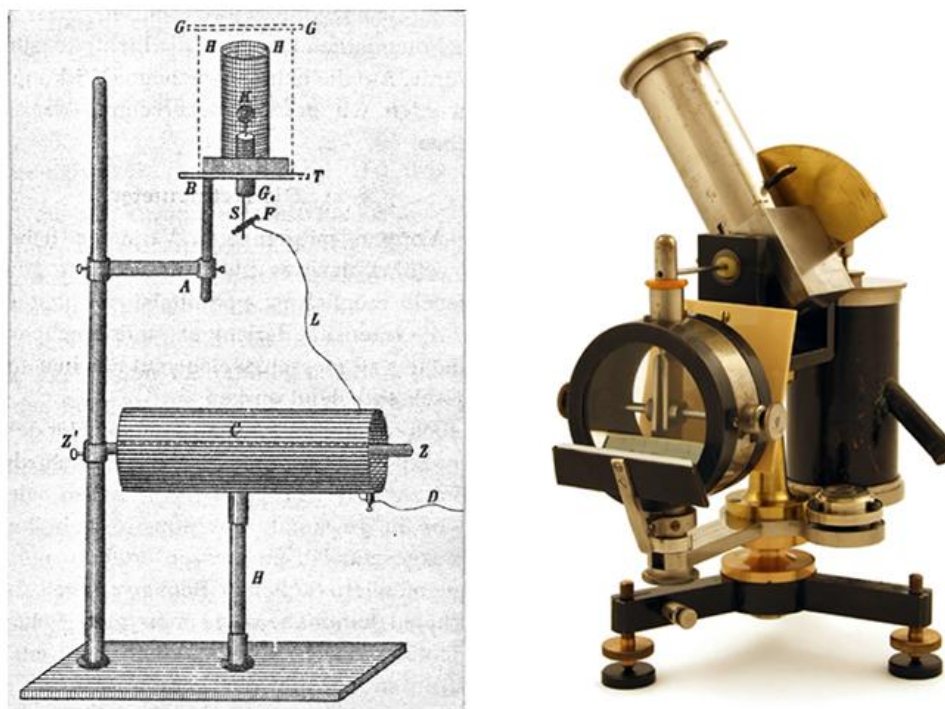
No entanto, em 1889, usando luz solar como fonte de radiação, Elster e Geitel conseguiram observar tanto o processo de descarga de eletricidade negativa quanto a geração de uma carga elétrica positiva (Elster; Geitel, 1889). Em um dos testes, uma placa de zinco (Zn), recém-polida, adquiriu um potencial elétrico positivo de +2,5 volts. Eles realizaram outros testes experimentais com diferentes materiais, incluindo metais alcalinos, nos quais tentaram reduzir a intensidade da luz no nível mais baixo possível, analisando se o efeito fotoelétrico ainda se manifestava. Placas de potássio (K), sódio (Na), magnético (Mg) e alumínio (Al) revelaram-se mais sensíveis em comparação com o zinco (Zn) e o estanho (Sn). Essa observação foi associada ao fato de os primeiros serem elementos mais eletropositivos (Merritt, 1896b, Bonzel; Kleint, 1995; Elster; Geitel, 1889, 1891a).

Entre 1889 e 1894, Elster e Geitel publicaram vários artigos relacionados à eletricidade atmosférica e ao aspecto meteorológico dos fenômenos de descarga elétrica negativa. Com suas pesquisas, tornaram-se pioneiros no desenvolvimento de dispositivos para medir a intensidade actínia²⁸ da radiação proveniente do sol com base no efeito fotoelétrico em superfícies metálicas, sendo os criadores do “fotômetro” (cf. Figura 9). Ainda, inventaram um método inovador de criar células elétricas altamente sensíveis de amalgamas de zinco (Zn), rubídio

²⁸ A intensidade actínia refere-se à quantidade de luz solar capaz de realizar uma reação fotoquímica específica, geralmente relacionada à fotossíntese ou a outras reações sensíveis à luz. Portanto, medir a intensidade actínia da luz solar significa avaliar a quantidade de luz disponível para desencadear determinadas reações fotoquímicas.

(Rb), sódio (Na) e potássico (K), cuja deterioração da superfície era praticamente inexistente (Merritt, 1896b; Elster; Geitel, 1889, 1891b; Bonzel; Kleint, 1995).

Figura 9 - Fotômetro de esfera de zinco e uma versão mais recente (1902).



Nota: À esquerda, tem-se um fotômetro de esfera de zinco, também conhecido como “actinômetro”, projetado por Elster e Geitel. Consiste em uma esfera de zinco amalgamada protegida da luz, conectada a um eletrômetro por meio de um capacitor. Antes do uso, a esfera é cuidadosamente limpa. Então o sistema é carregado negativamente, a incidência de luz é permitida e a perda de carga é monitorada no eletrômetro (Elster; Geitel, 1892). À direita, uma versão mais recente do instrumento, fabricada por Günther e Tegetmeyer por volta de 1902. A unidade de esfera de zinco é combinada com o eletrômetro em um instrumento compacto (Fricke, 2011).

Fonte: Fricke e Schlegel (2017, p. 4).

Por meio da invenção desse artefato medidor, também conhecido como a “fotocélula de Elster e Geitel”, os dois pesquisadores observaram que mesmo sob luz diurna difusa e muito fraca, assim como sob luz de comprimento de onda no infravermelho próximo, o instrumento produzia um efeito fotoelétrico mensurável. Observou-se que a luz da lua cheia também gerava um efeito bastante perceptível. Verificaram que a fotocorrente produzida era proporcional à intensidade de radiação luminosa ao longo de uma ampla faixa de comprimento de onda (Elster; Geitel, 1891b). Ao empregar luz polarizada com incidência oblíqua em uma liga alcalina, identificaram uma variação no efeito fotoelétrico de acordo com a rotação do plano de polarização (Elster; Geitel, 1891b, 1894).

Após a obtenção do certificado de patentes em 1893, as “fotocélulas de Elster e Geitel” foram compartilhadas com outros cientistas. Há registros indicando que Lenard foi agraciado com um dispositivo desse tipo (Bonzel; Kleint, 1995). Com efeito, com o posterior

desenvolvimento científico-tecnológico, o “fotômetro de Elster e Geitel” se tornou instrumento padrão em muitos laboratórios dessa área de pesquisa.

Embora não ocupassem uma cátedra de professores de Física em alguma universidade, Elster e Geitel eram reconhecidos tanto na comunidade científica alemã quanto internacional. Mantinham correspondência frequente com diversos físicos renomados de sua época, entre eles: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), Wilhelm Wien (1864-1924), Philipp Lenard (1862-1947), Walther Nernst (1864-1941), Otto Hahn (1879-1968), Max Planck (1858-1947), Henri Becquerel (1852-1908), William Ramsay (1852-1916). Alguns como Svante Arrhenius (1859-1927), Ernest Rutherford (1871-1973) e Joseph J. Thomson (1846-1940) chegaram a visitar a pequena cidade de Wolfenbüttel para discussões científicas (Bonzel; Kleint, 1995; Fricke; Schlegel, 2017).

Em 1899, Geitel recebeu o título de “doutor *honoris causa*” pela Universidade de Göttingen, e tanto Geitel quanto Elster foram agraciados com o mesmo título em 1915 pela Universidade de Tecnologia de Braunschweig. Entre 1904 e 1912, Elster e Geitel foram indicados sete vezes para o Prêmio Nobel de Física, porém, não por suas pesquisas sobre o efeito fotoelétrico, mas provavelmente por suas importantes investigações sobre emissão de partículas radioativas e ionização do ar, uma vez que os votos que receberam eram de especialistas nessa área de pesquisa (Crawford, 1987).

Elster e Geitel optaram por permanecer ministrando aulas como professor no Gymnasium Grosse Schule em Wolfenbüttel ao longo da vida, mesmo tendo recebido ofertas de posições universitárias. Em 1904, receberam uma oferta especial do ministro prussiano para a Universidade de Breslau, e outra da Universidade de Berlim. Após a morte de Elster, em 1920, Geitel aceitou uma posição como professor honorário na Universidade Técnica de Braunschweig, três anos antes de seu falecimento.

2.2.3 1898-1902: As Investigações de Philipp Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico²⁹

Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947) foi um físico experimental austro-húngaro, cujas contribuições científicas, no início do século XX, foram relevantes para a

²⁹ A discussão histórica apresentada nesta seção encontra-se originalmente publicada em Suttini, Caluzi e Errobidart (2023b), com informações adicionais em Suttini, Caluzi e Errobidart (2024a). Além disso, Gonzales, Suttini e Caluzi (2022) utilizam como objeto de análise a controvérsia científica histórica envolvendo, de um lado,

compreensão da natureza da matéria e da eletricidade (Wheaton, 1978). No entanto, destacou-se também como um membro fanático e influente do Partido Nacional-Socialista dos Trabalhadores Alemães – NSDAP, mais conhecido como Partido Nazista (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2020).

Dada a importância histórica da vida política e obra científica de Lenard, na primeira parte deste capítulo será apresentado o recorte histórico de suas pesquisas experimentais sobre os raios catódicos e o efeito fotoelétrico, entre 1898 e 1902. Enquanto na segunda parte será explorado seu apoio incondicional ao Partido Nazista e sua liderança política no movimento “Física Alemã”, durante os anos de 1920 e 1938.

A discussão histórica de sua liderança no referido movimento nacionalista na comunidade física alemã oferece oportunidade significativa para discussões e reflexões sobre a complexa relação entre produção do conhecimento científico e questões éticas, morais e políticas – portanto, questões que envolvem valores socioculturais – que permeiam as sociedades nas quais esse conhecimento é produzido.

2.2.3.1 O Caminho até o Prêmio Nobel de Física de 1905

Lenard nasceu em Pozsony (Pressburg), Hungria, em 7 de junho de 1862. Naquela época, sua família havia se mudado de Tirol, um estado localizado no oeste da Áustria. Ele prosseguiu seus estudos em física, passando por Budapeste, Viena, Berlim e Heidelberg. Durante a formação acadêmica, teve a oportunidade de trabalhar sob a orientação de cientistas alemães de grande prestígio acadêmico, como Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen (1811-1899), Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), Johann Königsberger (1874-1946) e Georg Hermann Quincke (1834-1924). Em 1886, aos 24 anos, obteve seu doutorado na Universidade de Heidelberg (Wheaton, 1978; Lenard, 1998 [1906]).

Entre 1891 e 1898, Lenard trabalhou como professor assistente de Heinrich Hertz na Universidade Bonn, na qual conduziu extensas pesquisas sobre as propriedades de propagação, absorção e difusão dos raios catódicos, cujo entendimento ainda era limitado naquele período. Uma de suas principais contribuições científicas daquela época ficou conhecida como a “janela

a “hipótese de gatilho”, de Philipp Lenard, formulada em 1902, e, de outro, a “hipótese de *quantum* de luz”, de Albert Einstein, proposta em 1905, com objetivo de elucidar e aplicar quatro conceitos aparentemente semelhantes presentes nas epistemologias de Thomas Kuhn e Ludwik Fleck.

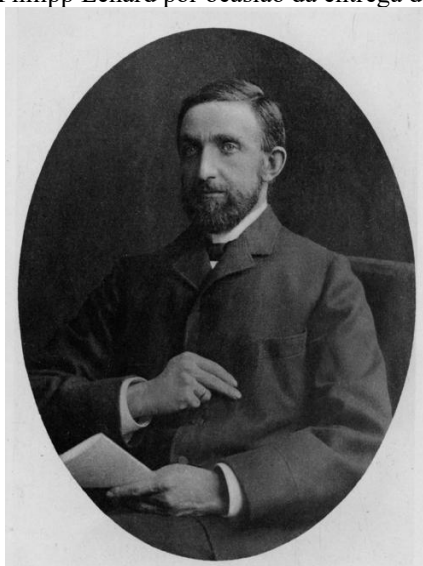
de Lenard”. Um dispositivo que possibilitava o estudo inédito dos raios catódicos em sua forma pura, ou seja, sem a interferência dos gases rarefeitos presentes nos tradicionais “tubos de Crookes” (Wheaton, 1978; Lenard, 1998 [1906]).

Ainda nesse meio tempo, Lenard recebeu prêmios internacionais em reconhecimento à sua contribuição para os estudos sobre os raios X, realizados por outros cientistas, por meio do seu aparato experimental. A primeira identificação desse fenômeno foi feita pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, sendo menosprezadamente considerada por ele como “um bom exemplo de descoberta afortunada” (Lenard, 1998 [1906], p. 105). Em 1896, ambos receberam o *Baumgartner Prize*, da Academia Austríaca de Ciências, além da *Medalha Rumford*, da Sociedade Real de Londres. No ano seguinte, a Academia de Ciências de Paris concedeu o *Prix La Caze* em Física para Lenard, e em Fisiologia para Wilhelm Röntgen (Wheaton, 1978). No entanto, o primeiro *Prêmio Nobel de Física*, em 1901, organizado pela Academia Real Sueca de Ciências, foi concedido apenas a Wilhelm Röntgen, “em reconhecimento dos serviços extraordinários que ele prestou pela descoberta dos raios notáveis, posteriormente nomeados em sua homenagem [‘raios Röntgen’, atualmente ‘raios X’] (The Nobel Foundation, 1998a). Esse posicionamento excludente do Comitê Científico sueco indica que as reivindicações de Lenard sobre a coautoria e participação nas observações experimentais dos raios X já haviam perdido força.

Entre 1898 e 1902, Lenard deu continuidade às suas pesquisas sobre raios catódicos, conduzindo uma série de investigações sobre as propriedades do fluxo de partículas elétricas emitidas no efeito fotoelétrico, uma vez que tais partículas se mostravam aparentemente idênticas àquelas de um feixe de raios catódicos gerados por meio de tubos de descargas elétricas. Pouco tempo depois, por seus diversos trabalhos e contribuições para o entendimento a respeito da natureza dos raios catódicos, Lenard foi laureado com o prêmio Nobel de Física de 1905 (cf. Figura 10) (The Nobel Foundation, 1998a)³⁰.

³⁰ Por ocasião do recebimento do prêmio, Lenard proferiu a *Nobel Lecture* intitulada “Sobre os raios catódicos” (Lenard, 1998 [1906]). Suttini, Caluzi e Errobidart (2023b) trazem como material suplementar a tradução na íntegra do discurso de apresentação e do conteúdo da *Nobel Lecture* de Lenard (1906). Em sua palestra, Lenard propõe um levantamento histórico retrospectivo das publicações que, em sua opinião, trouxeram importantes contribuições para a pesquisa sobre as propriedades e a natureza dos raios catódicos até aquele momento. Ressalta, em diversos momentos, como seu trabalho foi influenciado por outros e vice-versa. Lenard descreve o desenvolvimento das pesquisas nesse campo, baseando-se em sua própria experiência. Além do mais, expõe os principais percalços técnicos e científicos enfrentados ao longo de suas investigações, assim como as soluções encontradas. O tema principal do texto aborda os detalhes da controvérsia científica sobre a natureza dos raios catódicos entre os físicos ingleses e alemães no fim do século XIX, evidenciando como suas investigações experimentais foram relevantes para esse campo de estudo.

Figura 10 - Fotografia oficial de Philipp Lenard por ocasião da entrega do Prêmio Nobel de Física de 1905.



Fonte: Coleção Emilio Segrè Visual Archives, American Institute of Physics.

2.2.3.2 As Investigações Experimentais sobre o Efeito Fotoelétrico

Após concluir seu doutorado em 1896, na virada do século XIX, Lenard já acumulava mais de uma década de dedicação ao estudo da propagação, absorção e difusão de feixes de raios catódicos em materiais sólidos e gasosos, consolidando-se como um cientista experiente. Uma das principais expectativas em torno dessas pesquisas era a obtenção de informações mais precisas sobre as forças eletromagnéticas no interior dos átomos, o que poderiam ampliar a compreensão sobre a natureza da matéria e da eletricidade.

Todavia, para o desenvolvimento dessas investigações experimentais, era necessário, sobretudo, obter feixes de raios catódicos em diferentes velocidades de propagação. Os tradicionais tubos de descargas elétricas (“tubo de Crookes”), preenchidos com gases rarefeitos em baixa pressão, geravam raios com cerca de um terço da velocidade da luz (≈ 100.000 km/s). O problema, de natureza técnico-experimental, portanto, consistia em descobrir novos métodos pelo quais seria possível obter tanto raios catódicos com baixas velocidades de emissão quanto extremamente rápidos (Lenard, 1902, 1998 [1906]; Wheaton, 1978, 1983).

Lenard descreve esse contexto histórico-científico-tecnológico da seguinte forma:

Os raios muito rápidos poderiam ter uma capacidade de absorção extremamente leve (alto poder de penetração); enquanto os raios lentos, por outro lado, pareciam mais adequados para produzir informações sobre as forças dos átomos, a constituição da matéria. Durante muito tempo, no entanto, parecia impossível realizar testes puros em

uma gama suficientemente ampla de velocidades, uma vez que o vidro do tubo de descarga não podia suportar as fortes tensões necessárias para os raios muito rápidos, e os raios lentos, embora fáceis de produzir dentro do tubo, não conseguiam emergir através da janela; eles eram muito absorvíveis (Lenard, 1998 [1906, p. 120-121]).

Uma parte da solução foi encontrada a partir dos resultados das pesquisas sobre materiais radioativos. Observou-se que um feixe de raios catódicos, emitidos como subproduto do decaimento radioativo dos elementos urânio (U) e rádio (Ra), praticamente se igualavam à rapidez da luz (≈ 300.000 km/s). Em outras palavras, descobriu-se que aquilo que nenhum tubo de descarga elétrica poderia suportar era alcançado espontaneamente com os átomos de rádio ou urânio, embora reconhecidamente não sem ser completamente desintegrados no processo (Lenard, 1998 [1906]).

A outra metade da solução – encontrada alguns anos antes – foi obtida a partir dos trabalhos de Righi (1890a, 1890b), Lenard e Wolf (1889), Thomson (1894, 1897), Perrin (1895, 1896) e Wien (1897) sobre a hipótese da “convecção fotoelétrica” como mecanismo subjacente ao fenômeno do efeito fotoelétrico. Com base em medições da razão carga/massa para portadores de carga elétrica em baixa pressão (um “vácuo”, com aproximadamente 0,001 mmHg), os cientistas concluíram que os “raios fotoelétricos”, produzidos em vácuo elevado por meio da incidência de luz ultravioleta em superfícies metálicas recém-polidas, consistiam, de fato, em um feixe de “raios catódicos” com velocidades muito mais baixas (Lenard, 1998 [1906])³¹.

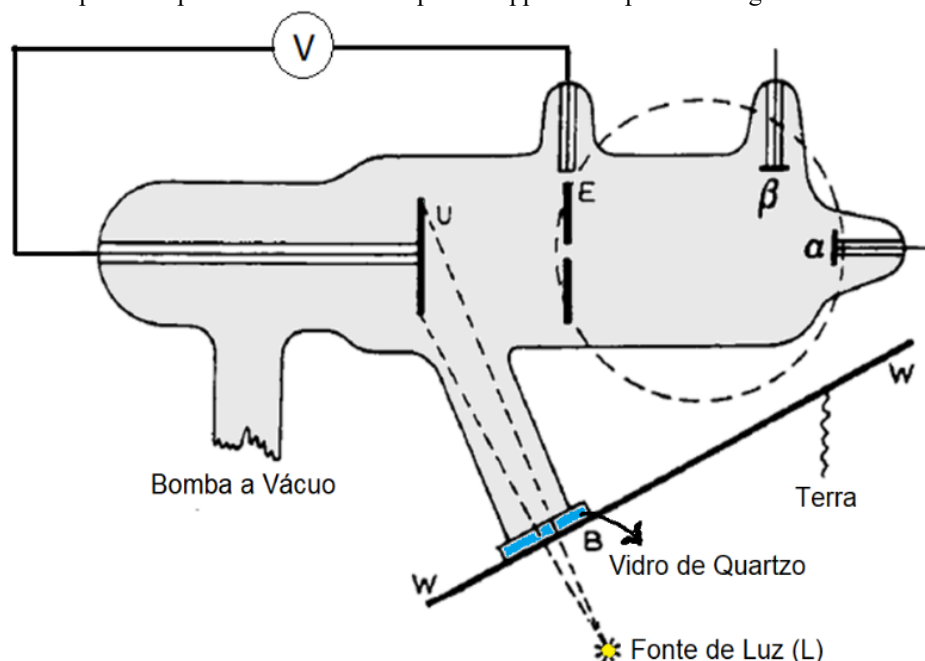
Lenard percebeu, portanto, que poderia utilizar o efeito fotoelétrico, um fenômeno que outros cientistas já consideravam um pouco “fora de moda”, para produzir feixes de raios catódicos praticamente em sua forma “pura” (no vácuo), emitidos com velocidades muito mais baixas em relação aos outros métodos convencionais. Dessa forma, percebeu-se que o efeito fotoelétrico poderia ser uma técnica experimental ideal para suas investigações sobre as forças eletromagnéticas no interior dos átomos. Com isso em mente, Lenard construiu o arranjo experimental esquematizado na Figura 11.

O ambiente interno (cor cinza) está num vácuo bastante elevado. (*U*) representa a placa metálica a ser irradiada. A luz ultravioleta penetra na região interna do tubo após atravessar uma vedação transparente de quartzo (*B*). Os raios catódicos produzidos são emitidos a partir de (*U*), e um feixe estreito é formado ao passar por um pequeno orifício na contraplaca (*E*). Uma diferença de potencial (*V*) entre as placas é utilizada para acelerar ou frear os raios catódicos. Finalmente, depois de atravessar a contraplaca (*E*), o feixe atinge uma pequena placa

³¹ cf. aqui a seção 3.2.2 (b).

(α) que coleta a carga negativa transportada, indicando, assim, a existência de uma fotocorrente no eletrômetro. Ao aproximar adequadamente um ímã ou uma bobina do tubo (linha pontilhada circular), é possível defletir os raios para a placa (β), em vez de (α), no fim do percurso.

Figura 11 - Aparato experimental construído por Philipp Lenard para investigar o efeito fotoelétrico.



Fonte: Adaptado e colorido pelos autores para fins didáticos com base em Lenard (1998 [1906]).

Por meio da variação da diferença de potencial (V) entre as placas opostas, esse método possibilita a medição tanto da quantidade de elétrons que deixam a placa (U) quanto da velocidade das partículas em movimento, não em m/s, mas em 'Volts', substituindo a medição das velocidades por diferenças de energia, de acordo com a expressão $V \cdot e = \frac{1}{2} m v_{\text{máx}}^2$, em que (e) representa a carga elétrica, (m) a massa e ($v_{\text{máx}}$) a velocidade máxima dos elétrons que deixam a placa (U).

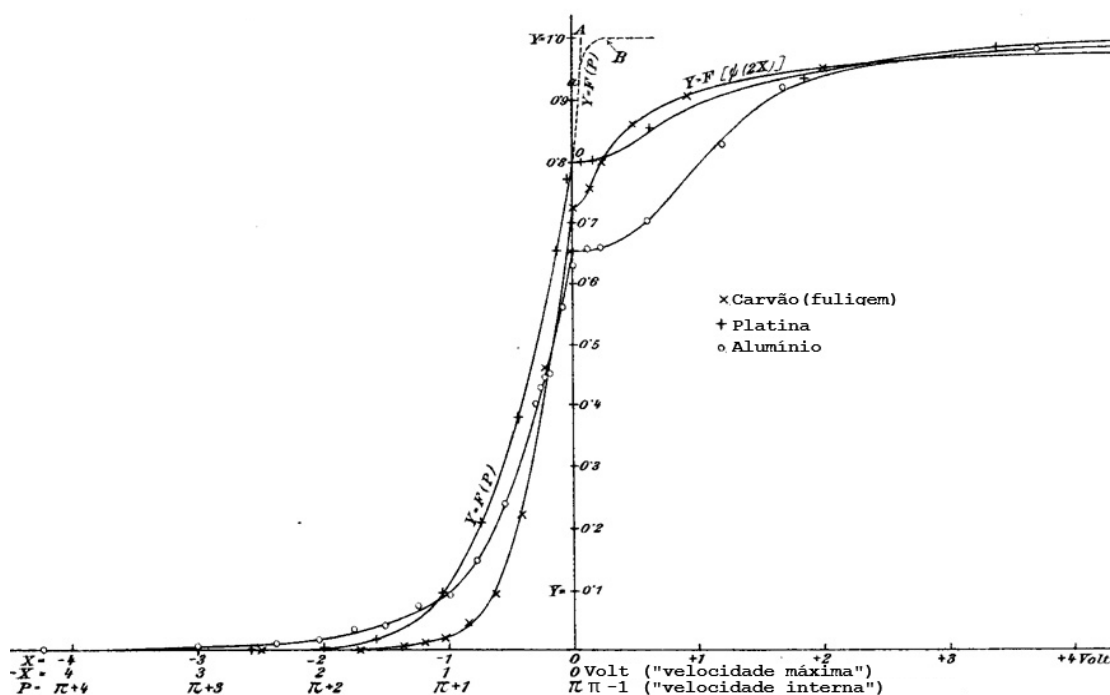
Com base nos resultados experimentais da deflexão magnética dos raios para a placa (β), e comparando-os com as medidas para relação carga/massa obtidas no estudo conduzido por Thomson em 1897, corrobora-se a hipótese de que as partículas elétricas que constituem o feixe de “raio fotoelétrico” são exatamente da mesma natureza que aquelas dos feixes de “raios catódicos” gerados dentro de tubos de descargas elétricas com gases rarefeitos. Além disso, é possível demonstrar que os “raios catódicos fotoelétricos”, sob certas condições experimentais, causam efeitos de luminescência (fluorescência e fosforescência) em substâncias apropriadas e que eles podem causar ionização do gás em um espaço cheio de gás (Lenard, 1998 [1906]).

Lenard conduziu vários testes experimentais entre 1898 e 1901, cujos resultados essenciais foram compilados na publicação de um extenso artigo de 51 páginas, em 1902. Em

primeiro lugar, foi confirmado que os raios catódicos podiam ser produzidos no vácuo, obtendo-se, assim, raios catódicos em sua forma “pura” – algo até então impossível de se conseguir com tubos de descargas elétricas. Além do mais, os testes mostraram que a emissão fotoelétrica é definitivamente resultado da ação direta da luz ultravioleta sobre a superfície metálica, refutando definitivamente a hipótese de “convecção fotoelétrica” como mecanismo subjacente à produção do efeito ou de qualquer outra que pressuponha a ação de algum agente intermediário (Lenard, 1902, 1998 [1906]).

Em segundo lugar, as medições realizadas a respeito da fotocorrente em função da diferença de potencial (U) entre as placas mostraram que as partículas elétricas (“*quanta* de eletricidade”; “elétrons” ou “fotoelétrons”)³² eram emitidas com velocidades máximas iniciais relativamente muito baixas (≈ 1000 km/s), pois uma carga negativa de entre 1-2 volts aplicada na contraplaca (E) era suficiente para reverter totalmente a fotocorrente. Ademais, constatou-se que as velocidades iniciais das partículas variam ligeiramente entre si, indicando que a emissão fotoelétrica ocorre de forma difusa e depende do material da superfície metálica. Observou-se também que a diferença de potencial aplicada influencia apenas a velocidade, mas não o número total de elétrons emitidos (Lenard, 1902, 1998 [1906]).

Figura 12 - Curva de corrente fotoelétrica (i) em função da diferença de potencial (V), obtida por Lenard (1902), para uma frequência da luz constante, demonstrando o comportamento para três materiais distintos: carvão (fuligem), platina e alumínio.



Fonte: Adaptado pelos autores para fins didáticos de Lenard (1902, p. 199).

³² Na época, Lenard e outros cientistas ainda utilizavam a expressão “*quanta* de eletricidade” para se referirem ao conceito de “elétron” enquanto partícula elementar dos fenômenos elétricos.

Em terceiro lugar, quando se ultrapassam os valores de potenciais “retardantes” para potenciais “aceleradores”, observa-se que o número máximo total de elétrons ejetados aumenta até um determinado potencial. No entanto, ao continuar aumentando o potencial, a corrente se mantém constante, ou seja, ocorre uma espécie de “fotocorrente de saturação”. A intensidade dessa “fotocorrente de saturação” é uma medida indireta do número total de partículas elétricas emitidas (cf. Figura 12) (Lenard, 1902, 1998 [1906]).

Contudo, o resultado mais importante foi a observação de que a intensidade da luz ultravioleta incidente provoca alterações apenas na magnitude da “fotocorrente de saturação”, mas não em suas velocidades máximas. Foi confirmado que a magnitude da “fotocorrente de saturação” (isto é, o número de elétrons ejetados) é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente – designada como “lei de Lenard” para as emissões fotoelétricas. Lenard (1902) afirmou que ficou muito surpreso com o quão longe essa relação linear permanecia válida. Ele afirmou que não encontrou qualquer indício da existência de um limiar de intensidade da luz ultravioleta, abaixo do qual a produção de “raios catódicos fotoelétricos” rapidamente se torna nula; mesmo quando a intensidade foi reduzida por um fator de três milhões pela reflexão da luz em uma superfície escurecida de fuligem.

A análise dos dados obtidos por Lenard (1902) evidenciou, com muita precisão, que a velocidade máxima de escape dos “raios catódicos fotoelétricos” era independente da intensidade da luz ultravioleta incidente sobre as superfícies metálicas. Essa observação inequívoca o levou a inferir que as velocidades máximas das partículas dependiam exclusivamente das propriedades atômicas dos materiais constituintes das superfícies metálicas, não da luz incidente.

Lenard (1902) interpretou o efeito fotoelétrico da seguinte maneira: é necessário distinguir entre velocidades iniciais “internas” e “externas” (ou componentes normais, aquelas realmente observadas). Pela ação da luz, os elétrons são liberados inicialmente no interior do corpo iluminado, mesmo que em uma camada superficial muito fina, e suas velocidades iniciais são chamadas de “internas”. A energia cinética, medida indiretamente pela diferença de potencial aplicada (potencial de frenagem), correspondente à componente normal da velocidade “externa” é denominada **P**. Na camada de transição entre o corpo e o vácuo, é assumido que existe um campo de força retardador, fisicamente interpretado como a atração eletrostática entre os elétrons recém-libertados e as cargas residuais positivas que permanecem (íons atômicos positivos), de modo que uma certa quantidade de energia **Π** deve ser perdida nessa transição. Se **P** < **Π** para um determinado elétron, ele não consegue escapar. Com a aplicação de uma

força aceleradora, uma fração adicional de elétrons, que depende da magnitude dessa força, bem como do valor e da distribuição espacial da força, consegue atravessar a camada de transição.

Wheaton (1978) destaca que Lenard, em suas publicações de 1889 a 1902, indicou a existência de uma ligeira influência do tipo de fonte de luz sobre a fotocorrente de saturação (ou seja, o comprimento de onda, mas não a intensidade). Contudo, os resultados de experimentais reforçaram as antigas convicções de Lenard de que as propriedades dos raios catódicos dependiam exclusivamente da distribuição dos elétrons na estrutura atômica, o que o fez não prosseguir com o desenvolvimento de condições adequadas para investigar uma possível dependência do limiar fotoelétrico em relação ao valor da frequência da luz incidente.

As observações empíricas relatadas por Lenard (1902) pareciam ser, à primeira vista, intrigantes, inconsistentes e contraditórias ao que seria esperado pela bem-sucedida teoria clássica do eletromagnetismo, tradicionalmente representada pelas quatro equações de Maxwell, formuladas entre 1861 e 1862.

Segundo a teoria clássica do eletromagnetismo, um aumento na intensidade (I) da radiação eletromagnética pode ocorrer unicamente em virtude de um respectivo aumento proporcional no módulo de uma das componentes do campo elétrico (ou magnético) da radiação. Portanto, a intensidade (I) está diretamente associada à amplitude do campo. Além disso, um aumento na amplitude é resultado único do aumento na densidade de energia (μ) transportada pela radiação eletromagnética; quantidade de energia radiante que, por sua vez, poderá ser parcial ou totalmente transferida a átomos e elétrons em processos de interação com a matéria, exatamente como ocorre na emissão fotoelétrica com a luz ultravioleta incidente³³.

Essa forte contradição entre dados experimentais e previsões teóricas é exatamente a interpretação apresentada em muitas narrativas pseudo-históricas nos livros didáticos, em geral construída em uma estrutura textual de preparação para o subsequente anúncio do desenvolvimento da teoria quântica da luz como solução inevitável para um dos principais problemas que geraram uma crise na Física Clássica. Entretanto, apesar de conter certa dose de racionalidade nesse pensamento, à luz dos fatos e documentos históricos, trata-se, na verdade,

³³ De acordo a teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell, a densidade média de energia (μ) é dada por $(\mu)média = \frac{E^2máx}{2}$, em que ϵ_0 é a constante de permissividade elétrica (no vácuo) e $E_{máx}$ é o módulo do campo elétrico máximo (amplitude). A intensidade (I) depende somente da amplitude máxima dos campos elétrico e magnético, determinada por $I = \frac{E^2máx}{2\mu_0c} = \frac{potência}{área} = \frac{energia \times tempo}{área}$ em que μ_0 é a constante de permeabilidade magnética (no vácuo).

de uma distorção histórica gravíssima, um mito com raízes profundas na história do efeito fotoelétrico.

Os registros documentais indicam que, na época da publicação da interpretação quântica de Einstein (1905) do efeito fotoelétrico, o extenso conjunto de observações empíricas disponíveis – em especial as obtidas por Lenard (1902) – não eram, de forma alguma, consideradas um obstáculo intransponível para a teoria clássica do eletromagnetismo.

Nas conclusões do estudo de revisão bibliográfica do físico alemão Egon Schweidler (1904), o autor inicialmente comenta que Hertz (1892, p. 4), sete anos após a primeira observação das manifestações fotoelétricas, escreveu: “Os trabalhos de vários pesquisadores, especialmente os senhores Righi, Hallwachs, e Elster e Geitel, têm promovido um conhecimento mais detalhado desse fenômeno; entretanto, a mecânica do mesmo ainda não foi completamente compreendida”. Em seguida, assinala que, embora essa afirmação de Hertz tenha permanecido válida por mais alguns anos, naquele momento histórico – quase 20 anos depois do trabalho de Hertz (1887) – a investigação intensiva que este campo tão específico da Física recebeu, abrangendo quase 200 estudos experimentais, conduzidos a partir de um processo não linear essencialmente por tentativa e erro, foi finalmente coroada com resultados ainda mais abundantes, a ponto de permitir o desenvolvimento de uma teoria unificada e uma apresentação sistemática do fenômeno da emissão de elétrons por superfícies iluminadas em seus principais aspectos. Em suas palavras:

Os princípios básicos foram compreendidos, a complexa ligação entre os processos primários e os fenômenos secundários foi desvendada, e a interação das condições interdependentes foi esclarecida. Agora, ao menos, a estrutura de uma teoria das emissões fotoelétricas pode ser construída (Schweidler 1904, p. 400).

Por fim, Schweidler (1904) afirma que, para o avanço dessa teoria, são especialmente importantes novas investigações quantitativas comparativas sobre a dependência entre a emissão de elétrons – quanto ao de número e à velocidade inicial – e o comprimento de onda da luz em iluminação homogênea e com a natureza química do corpo iluminado. Tais investigações, como sabemos hoje, serão fundamentais para a resolução da controvérsia científica a respeito da validade “lei do efeito fotoelétrico” proposta por Einstein (1905), a qual foi derivada a partir da aplicação heurística de sua hipótese revolucionária de “*quantum* de luz”.

Na próxima subseção, será discutida como todas as supostas contradições e inconsistências com a teoria clássica do eletromagnetismo foram eliminadas por Lenard, ainda no mesmo artigo de 1902, com a proposição de sua “hipótese de gatilho” sobre a emissão dos fotoelétrons e com a formulação de um modelo de estrutura atômica cujo volume interno é

imensamente vazio, preenchido somente por pequenos dipolos elétricos, denominados de “dinamides”.

Sabe-se que, até meados de 1911, ou seja, por aproximadamente dez anos, a “hipótese de gatilho” foi considerada pela comunidade de físicos uma explicação satisfatória para as propriedades observadas no efeito fotoelétrico; apoiada, naquela época, muitas vezes, pelos resultados de outras pesquisas sobre a natureza da matéria e da eletricidade (Jammer, 1966; Stuewer, 1970, 1975; Kuhn, 1978; Wheaton, 1978, 1983; Kragh, 1992; Niaz *et al.*, 2010; Klassen, 2011; Klassen *et al.*, 2012).

2.2.3.3 A “Hipótese de Gatilho” de Philipp Lenard (1902)

Lenard interpretou suas observações experimentais sobre o efeito fotoelétrico no âmbito do paradigma hegemônico da teoria clássica do eletromagnetismo. Como a emissão fotoelétrica resultava da ação direta da luz ultravioleta sobre os átomos da placa metálica (U) (cf. Figura 11), e uma vez que o fenômeno ocorria em um ambiente de vácuo de alta qualidade, ele inferiu que a luz desencadeava alguma forma de vibração ou perturbação eletrônica no interior dos átomos. Essa explicação era apoiada pela teoria da dispersão eletrônica, proposta pelo médico e físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) (Helmholtz, 1893). Além disso, em 1897, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943) mostrou que os átomos contêm eletricidade negativa suscetível à vibração, denominada à época de “*quantum* de eletricidade”, ou simplesmente “osciladores eletrônicos” (Zeeman, 1896).

A inferência de que a luz desencadeava ou intensificava alguma forma de vibração ou perturbação eletrônica no interior dos átomos está relacionada a outro fator importante para compreensão do fenômeno: a maneira como a temperatura afeta as emissões fotoelétricas. Uma vez que no interior dos átomos contêm elétrons suscetíveis à vibração, é esperado uma maior emissão fotoelétrica em altas temperaturas. Embora os resultados experimentais até o ano de 1904 fossem contraditórios, de fato, havia alguns estudos sugeriam que tanto a quantidade quanto a velocidade dos elétrons emitidos pela superfície irradiada eram influenciadas pela

temperatura, independentemente de o teste ser realizado no vácuo ou em gases rarefeitos³⁴ (Ladenburg, 1909).

Segundo Lenard (1902), a absorção da luz na camada superficial de materiais fotossensíveis é um fenômeno que pode ser explicado pelas propriedades de ressonância ondulatória. Ele considerou que, sob a influência da força eletromagnética periódica do feixe de luz, os elétrons ligados ao átomo começam a oscilar cada vez mais intensamente e, pelo menos em parte, conseguem escapar do átomo superando as forças que os mantêm, com valores de velocidade iniciais irregularmente distribuídos quanto à direção e magnitude.

Portanto, na virada do século XX, tanto Lenard quanto outros físicos e químicos aceitavam amplamente a ideia de que, “[...] se a co-vibração de um *quantum* negativo no átomo com as ondas de luz ultravioleta se torna demasiadamente violenta, esse *quantum* pode eventualmente escapar do átomo, produzindo um ‘raio catódico fotoelétrico’” (Lenard, 1998 [1906], p. 123).

Admitindo-se a precisão dos dados e a aceitação da teoria clássica do eletromagnetismo, as supostas contradições entre as observações experimentais e as previsões teóricas só existiam se, e somente se, fosse verdadeira a premissa de que ocorria uma transferência de energia radiante na interação entre a luz e a matéria. Contudo, Lenard argumentou que, naquele momento, não havia evidências suficientemente robustas para corroborar essa premissa. Ele enfatizou, por exemplo, que o valor obtido experimentalmente para energia cinética máxima dos “*quanta* de eletricidade” – cerca de 4,0 elétrons-volt para o sódio (Na) – era excessivamente alto para ser alcançado por algum processo ondulatório de ação ressonante em um intervalo de tempo tão reduzido, uma vez que a emissão fotoelétrica se inicia praticamente de forma instantânea (Lenard, 1902, 1998 [1906]). Além disso, na época, nem Lenard (1902) nem Ladenburg (1903) encontraram qualquer influência da direção do plano de polarização da luz ultravioleta incidente na intensidade da “fotocorrente de saturação”, um resultado negativo interpretado como um apoio à ideia de que não ocorria de forma direta a transferência de energia entre luz e matéria³⁵.

³⁴ Somente por volta de 1910 um conjunto de testes experimentais realizados no vácuo evidenciou de maneira consistente que tanto a quantidade quanto a velocidade dos elétrons emitidos de uma superfície irradiada são independentes da temperatura (Ladenburg, 1909).

³⁵ Anos depois, os resultados negativos de Lenard (1902) e Ladenburg (1903) quanto à influência do plano de polarização incidente na intensidade da “fotocorrente de saturação” foram reinterpretados e justificados pelo fato de que as superfícies metálicas eram muito rugosas em comparação com comprimento de onda da luz ultravioleta utilizada nos testes experimentais. Isso impediu que a luz fosse absorvida de maneira diferente de acordo com a direção da oscilação do campo eletromagnético.

A suposição mais simples de que as forças de ligação intramoleculares são independentes do tempo e que oscilações lineares da luz também excitam oscilações lineares de ressonância não era suficiente para explicar os fatos observado. Isso ocorre porque, nesse caso, o elétron deveria deixar o átomo com um excesso de energia que foi adquirido durante a segunda metade ou a totalidade da oscilação de ressonância, ou seja, proveniente da luz, e essa energia, portanto, deveria aumentar com a intensidade da luz. Contudo, Lenard (1902) concluiu que, a menos que se aceitem condições de movimento mais complexas no interior dos átomos, a energia cinética dos elétrons emitidos era proveniente da “reserva de energia interna” – ou energia potencial equivalente – que eles próprios já possuíam quando ainda pertenciam à estrutura interna dos átomos constituintes da superfície metálica.

Nessa perspectiva, a energia cinética dos elétrons depende essencialmente da força atômica e não da energia radiante, embora uma fração muito da energia dos elétrons possa originar-se da energia da luz. Logo, a energia cinética dos elétrons emitidos não devia possuir, exatamente como os dados experimentais sugeriam, nenhuma relação com a intensidade da luz (Lenard, 1902, 1998 [1906]).

Com base nesse entendimento, Lenard estava convencido de que as oscilações de ressonância, decorrentes da interação entre luz e matéria devido à força eletromagnética periódica de um feixe de luz ultravioleta ou de raios X, desempenhavam apenas um papel desencadeador, semelhante ao de um “gatilho de uma arma de fogo”. Essa função, portanto, se limitava unicamente à liberação explosiva (disparo) dos “*quanta* de eletricidade” do interior dos átomos das superfícies metálicas. Em suas palavras:

[...] as velocidades iniciais dos *quanta* emitidos [fotoelétrons] não se originam da energia luminosa, mas de movimentos violentos já preexistentes dentro dos átomos antes da incidência de luz, de modo que os movimentos de ressonância desempenham apenas um papel insignificante (Lenard, 1902, p. 170).

A velocidade de escape já mencionamos como muito baixa. Também descobri que a velocidade é independente da intensidade da luz ultravioleta, e assim concluí que a energia de escape não provém da luz, mas do interior do átomo em particular. A luz tem apenas uma ação iniciadora, semelhante a espoleta ao disparar uma arma carregada (Lenard, 1998 [1906], p. 121).

Em 1906, na apresentação de sua *Nobel Lecture*, Lenard mencionou que algumas evidências experimentais apontavam para essa conclusão:

Acho essa conclusão importante, pois dela aprendemos que não apenas os átomos do rádio³⁶ – cujas propriedades estavam apenas começando a ser discernidas com mais

³⁶ Três anos mais tarde, Elster e Geitel (1909) também sugeriram que, assim como em processos radioativos, as emissões fotoelétricas são um processo explosivo, no qual o átomo apenas desencadeia o processo ao absorver uma pequena fração da energia da luz.

detalhes naquela época – contêm reservas de energia, mas também os átomos dos outros elementos; estes também são capazes de emitir radiação e, ao fazê-lo, talvez se decomponham completamente, correspondendo à desintegração e à rugosidade das substâncias em luz ultravioleta. Essa visão foi recentemente corroborada no Instituto Kiel por experimentos especiais que também mostraram que o efeito fotoelétrico ocorre com velocidades iniciais inalteradas mesmo na temperatura do ar líquido (Lenard, 1998 [1906], p. 121).

Lenard propôs que fenômenos análogos de interação entre radiação eletromagnética e matéria poderiam ser explicados por sua “hipótese de gatilho”, incluindo ionização de gases por luz ultravioleta:

Não podemos considerar a ação da luz restrita apenas ao estado sólido de agregação. As moléculas, ou átomos de gases, sofrem um efeito completamente análogo sob a ação da luz ultravioleta. É razoável supor que os *quanta* de eletricidade [fotoelétrons] escapam deles, e o gás torna-se, assim, eletricamente condutor [...]. Se o gás contém oxigênio como o ar, o ozônio é formado como subproduto. Essa mesma ação da luz [...] também está envolvida na fosforescência e, portanto, provavelmente também na fluorescência, talvez também em todos os efeitos fotoquímicos (Lenard, 1998 [1906], p. 121).

A aplicação da “hipótese de gatilho” ao fenômeno da ionização de gases por luz ultravioleta foi posteriormente estendida para outras radiações por dois assistentes de J. J. Thomson. Em 1905, John A. McClelland correlacionou o peso atômico à emissão de elétrons secundários induzida por raios X e γ , sugerindo que a sua energia envolvida tinha origem intramolecular (Wheaton 1983, pp. 73–75). Pouco tempo depois, P. D. Innes constatou que, assim como no caso da luz ultravioleta, “[...] a velocidade máxima dos elétrons emitidos por raios X é completamente independente da intensidade da radiação primária, mas aumenta com a dureza do tubo [‘o poder de penetração’ dos raios X]” (Innes 1907, p. 462). Outras pesquisas nos Estados Unidos e na Alemanha chegaram à conclusão similar de que a “hipótese de gatilho” podia ser aplicada aos raios X e γ , consolidando-a como referência entre físicos europeus na explicação das propriedades dos fenômenos de emissão fotoelétrica e ionização gasosa (Katzir, 2013).

No que diz respeito à influência do tipo de radiação eletromagnética incidente, em sua Lenard mencionou que as pesquisas conduzidas por Pierre Curie (1859-1906), Marie S. Curie (1867-1934), Georges Sagnac (1869-1928) (Curie; Curie, 1900; Curie; Sagnac, 1900), e por Friedrich E. Dorn (1848-1916) (Dorn, 1900, 1901) mostravam que, analogamente à luz ultravioleta, os raios X também produziam raios catódicos quando incidentes sobre superfícies metálicas, sendo consistente com a capacidade destes de tornar os gases eletricamente condutores e induzir efeitos fosforescentes e fotoquímicos (Lenard, 1998 [1906]).

A observação da influência do tipo de radiação eletromagnética não representava uma dificuldade para a “hipótese de gatilho”. Ao assumir a existência de um processo de ressonância ondulatória entre a radiação eletromagnética e os elétrons no interior dos átomos, e admitindo-se a possibilidade de existirem elétrons com diferentes magnitudes de frequências de vibração natural, pode-se concluir que o elétron ejetado por meio da incidência da luz ultravioleta não será exatamente o mesmo que aquele emitido pelos raios X. Assim, as diferentes velocidades iniciais dos elétrons emitidos são, em última análise, resultado dos distintos movimentos vibracionais preexistentes dos elétrons dentro da estrutura atômica.

Considerando esse ponto de vista, tornava-se possível construir uma explicação satisfatória para a dependência do efeito fotoelétrico em relação ao tipo de luz incidente: as diferentes radiações eletromagnéticas incidentes, tanto ultravioleta quanto raios X, desempenham apenas a função de engatilhar e liberar os elétrons, ou seja, selecionar os diferentes elétrons que serão ejetados (Lenard, 1902, 1998 [1906]; Wheaton, 1978, 1983).

Dado que o conhecimento científico sobre a estrutura interna do átomo ainda era um problema de pesquisa em aberto no início do século XX³⁷, a solução apresentada por Lenard por meio de sua “hipótese de gatilho” pareceu razoável para a maioria dos cientistas, pois eliminava duas aparentes contradições com a teoria clássica do eletromagnetismo, sem a necessidade de impor hipóteses *ad hoc* e excessivamente arbitrárias (Kuhn, 1978; Wheaton, 1978, 1983; Kragh, 1992, 2010; Niaz *et al.*, 2010; Klassen *et al.*, 2012).

Com base nos dados obtidos em 1903 sobre a propagação dos raios catódicos em materiais sólidos e gasosos, Lenard (1903a, 1903b) propôs seu próprio modelo científico para estrutura atômica. Ele postulou a existência dos “dinamides”³⁸ como constituintes fundamentais da matéria. A Figura 13 esquematiza esse modelo atômico.

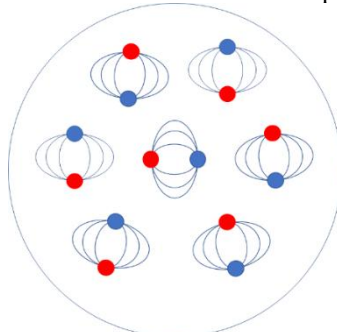
Os “dinamides” são extremamente pequenos, eletricamente neutros e estão em movimento (rotação e/ou oscilação) com certa energia cinética inicial. Essa dinâmica explica a manutenção das distâncias entre os “*quanta* de eletricidade”. Além disso, os “dinamides” são equivalentes a pequenos dipolos elétricos, fortemente ligados eletricamente, cuja massa total

³⁷ É sempre importante ressaltar que o modelo científico de estrutura atômica mais aceito e adotado pela comunidade científica, na primeira década do século XX, é o modelo proposto por J. J. Thomson (modelo “pudim de passas”), publicado dois anos após o trabalho de Philipp Lenard, em 1904. Além disso, é válido destacar que, quando empregamos o termo “pudim de passas”, os elétrons não estão distribuídos aleatoriamente no interior do átomo, mas devem estar ordenados de tal forma que possa manter sua estabilidade atômica.

³⁸ Com significado distinto, o termo “dinamides” foi primeiramente cunhado pelo físico austríaco Ferdinand Redtenbacher (1809-1863) em 1857, cerca de trinta anos antes dos trabalhos de Philipp Lenard sobre a absorção de raios catódicos em gases rarefeitos (Kragh, 2010).

representa a massa atômica. Consequentemente, a matéria sólida representa somente uma fração mínima de todo o volume do átomo.

Figura 13 - Ilustração do modelo atômico de Lenard para estrutura da matéria.



Fonte: Elaborada pelos autores com base em LEIFIPhysik³⁹.

Nas palavras do próprio Lenard:

Devemos nos surpreender com o grau insignificante em que o espaço na matéria é realmente preenchido! O que encontramos no espaço ocupado pela matéria foram apenas campos de força que também podem se formar no éter livre. Quais são então os constituintes básicos de todos os átomos aos quais fomos levados pela dependência da massa na absorção de raios catódicos? Claramente, eles também são, em geral, somente campos de força em comum com os átomos inteiros. Portanto, denominei esses constituintes básicos de toda a matéria de “dinamides” (Lenard, 1998 [1906], p. 128).

A conclusão das medidas de absorção em diversas velocidades [...] me levou a assumir que não só a eletricidade negativa dos átomos, mas também a positiva, estão concentradas em um espaço muito pequeno, de modo que o volume atômico é preenchido pelos campos de força de ambas. Como os dois tipos de eletricidade devem estar presentes em quantidades iguais em um átomo eletricamente neutro, a suposição mais simples é que um *quantum* elementar negativo e um positivo estavam unidos se unem em um par, estabelecendo que todos os átomos são formados por tais pares, aos quais denominei “dinamides” (Lenard, 1918, p. 106).

Em um ensaio publicado em 1918, Lenard afirma que foram seus experimentos sobre raios catódicos que influenciaram o físico inglês J. J. Thomson a adotar a ideia de que todos os átomos “são compostos por eletricidade positiva e negativa, [...] com um espaço atômico uniformemente preenchido com eletricidade positiva, no qual circula um número de *quanta* elementar negativo proporcional ao peso atômico” (Lenard, 1918, p. 105).

Apesar de o modelo atômico dos “dinamides” ter sido considerado vago, tendo sido rejeitado em favor do modelo “pudim de passas” de Thomson (1904a), notadamente entre os físicos e químicos do Reino Unido, a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) manteve-se válida

³⁹ Disponível em: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomaufbau/ausblick/dynamidenmodell-von-lenard>. Acesso em: 27 nov. 2023.

como explicação para o efeito fotoelétrico e foi aceita na comunidade científica até meados de 1911 (Kuhn, 1978; Wheaton, 1978; Kragh, 1992, 2010; Niaz *et al.*, 2010; Klassen *et al.*, 2012).

2.2.3.4 A “Física Alemã” sob a Liderança de Philipp Lenard e Johannes Stark⁴⁰

Durante as décadas de 1920 e 1930, em uma sociedade alemã política e ideologicamente conflituosa, com visões nacionalistas de extrema-direita então endurecidas pela derrota na Primeira Guerra Mundial e com sentimento de ódio antissemita generalizado e crescente, surgiu o autointitulado movimento “Física Alemã” ou “Física Ariana”. O movimento esteve sob a liderança dos físicos Lenard e Stark, ambos laureados com o Prêmio Nobel de Física, em 1905 e 1919, respectivamente, e teve grande influência durante o regime nazista, servindo como ferramenta para propagar sua ideologia antissemita e justificar suas políticas de discriminação e perseguição aos cientistas judeus (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2014, 2020; Ferreira, 2015).

Os dois físicos nazistas afirmavam que as características culturais e raciais judaicas “estragavam” a pureza do pensamento científico alemão, rotulando a ciência produzida pelos físicos judeus como uma “fraude judaica internacional”. Essa visão supremacista da perspectiva da “Física Alemã” acerca das relações intrínsecas entre ciência “autêntica” e a pureza racial ariana, ou entre a raça do povo judeu e a ciência “falsa”, é evidente em um trecho do artigo intitulado “Nacional-socialismo e a Ciência”, escrito por Johannes Stark em 1934 (p. 10-12):

Na medida em que o trabalho científico não é meramente imitação, mas criação real, como qualquer outra atividade criativa, ele é condicionado pelos dons espirituais e caracterológicos de seus praticantes. Como os membros individuais de um povo têm um dom comum, a atividade criativa dos cientistas de uma nação, tanto quanto a de seus artistas e poetas, assim assume o selo de um distinto tipo *Völkisch* [nativo alemão].

⁴⁰ A discussão histórica apresentada nesta subseção encontra-se originalmente publicada em Suttini, Caluzi e Errobidart (2023b, p. 15-22). Ao examinar o funcionamento interno do movimento político nazista “Física Alemã”, gostaríamos de deixar claro que nosso intuito é exclusivamente histórico e crítico, sem qualquer endosso, simpatia ou validação das ideias e ações promovidas pelo regime. Em alguns trechos, será mostrada a perspectiva dos perpetradores por meio de citações diretas. Embora essa escolha seja arriscada, é necessária. Pois, ao observarmos de perto as figuras históricas responsáveis por atrocidades, podemos desmascará-las, com clareza, e, assim, desarmar os demagogos do presente. Durante regime nazista, todas as esferas sociais (cultura, religião, artes, educação, política, indústria, medicina etc.) foram profundamente impactadas. As instituições de “Ciência & Tecnologia”, assim como os debates sobre sua epistemologia da ciência, foram deturpados e usados como instrumentos de propaganda e perseguição, numa tentativa de deslegitimar a ‘ciência judaica’, o que resultou em uma onda de emigração de cientistas judeus renomados. Nossa análise objetiva, sobretudo, expor e condenar essas práticas abomináveis, alertando para os perigos devastadores que surgem quando regimes políticos impõem suas ideologias nefastas no desenvolvimento científico.

Não, a ciência não é internacional; é tão nacional quanto a arte. Isso pode ser evidenciado pelo exemplo de alemães e judeus nas ciências naturais (*apud* Mosse, 1966, p. 206).

Compartilhando da mesma crença supremacista, em agosto de 1935, Lenard enfatizou a ligação entre a ciência “autêntica” e a pureza racial ariana no primeiro parágrafo do prefácio de seu manual intitulado *Física Alemã em quatro tomos*. Lenard (1936) ataca a visão daqueles que afirmavam que a ciência era um esforço coletivo internacional, independentemente das características pessoais do pesquisador, tais como raça, gênero ou formação:

Alguém poderia perguntar: *Física Alemã*? Poderia ter dito também Física Ariana ou Física dos povos de tipo Nórdico, Física dos fundadores da realidade, dos perseguidores da verdade, a Física daqueles que fundaram a pesquisa científica. Vocês poderiam contestar-me: “A ciência é internacional e permanecerá sempre assim!” Mas isso é inevitavelmente baseado em uma falácia. Na realidade, como tudo que o homem cria, a ciência é determinada pela raça e pelo sangue. Ela pode parecer internacional quando *resultados* científicos universalmente válidos são erroneamente atribuídos a uma *origem* comum, ou quando não se reconhece que a ciência fornecida por povos de diferentes países é idêntica ou semelhante à ciência alemã, e que sua ciência só poderia ter sido produzida em virtude e à medida que outros povos são ou foram igualmente uma mistura racial predominantemente nórdica. Nações de diferentes misturas raciais praticam a ciência de maneira diferente (Lenard, 1936, p. ix-xv *apud* Hentschel, 1996, p. 100, grifo do original).

Observa-se que, em razão da crença nazista na pureza do sangue ariano e nos dons espirituais exclusivos dos homens germano-nórdicos (argumento racista, supremacista e nacionalista), os autodenominados físicos arianos defendiam que a ciência verdadeira só poderia ser desenvolvida exclusivamente por eles. Consequentemente, essa ciência seria superior e mais confiável que aquelas praticadas por outros povos. Para esses físicos, os cientistas judeus, um povo considerado de sangue impuro, sem o dom espiritual ariano, de raça inferior, produzia uma ciência não apenas diferente, mas também significativamente inferior à ciência germano-nórdica.

Os argumentos dos físicos arianos também abrangiam a dimensão epistemológica da natureza das ciências, apropriando-se indevidamente de questões sérias, relevantes e legítimas sobre o papel das hipóteses e da experimentação, tais como a separação entre ciência e metafísica, a importância da matemática na produção do conhecimento científico, bem como a definição de teoria científica e seus objetivos. Essas discussões foram distorcidas ao incorporar elementos racistas, baseados na linhagem sanguínea (Costa; Videira, 2007). Johannes Stark (1910) afirmou:

O respeito aos fatos e a aptidão para observação exata reside na raça germano-nórdica. [...] O espírito do alemão permite-lhe observar as coisas fora de si exatamente como são, sem a interpolação de suas próprias ideias e desejos, e seu corpo não se esquiva do esforço que a investigação da natureza exige dele. O amor do povo alemão pela natureza e sua aptidão para as ciências naturais são baseados nesse dom espiritual.

Assim, é compreensível que a ciência natural seja predominantemente uma criação do componente sanguíneo nórdico-germânico do ariano (Stark, 1910, p. 10-12 *apud* Mosse, 1966, p. 206).

No trecho destacado pode-se notar uma perspectiva epistemológica fortemente empirista e positivista adotada pelos físicos arianos em relação ao processo de construção do conhecimento científico. Nessa visão, a coleta, a observação e a análise de dados são consideradas neutras, objetivas e imparciais, guiadas com total respeito aos fatos empíricos, e supostamente desprovidas de qualquer viés subjetivo, como preferências teórico-metodológicas, crenças pessoais, interesses ou expectativas de resultados. Além disso, os físicos arianos defendiam que a formulação, a publicação de hipóteses, das leis, dos princípios e das teorias científicas deveriam ser restringidas pelo apoio de correspondências empíricas amplas e sólidas, as quais teriam sido previamente obtidas pela aplicação rigorosa, diligente e infalível do método científico experimental hipotético-dedutivo (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2014, 2020; Ferreira, 2015).

Evidentemente, a epistemologia empirista e positivista não foi uma criação nazista. No entanto, o trecho destacado revela uma distorção dos fundamentos dessa epistemologia por Stark. Ele afirma que a pureza sanguínea e os dons espirituais da raça germano-nórdica conferiam aos físicos arianos uma aptidão inata para as ciências naturais. Observa-se que essa suposta dádiva os condicionava a possuir maior respeito aos fatos empíricos, tornando-os superiores a outros cientistas ao conseguir abandonar vieses subjetivos nos trabalhos científicos. Para Lenard e Stark, cientistas como Isaac Newton (1643-1727), Johannes Kepler (1571-1630) e Charles Robert Darwin (1809-1882) eram exemplos primordiais a serem seguidos pelos cientistas arianos (Mosse, 1966).

No entanto, de acordo com a crença nazista de Stark e Lenard, os físicos judeus, em virtude de seu espírito judaico e a suposta impureza de sangue, eram uma raça inferior, considerada degenerada, sem escrúpulos e inerentemente corrupta. Consequentemente, uma condição que os tornava incapazes de conduzir investigações científicas de maneira neutra, objetiva e imparcial. Alegava-se que o ego dos físicos judeus, com seus interesses por dinheiro, fama e prestígio, os levavam a misturar fatos empíricos e desejos pessoais, resultando em pouca aptidão para as ciências naturais. Segundo essa visão distorcida de Stark, o objetivo dos físicos judeus era a confirmação de suas teorias a qualquer custo, em vez de buscar uma compreensão exata da natureza (Mosse, 1966).

Na perspectiva de Lenard e Stark, as teorias científicas desenvolvidas por cientistas de origem judaica deveriam ser consideradas meras abstrações e especulações fantasiosas,

desprovidas de qualquer mérito científico. Ademais, os físicos arianos defendiam a ideia de que o conhecimento científico deveria estar fundamentado em uma visão determinista e mecanicista dos fenômenos naturais, rejeitando as especulações abstratas e probabilísticas que resultassem de um suposto exagero no formalismo matemático na interpretação física da realidade. Eles consideravam a Teoria da Relatividade e a Física Quântica exemplos da “fraude judaica internacional” (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2014, 2020; Ferreira, 2015).

Lenard, em particular, elegeu, acima de tudo, a perspectiva epistemológica einsteiniana como a principal representação da decadência da ciência germano-nórdica. Em 13 de maio de 1933, ao escrever o artigo intitulado “Um grande dia para a Ciência: Johannes Stark é nomeado presidente do Instituto Físico e Técnico do Reich”, Lenard fez as seguintes declarações sobre o ambiente acadêmico e científico, à época, e sua relação com as ideias de Einstein:

Essa recente nomeação é um acontecimento de grande importância para todos aqueles envolvidos na ciência. Ela representa uma renúncia clara à predominância aparentemente inevitável do que pode ser brevemente denominado de pensamento einsteiniano na Física, e é um movimento em sentido à reafirmação das antigas prerrogativas dos cientistas: pensar de forma independente, guiados unicamente pela natureza [...].

[...] Na Física, o limite foi alcançado de cima para baixo. Com a massiva introdução de **judeus** em posições influentes, tanto em universidades quanto em academias, a observação direta da própria natureza, base fundamental de todo conhecimento científico, foi negligenciada e perdeu sua validade. O conhecimento das coisas do mundo externo supostamente deveria se basear nas fantasias da mente humana. Essas ideias, imediatamente chamadas de “teorias”, tinham então que ser “provadas” por experimentadores. Os últimos geralmente cumpriam com zelo e prontidão a pesquisa mais superficial possível. Com a repressão de comentários francos em oposição a tais procedimentos, a “liberdade de pesquisa” assumiu um novo sabor. Os resultados já podem ser sentidos em geral: **grandes segmentos da população perderam a confiança na ciência atualmente aceita**. Somente a tecnologia, que se baseia em conquistas de pesquisas sólidas anteriores, poderia continuar a ganhar essa confiança.

[...] O exemplo mais proeminente da influência prejudicial dos judeus na ciência foi fornecido pelo Sr. Einstein com suas “teorias”, que são uma combinação de conhecimento [experimental] sólido que já existia anteriormente e algumas adições arbitrárias que foram unidas matematicamente. Essas teorias estão agora desmoronando, revelando o destino inevitável dos produtos antinaturais. Mesmo cientistas renomados não podem ser poupados de críticas, pois permitiram que o “judeu da relatividade” ganhasse um forte apoio na Alemanha em primeiro lugar, não vendo ou não querendo ver quão equivocado era, mesmo do ponto de vista não científico, considerar exatamente esse judeu como um “bom alemão” (Hentschel, 1996, p. 49-50).

Dessa forma, percebe-se que as críticas dos físicos arianos não se baseavam somente em elementos raciais, sanguíneos e culturais. Esses elementos racistas foram indevidamente incorporados às controvérsias legítimas e relevantes já existentes na comunidade científica no que se refere à natureza epistemológica das ciências naturais, especialmente quanto ao valor

atribuído às bases empíricas, à matemática e ao papel das conjecturas abstratas e especulativas no processo de construção e validação de teorias científicas. De outro modo, na perspectiva dos físicos arianos, o problema epistemológico fundamental residia em uma abordagem estrangeira, judaica internacional e degenerada, em contraste com a natureza empirista e positivista das ciências germânico-nórdicas (Costa; Videira, 2007; Ferreira, 2015; Ball, 2020).

Os pressupostos epistemológicos da “Física Alemã” são coerentes e consistentes com a pragmática e tradicional educação científica germânica de Lenard e Stark. Ambos foram físicos experimentais muito talentosos. Em particular, as investigações de Lenard sobre os raios catódicos produziram contribuições significativas para compreensão da estrutura da matéria e da natureza da eletricidade. Isso é claramente observado não apenas no discurso de apresentação de sua *Nobel Lecture* pelo presidente da Real Academia Sueca de Ciências, mas também em seu detalhado levantamento histórico e pelas diversas homenagens e prêmios que recebeu ao longo de sua carreira. No entanto, conforme observado pelo escritor inglês John Cornwell em seu livro *Os cientistas de Hitler: ciência, guerra e o pacto com o demônio*, “brilhantismo individual e êxito cedo na ciência não são, é claro, garantia dos princípios racionais, desapaixonados e universais. [...] A existência de um ambiente científico, bem financiado, independente e ideal para descobertas inovadoras, não é garantia de consciência política madura” (Cornwell, 2003, p. 100).

Embora Lenard fosse um físico experimental renomado e de elevado nível profissional, suas qualidades como físico teórico eram consideradas duvidosas por outros cientistas. Em resposta aos seus ataques públicos à Teoria da Relatividade, em 27 de agosto de 1920, Einstein escreveu uma carta ao jornal *Berliner Tageblatt* intitulada “A minha resposta. Sobre a teoria da antirrelatividade”, na qual afirmou:

Um grupo heterogêneo se uniu para formar uma empresa sob o pretensioso nome de “Sindicato dos Cientistas Alemães [para a Preservação da Ciência Pura]”, atualmente com o único propósito de atacar a teoria da relatividade e a mim como seu autor aos olhos dos não físicos. [...] Entre os físicos de renome internacional, só posso citar o sr. Lenard como um crítico franco da teoria da relatividade. Admiro o sr. Lenard como um mestre da física experimental; entretanto, ele ainda tem que realizar algo em física teórica, e suas objeções à teoria da relatividade geral são tão superficiais que eu não considere necessário até agora respondê-las em detalhes. [...] Além disso, o sr. Gehrke faz alusão às objeções do sr. Lenard, muitas das quais estão ligadas a exemplos da mecânica da vida cotidiana. Essas objeções já estão invalidadas com base em muitas provas gerais de que, em primeira aproximação, as afirmações da teoria da relatividade geral estão de acordo com as da mecânica clássica (Hentschel, 1966, p. 1-3).

Filósofos e historiadores sugerem que Lenard era um sujeito de caráter profundamente conturbado, com forte sentimento de que suas realizações científicas eram constantemente

roubadas por outras “mentes inferiores” (Costa; Videira, 2007; Ferreira, 2015; Ball, 2020). Conforme registrado em seu breve relato biográfico disponibilizado pela Fundação Nobel, “algumas de suas descobertas foram grandes e outras muito importantes, mas ele reivindicou para elas mais do que seu verdadeiro valor” (The Nobel Foundation, 1998a, p. 137). O ressentimento por estar sendo ignorado e não recebendo o devido mérito pela comunidade científica internacional pode ser notado logo no primeiro parágrafo de sua *Nobel Lecture*:

Assim – utilizando o símile que vocês, meus estimados colegas da Academia das Ciências, têm usado no topo do seu diploma de membro –, falarei agora não apenas dos frutos, mas também das árvores que os produziram, e daqueles que plantaram essas árvores. Essa abordagem é a mais adequada no meu caso, pois nem sempre fui contado entre aqueles que colhem os frutos; tenho sido repetidamente apenas um daqueles que plantaram ou cuidaram das árvores, ou que ajudaram a fazer isso (Lenard, 1998 [1906], p. 105).

Com efeito, três ocasiões são particularmente importantes para a compreensão dos ressentimentos amargurados de Lenard em relação a outros cientistas. A primeira ocorreu em 1895, quando o físico alemão Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) relatou a observação dos raios X, produzidos em um novo “tubo de raios catódicos”, cuja construção é indiscutivelmente atribuída a Lenard. Ele considerou a realização científica de Röntgen “um bom exemplo de descoberta afortunada” (Lenard, 1998 [1906], p. 105) e reivindicou a coautoria e o reconhecimento de sua participação na observação dos raios X, uma vez que sua colaboração fora essencial para Röntgen obter uma válvula altamente sensível, necessária para a produção dos raios X no novo tubo de Crookes. Entretanto, em 1901, o comitê científico do primeiro Prêmio Nobel considerou que suas reivindicações não se sustentavam e decidiu que somente Röntgen era digno da honraria (Wheaton, 1978, 1983).

A segunda refere-se à resolução da controvérsia científica acerca da natureza dos raios catódicos entre os físicos do Reino Unido e da Alemanha, na qual a teoria corpuscular inglesa do elétron, defendida especialmente por meio dos trabalhos de Joseph J. Thomson, se sobressaiu sobre a teoria clássica do eletromagnetismo defendida pelos cientistas alemães. John Cornwell (2003, p. 101) relata que “Lenard detestava seu ex-colaborador inglês J. J. Thomson. Acusava-o de explorar sua pesquisa sobre o efeito fotoelétrico sem reconhecê-lo, e, portanto, alimentava um profundo desprezo pela ciência inglesa como um todo, que achava desleixada”. Lenard fez questão de registrar em sua *Nobel Lecture* que no livro publicado por Thomson em 1903, intitulado *Conduction of electricity through gases*, uma de suas obras foi erroneamente datada

(um ano depois da edição original), o que foi justificado em razão de uma reimpressão posterior desse trabalho de Lenard, mas que, no entanto, não foi corrigido pelo físico britânico⁴¹.

A terceira desenrolou-se a partir de 1905, quando Albert Einstein propôs sua “hipótese de *quantum* de luz” como um dos fundamentos para a teoria quântica da radiação e sua famosa “lei do efeito fotoelétrico”, formulada e corroborada, parcialmente, com base nos dados empíricos obtidos por Lenard três anos antes em suas investigações sobre o efeito fotoelétrico. Nos dez anos seguintes, a hipótese heurística revolucionária de Einstein foi responsável pelo ambiente de controvérsia científica na comunidade de físicos teóricos e experimentais, rivalizando diretamente com a até então bem-aceita “hipótese de gatilho” de Lenard, proposta em 1902 e refutada em meados de 1911 mediante suas próprias observações experimentais em colaboração com o físico alemão Carl Ramsauer (1879-1955). Em contraste, a “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905) alcançou consenso científico após a série de testes experimentais conduzidos pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953) e seus colaboradores no Laboratório Ryerson, na Universidade de Chicago, entre 1914 e 1916.

Compartilhando a avaliação subjetiva de Einstein de 1920, aqui citada anteriormente, deve-se reconhecer que Philipp Lenard fez importantes contribuições para a física experimental. Entretanto, suas inferências teóricas e modelos científicos propostos com base em suas observações empíricas nem sempre foram tão bem-sucedidas.

É possível conjecturar que, somados à ira inflamada decorrente da já mencionada resposta ácida de Einstein, em 1920, contra as objeções superficiais anti-relativistas, com seus sentimentos de amargura (e de antissemitismo) se aprofundaram ainda mais quando, em 1921, Albert Einstein – um físico judeu de renome internacional crescente – foi laureado com o prêmio Nobel de Física “por seus serviços à Física Teórica, e especialmente por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico”⁴².

Adicionalmente, Cornwell cita duas tragédias pessoais que se abateram sobre Lenard após a derrota da Alemanha na Primeira Guerra Mundial, além do seu ferido orgulho ultranacionalista. A primeira, de caráter familiar, ocorreu quando seu único filho, Werner Lenard, com apenas 22 anos, faleceu em fevereiro de 1922, em decorrência de uma infecção renal latente e períodos de desnutrição severa durante a guerra. A segunda foi de caráter financeiro: “[...] Lenard foi um dos investidores que trocaram ouro por títulos que perderam o

⁴¹ Ver nota 23 da *Nobel Lecture*, disponível como material suplementar em Suttini, Caluzi e Errobidart (2023b).

⁴² Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>. Acesso em: 8 abr. 2023.

valor nos anos inflacionários da República Democrática de Weimar. Ele estava convencido de que fora roubado de sua fortuna por políticos judeus” (Cornwell, 2003, p. 102).

Do ponto de vista profissional, seu antissemitismo militante lhe trouxe uma delicada situação em junho de 1922. Lenard foi duramente repreendido por ter se recusado a içar a bandeira de seu instituto na Universidade de Heidelberg a meio-mastro, em sinal de respeito ao ministro das Relações Exteriores de Weimar, Walther Rathenau, que fora assassinado por dois oficiais militares fanáticos de extrema-direita. Rathenau era amigo pessoal de Einstein, político, industrial judeu, que Lenard julgava ter causado danos irreparáveis à Alemanha. O episódio ganhou atenção da mídia após a ocupação do instituto pelo político social-democrata Carlo Mierendorff, apoiado por um grupo de estudantes e trabalhadores⁴³. O Senado da Universidade de Heidelberg considerou as atitudes de Lenard e de Mierendorff muito graves. O ministro da Cultura de Baden propôs como penalidade sua suspensão temporária, que foi revogada após uma manifestação de apoio da Sociedade de Física. Em decorrência dessa reprimenda, Lenard demitiu-se do instituto da Universidade de Heidelberg com bastante desgosto (Cornwell, 2003).

Dois anos mais tarde, em 8 de maio de 1924, seis meses após o fracassado golpe em Munique, com o qual Hitler e o Partido Nazista tentaram tomar o poder democrático e republicano de Weimar, Lenard e Stark⁴⁴ escreveram um artigo intitulado “O espírito de Hitler e a Ciência”, proclamando lealdade irrestrita a Hitler, no qual afirmaram:

Ele [Adolf Hitler] e seus camaradas de luta nos aparecem como dons de Deus dos tempos antigos, quando as raças eram mais puras, as pessoas eram maiores e as mentes menos iludidas. Isso nós sentimos; e esses dons divinos não devem ser tirados de nós. Somente esse pensamento já deveria ser uma base sólida o suficiente para manter o espírito alemão unido para seu grande objetivo: fundar uma nova Alemanha, com Hitler “batendo o tambor”, na qual o espírito alemão não é apenas tolerado novamente até certo ponto e libertado da prisão, não, mas na qual o espírito alemão é protegido, cuidado e assistido para que ele possa finalmente prosperar novamente e desenvolver-se ainda mais para a reivindicação da honra da vida em nosso planeta, que agora é dominado por um espírito inferior. As universidades e seus estudantes fracassaram, sobretudo naquelas matérias que já deveriam ter definido o ritmo há muito tempo. Mas também é muito melhor que “o homem do povo” esteja fazendo isso. Ele está aqui. Ele se revelou como o “Führer dos sinceros”⁴⁵. Nós vamos segui-lo (Lenard; Starck, 1924 *apud* Hentschel, 1996, p. 9-10).

⁴³ O escritor John Cornwell relata que na ocasião Lenard foi humilhado. “Um grupo de estudantes fez uma manifestação na frente do prédio, e esse grupo foi encharcado com água jogada de um andar superior, sem dúvida por orientação dele [Lenard]; em consequência, os jovens invadiram o instituto e o levaram com os braços presos às costas para o auditório, onde o submeteram a uma torrente de invectivas políticas” (Cornwell, 2003, p. 102).

⁴⁴ Johannes Stark, em 1922, pouco depois de receber o Prêmio Nobel de Física por suas contribuições no campo do eletromagnetismo, viu-se obrigado a se aposentar de sua cátedra na Universidade de Würzburg, em virtude de suas críticas cientificamente infundadas contra Albert Einstein e a Teoria da Relatividade (Mosse, 1996).

⁴⁵ Entende-se os alemães verdadeiramente leais a Hitler: “o alemão cidadão de bem”.

Inicialmente, Lenard esteve diretamente envolvido em diversas campanhas publicitárias discriminatórias e racistas contra a Teoria da Relatividade de Einstein. Em 1920, em Berlim, com o auxílio do ativista de extrema-direita Paul Weyland, ele orquestrou uma denúncia pública durante um encontro realizado pelo Sindicato dos Cientistas Alemães para a Preservação da Ciência Pura. Em outra ocasião do mesmo ano, Einstein e Lenard debateram frente a frente e respeitosa sobre aspectos científicos relacionados à Teoria da Relatividade no Congresso da Sociedade de Cientistas e Médicos Alemães, realizado na cidade de Bad Nauheim. Contudo, dois anos mais tarde, em 1922, Einstein recusou-se a participar do mesmo congresso, ocorrido em Leipzig, temendo ser fisicamente agredido por fanáticos antissemitas⁴⁶. Em 1931, cerca de uma centena de intelectuais germânicos antissemitas contribuíram para um volume denunciando Einstein e suas teorias. No entanto, entre os signatários, havia pouquíssimos físicos alemães renomados além de Lenard e Stark (Ball, 2014, 2020).

Como resultado da influência dos valores socioculturais nefastos defendidos pela ideologia nazista, tais como nacionalismo extremo, totalitarismo, antissemitismo e supremacia racial ariana, muitos cientistas judeus, como Albert Einstein, Max Born, James Franck, Lise Meitner e Niels Bohr, tiveram suas produções acadêmicas constantemente atacadas por campanhas publicitárias discriminatórias⁴⁷ e sofreram perseguições institucionais baseadas em motivos raciais. As ações discriminatórias incluíram desde a não nomeação para cargos e cátedras em institutos e universidades, recusas de publicações de artigos e livros por editoras, bloqueios de recursos financeiros por agências de fomento, expulsões de laboratórios de pesquisa, além de outros tipos de violências e arbitrariedades que restringiam a liberdade de pesquisa (Costa; Videira, 2007; Ferreira, 2015; Ball, 2020).

A crescente e violenta repressão nazista na comunidade científica, entre 1920 e 1933, causou um grande êxodo de cientistas da Alemanha, muitos dos quais migraram para outros países, especialmente para os Estados Unidos e, em menor grau, Inglaterra, Canadá e América Latina, onde continuaram a contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico (Ball, 2014, 2020).

⁴⁶ Costa e Videira (2007), citando o livro de memórias de Werner Heisenberg (1901-1976), *A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política*, consideram adequado tomar o Congresso da Sociedade de Cientistas e Médicos Alemães, realizado no início do verão de 1922, em Leipzig, como marco inicial do movimento “Física Alemã”. Para mais detalhes, cf. Heisenberg (1996).

⁴⁷ Em 10 de maio de 1933, logo após o boicote das empresas judaicas no território alemão, a Associação dos Estudantes Alemães declarou que a literatura deveria ser limpa do “espírito não alemão”. O resultado foi a queima ritualística de dezenas de milhares de livros “estragados” pelo intelectualismo judaico. Estes incluíam obras de Sigmund Freud, Bertolt Brecht, Karl Marx, Stefan Zweig, Walter Benjamin e Albert Einstein (Costa; Videira, 2007).

A partir de 1926, Lenard e Stark tornaram-se membros convictos do Partido Nacional Socialista de Adolf Hitler e abraçaram sua ideologia irrestritamente. Por sua vez, anos mais tarde, o partido recompensou a ambos com o prestígio e *status* outrora tão desejados. Em poucos anos, os dois cientistas estabeleceram influências sobre vários programas de pesquisas com aplicações militares, trabalhando em estreita colaboração com a Luftwaffe (força aérea táctica) e o exército (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Heilbron, 2000; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2014, 2020; Ferreira, 2015).

Em maio de 1933, aos 59 anos, Stark foi nomeado “presidente do Instituto Físico e Técnico do Reich” (*Physikalisch-Technische Reichsanstalt* – PTR, equivalente à Agência Brasileira de Normas Técnicas – ABNT), obtendo a influência necessária para indicar e nomear pessoas em cargos estratégicos e de autoridade na gestão científica-tecnológica da Alemanha nazista (Mosse, 1966).

Lenard, aos 71 anos, tornou-se “chefe da Física Alemã”, um tipo de “Führer” que representava e propagava os valores da ciência nazista, por meio de uma série de palestras, artigos e livros. Na Figura 14, é possível observar Lenard sendo agraciado com um doutorado honorário pela Universidade de Heidelberg, em 1942 (Mosse, 1966). Pode-se ainda conferir a presença de um indivíduo vestindo uniforme nazista, que se trata de Wilhelm Ohnesorge, político ministro do Postal do Reich, o serviço de correios alemão, que foi assistente de Lenard durante seu tempo na Universidade de Kiel.

Em janeiro de 1933, quando Hitler assumiu o cargo de chanceler do Reich, uma das primeiras medidas antissemitas oficiais adotadas pelos nacional-socialistas foi a “Lei de Restauração do Serviço Público Profissional”. Promulgada em abril daquele ano, a lei determinava que “§3 (1) Funcionários públicos que não são de ascendência ariana devem ser colocados em aposentadoria (§§ 8 e seguintes); [...] (6) no caso de funcionários honorários, estes devem ser dispensados do cargo”⁴⁸ (*apud* Hentschel, 1966, p. 21-22).

Figura 14 - Philipp Lenard recebendo o doutorado honorário na Universidade de Heidelberg, em 1942.

⁴⁸ “Lei de Restauração do Serviço Público Profissional”, cf. “Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums”, de 7 abr. 1933, em *Reichsgesetzblatt*, Berlim, parte I, n. 34, p. 175-177, 8 abr. 1933.



Fonte: Coleção Emilio Segrè Visual Archives, American Institute of Physics.

Com essa deliberação, o impacto na comunidade científica de físicos alemães foi imediato e profundamente negativo, pois cerca de 25% do total deles era considerado “não ariano”. Além disso, o regime nacional-socialista mantinha sob absoluto controle político a ciência e as universidades alemães, em geral, e a física, em particular, por considerá-la um covil de judeus e comunistas (Ball, 2020).

Nos anos seguintes, as perseguições a cientistas judeus e seus familiares, incluindo cônjuges e parentes não arianos, intensificaram-se. Essas ações resultaram em prisões, assassinatos, expropriação de bens e propriedades, trabalhos forçados em campos de concentração e outras atrocidades. Como consequência, a comunidade de física alemã perdeu, em pouco tempo, sua primazia na ciência⁴⁹. “Somente na Universidade de Göttingen, um dos maiores e principais centros de pesquisa alemã em física teórica da época, um quarto dos cientistas foi perdido” (Ball, 2020, p. 151). Simbolicamente, pode-se dizer que o centro de gravidade da física teórica deslocou-se da Universidade de Göttingen (Alemanha) para a Universidade de Princeton (Estados Unidos).

De acordo com Philip Ball, ex-editor da revista *Nature*, autor do livro *Servindo ao Reich: a luta pela alma da Física sob Hitler*, a resposta da comunidade científica alemã a esses éditos nazistas parece hoje perturbadoramente complacente. Segundo o autor, após a década de 1930, Einstein, em geral, recebia apoio público de seus colegas físicos alemães quanto às suas ideias científicas revolucionárias. Entretanto, o autor ressalta que, na maioria das vezes, as

⁴⁹ Entre 1901 e 1945, o percentual de prêmios Nobel de alemães nas áreas de física, química e medicina foi de 30%. Entre 1946 e 2000, diminuiu para 12%, enquanto o percentual americano subiu de 15% para 51% (Ball, 2020).

discussões sobre política e raça eram evitadas, a fim de manter uma clara distinção entre esses assuntos “problemáticos” e as pesquisas científicas de Einstein.

Philip Ball destaca uma citação do editor austríaco da revista científica *Naturwissenschaften*, Paul Rosbaud, expressando sua consternação com a falta de firmeza dos acadêmicos alemães em relação aos éditos nazistas da época:

Lembro-me de um ilustre membro da Universidade de Göttingen dizendo-me: “Se eles se aventurarem a despedaçar nossa universidade, expulsando homens como James Franck, [Max] Born, [Richard] Courant, [Edmund] Landau (os dois últimos matemáticos), nos ergueremos como um homem para protestar contra isso”. No dia seguinte, os jornais noticiaram que os mesmos cientistas e muitos outros haviam sido demitidos por causa de sua raça judaica e sua influência degenerada sobre universidades e estudantes. E todos os outros membros da Universidade de Göttingen permaneceram sentados e se esqueceram de sua intenção de se levantar e protestar (*apud* Ball, 2020, p. 152).

Ainda segundo Philip Ball (2020), a avaliação das circunstâncias por Leó Szilárd⁵⁰, físico húngaro que trabalhava na Universidade de Berlim em 1933, mas que em breve partiria para a Inglaterra, retrata a sensação de impotência de muitos cientistas da época:

Percebi que os alemães sempre adotavam um ponto de vista utilitário. Eles perguntavam: “Bom, suponha que eu me oponha a isso, que bem eu faria? Eu não faria muito bem, apenas perderia minha influência. Então, por que eu deveria me opor?” Veja, o ponto de vista moral estava completamente ausente, ou muito fraco, e cada consideração era simplesmente sobre qual seria a consequência previsível da minha ação. E, com base nisso, cheguei à conclusão, em 1931, de que Adolf Hitler chegaria ao poder, não porque a força da Revolução Nazista fosse tão forte, mas porque eu pensava que não haveria absolutamente nenhuma resistência (Szilárd, 1979, p. 56 *apud* Ball, 2020, p. 152).

No entanto, as influências negativas da ideologia nazista não se restringiram apenas aos aspectos políticos, econômicos, sociais e culturais do processo de construção do conhecimento científico na sociedade alemã durante o Terceiro Reich. Os valores socioculturais da ideologia nazista também permearam o conteúdo das próprias conjecturas científicas formuladas na época, como no caso das “teorias eugênicas alemãs”. Nelas, o valor da supremacia racial era proeminente, e a função de cada área de estudo era estabelecer as bases científicas para a ideologia nazista. A antropologia explicaria a origem das desigualdades físico-mentais entre arianos e não arianos; a história mostraria a evolução superior da raça ariana; e a sociologia apontaria as causas dos comportamentos aberrantes e dos desvios de condutas ético-morais dos

⁵⁰ Leó Szilárd (1898-1964) foi um renomado físico nuclear húngaro naturalizado norte-americano em 1943. A famosa “Carta Einstein-Szilárd” foi escrita por Szilárd e assinada por Albert Einstein e enviada ao presidente dos Estados Unidos, Franklin D. Roosevelt, em 2 de agosto de 1939, na tentativa de convencê-lo a usar a energia atômica para fins militares. Em 1945, Szilárd protestou contra o lançamento das bombas nucleares sobre Hiroshima e Nagasaki, no Japão.

não arianos. Em conjunto, tais corpos de conhecimentos serviriam de bases científicas de apoio para a implementação das políticas e medidas governamentais de controle social e purificação da raça ariana⁵¹.

Embora tenha alcançado sucesso na disseminação e estabelecimento de valores ideologicamente nazistas no sistema acadêmico alemão, tendo como alvo principal cientistas judeus e apoiadores das teorias de Einstein, o pequeno grupo de fanáticos e nacionalistas extremistas autointitulados “físicos arianos” não conseguiu assegurar o apoio incondicional do Partido Nazista para os rumos pretendidos no desenvolvimento científico-tecnológico (Mosse, 1966; Hentschel, 1996; Heilbron, 2000; Cornwell, 2003; Costa; Videira, 2007; Ball, 2014, 2020; Ferreira, 2015).

Mais do que um mecanismo de propaganda ideológica ou interesse em disputas puramente acadêmicas entre teorias científicas arianas e judaicas, o Partido Nazista compreendia a importância crucial da física para o desenvolvimento científico-tecnológico de armamentos militares cada vez mais poderosos, independentemente das suas raízes epistemológicas e valores socioculturais subjacentes.

Esse aspecto tornou-se evidente após a publicação dos primeiros estudos sobre fissão nuclear, em 1938. Com a clara possibilidade e necessidade de desenvolver uma “bomba nuclear nazista”, para a qual as teorias da física quântica e da relatividade (antes rotuladas pejorativamente de “fraude judaica internacional”) desempenhavam papel essencial ao fornecer uma interpretação mais precisa da estrutura da matéria, o Partido Nazista e os físicos experimentais alemães passaram a defender cada vez mais explicitamente investimentos em pesquisas voltadas para a aplicação tecnológica dessas teorias científicas (Costa; Videira, 2007; Ferreira, 2015; Ball, 2020). Segundo o historiador George H. Mosse:

Há poucas dúvidas de que a ciência nazista, ao se afastar da famosa tradição das realizações científicas alemãs, contribuiu para o fracasso final do Terceiro Reich no esforço de guerra. Não foi por acaso que os Aliados, e não a Alemanha, desenvolveram a bomba atômica, a “arma milagrosa” pela qual Adolf Hitler esperou em vão (Mosse, 1966, p. 200).

⁵¹ Sobre as origens das “teorias eugênicas”, faz-se importante ressaltar que o primeiro trabalho científico sobre eugenia surgiu na Inglaterra, em 1865. Francis Galton, sobrinho de Charles Darwin, publicou um artigo na *Macmillan Magazine* no qual utilizou as teorias científicas de seu tio para alertar sobre os riscos de uma reprodução indiscriminada e a necessidade de controle social dos casamentos, a fim de evitar a degeneração das melhores estirpes inglesas. A tentativa de construção de uma teoria científica eugênica que validasse, com bases amplas e sólidas em evidências empíricas, o valor e a tese da supremacia racial de determinada sociedade em relação às outras não pode ser atribuída exclusivamente ao regime nacional-socialista alemão, entre 1933 e 1945. No entanto, os rumos da eugenia no contexto histórico-social da Alemanha nazista possuem algumas peculiaridades em relação àqueles seguidos pela Inglaterra na segunda metade do século XIX (Costa; Videira, 2007).

Muitos cientistas apoiadores das teorias de Einstein conseguiram ser cautelosos o suficiente para seguir uma linha muito tênue que evitasse que seus trabalhos fossem endossados pelas visões políticas “problemáticas” envolvendo Einstein. Em particular, pelo não reconhecimento muito explícito do constructo da teoria da relatividade quando a utilizavam. Durante a Segunda Guerra Mundial, o físico alemão Werner Heisenberg, por exemplo, frequentemente omitia referências aos trabalhos de Einstein em suas palestras “culturais” nos territórios ocupados, embora os conteúdos do físico judeu estivessem presentes em suas exposições (Costa; Videira, 2007).

Além desse fator pragmático-tecnológico, historiadores das ciências argumentam que a inabilidade política e de persuasão de Lenard e Stark contribuiu para o fracasso do movimento “Física Alemã” em atrair mais adeptos influentes na comunidade científica. De acordo com o historiador das ciências americano John L. Heilbron, “quanto a [Johannes] Stark, que retratava [Max] Planck como uma criatura de Einstein e um viciado em internacionalismo, sua incapacidade para muito além de intrigas e injúrias logo neutralizou sua influência. Se ele fosse menos louco, teria sido muito mais perigoso” (Heilbron, 1968, p. 171).

No estudo das implicações epistemológicas relacionadas ao movimento “Física Alemã”, Costa e Videira (2007) argumentam que certas objeções à física teórica eram, de fato, problemas relevantes e muitas vezes propostas por estudiosos que não compartilhavam crenças políticas e raciais antisemitas. Por meio da análise da posição do físico Werner Heisenberg, os autores apontam que as críticas epistemológicas dos físicos arianos foram levadas a sério por esse cientista, não apenas por motivos políticos, mas porque representavam dilemas reais nas ciências naturais. “Em 17 de setembro de 1934, [...] Heisenberg teve suficiente perspicácia para tocar nos temas centrais apresentados pelos oponentes da física teórica, fato este que pode ser constatado já no próprio título da sua palestra [*Recentes mudanças nos fundamentos das Ciências Exatas*]” (Costa; Videira, 2007, p. 327).

Os dois estudiosos ainda enfatizam que a seriedade do posicionamento filosófico de Werner Heisenberg perante o ataque dos físicos arianos (mantendo-se particularmente atento a fim de evitar qualquer brecha que permitisse uma refutação complexa por parte de seus oponentes) foi importante não apenas para reflexões epistemológicas sobre a natureza das ciências, mas para impedir o avanço ainda maior da ideologia nazista, propagada por Lenard e Stark no seio da comunidade científica (Costa; Videira, 2007).

Lenard encerrou sua carreira como professor de física teórica-experimental na Universidade de Heidelberg em 1931, alcançando o *status* de emérito antes de ser expulso de seu cargo pelas forças de ocupação aliadas em 1945, aos 83 anos. De 1927 a 1945, o *Helmholtz-*

Gymnasium Heidelberg levou o nome de *Philipp Lenard Schule*, porém, como parte da eliminação de nomes de ruas e monumentos nazistas, o colégio foi renomeado, em setembro de 1945, por ordem do governo militar. Philipp Eduard Anton von Lenard, casado com Katharina Schlehner, faleceu em 20 de maio de 1947, em Messelhausen (Walker, 1995).

Passados dois anos do fim da Segunda Guerra Mundial, em 1947, Stark foi julgado e classificado como “Major Offender”, ou seja, um criminoso de alta gravidade, então condenado a quatro anos de prisão, que fora posteriormente suspensa por um tribunal de desnazificação. Stark passou seus últimos anos de vida em Gut Eppenstatt, perto de Traunstein, na Alta Baviera, onde morreu em 1957, aos 83 anos (Walker, 1995).

A literatura específica sobre as relações entre ciência e ideologia nazista é vasta, e as informações apresentadas nesta subseção não almejam abranger todas as suas nuances. No entanto, objetivou-se fornecer subsídios mínimos para que professores possam mediar a problematização de uma imagem socialmente neutra do trabalho científico, na qual se ignoram “[...] as complexas relações entre ciência, tecnologia, sociedade (CTS) [e ambiente] e proporciona-se uma imagem deformada dos cientistas como seres ‘*acima do bem e do mal*’, fechados em torres de marfim e alheios à necessidade de fazer opções” (Gil-Pérez *et al.*, 2001, p. 133, grifo do original).

A problematização sobre questões ética, morais e políticas sobre a NdC é uma necessidade emergente da própria concepção de “educação científica crítica”, cujo propósito é formar cidadãos conscientes, com um entendimento mais preciso sobre as práticas científicas. Desse modo, indivíduos podem dispor de conhecimentos, habilidades, competências e senso crítico para avaliação de informações e tomada de decisões socialmente mais responsáveis acerca de problemas que envolvem ciência, tecnologia, sociedade, ambiente e as relações existentes entre eles.

A constatação dos movimentos crescentes de negacionismo científico e de ataques às instituições acadêmicas e de pesquisa serve como advertência para a necessidade de uma problematização mais aprofundada das imagens distorcidas do trabalho científico. Além disso, destaca a importância de que professores de disciplinas científicas apresentem uma compreensão mais precisa e bem informada sobre as práticas científicas.

O movimento nazista “Física Alemã” teve um impacto prejudicial significativo na ciência alemã, o que ocasionou uma perda irreparável de talentos científicos e na supressão da livre troca de ideias e do pensamento crítico. Essa experiência sombria pode servir como um lembrete para professores de física sobre as consequências devastadoras do preconceito, do racismo e da discriminação nas práticas científicas e na sociedade como um todo. Reforça-se a

importância de reconhecer e combater essas formas de opressão, promovendo uma ciência inclusiva, justa e aberta a todos.

2.2.4 1905: Albert Einstein e sua Hipótese Heurística de “Quantum de Luz”

“Uma nova verdade científica não triunfa por convencer seus oponentes e fazê-los ver a luz, mas sim porque seus oponentes eventualmente morrem, e cresce uma nova geração que está familiarizada com ela” (Planck, 1949, p. 33).

Albert Einstein (1879-1955) nasceu em Ulm, Alemanha, em 14 de março de 1879. Alguns meses depois de seu nascimento, em razão dos negócios empresariais de seu pai, que era engenheiro eletricitista, sua família se mudou para a cidade de Munique, onde ele viveu toda a sua infância e iniciou seus estudos no Luitpold-Gymnasium. Entre 1896 e 1901, Einstein estudou no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich – ETHZ*), na Suíça, e obteve o diploma no Curso de Graduação em Física-Matemática. Em 1902, após várias recusas para ser admitido como professor assistente universitário, aceitou um cargo de examinador de terceira classe no Instituto Federal Suíço de Propriedade Intelectual em Berna (Suíça), que seria exercido até 1908 (cf. Figura 15), quando, finalmente, foi indicado para *Privatdozent*⁵² na Universidade de Berna (The Nobel Foundation, 1998b).

Ao longo de sua carreira, passou pelas universidades de Zurique (1909-1911; 1912-1914), Praga (1911-1912) e Berlim (1914-1933). Com a ascensão do Partido Nazista e de Adolf Hitler (1889-1945) ao poder em 1933, emigrou para os Estados Unidos, assumindo o cargo de professor de física teórica no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton, e aposentou-se em 1945. Einstein faleceu em 18 de abril de 1955, em decorrência da ruptura de um aneurisma (The Nobel Foundation, 1998b).

⁵² “*Privatdozent*” refere-se a um título acadêmico usado em alguns países de língua alemã (como Alemanha, Áustria e Suíça), para designar um acadêmico que possui qualificação para lecionar, porém sem uma posição de emprego permanente na universidade. Essa posição acadêmica não existe no Brasil. A tradução como “professor privado” ou “conferencista ou docente particular” é considerada adequada, pois esses termos refletem a natureza do cargo, indicando que o professor possui uma posição acadêmica, mas não é contratado como funcionário efetivo da universidade. Ele é remunerado pelos estudantes por meio de taxas.

Figura 15 - Albert Einstein (1879-1955) no Escritório de Patentes em Berna, Suíça.



Fonte: Coleção Emilio Segrè Visual Archives, American Institute of Physics.

Da mesma forma que o ano de 1666 ficou conhecido como “*Anus Mirabilis*” (“Ano Maravilhoso” ou “Ano Miraculoso”) de Isaac Newton – quando, aos 23 anos, isolado em sua propriedade rural em Woolsthorpe devido à peste bubônica, desenvolveu os fundamentos do cálculo diferencial e integral, realizou experimentos com a decomposição da luz branca em um espectro de cores usando um prisma e formulou as ideias iniciais sobre a gravitação universal –, o ano de 1905 é considerado por historiadores e divulgadores da ciência como o “*Anus Mirabilis*” de Albert Einstein. Nesse ano, enquanto ainda trabalhava no escritório de patentes em Berna, ele publicou uma série de cinco artigos científicos que, em poucos anos, exerceriam profunda influência nos rumos da História da Física. Entre suas contribuições, destacam-se a hipótese revolucionária dos “*quanta* de luz” e sua aplicação para explicar o efeito fotoelétrico, a análise do movimento browniano que confirmou a existência de átomos e moléculas, a formulação da Teoria da Relatividade Restrita, que alterou e unificou os conceitos de espaço e tempo; e a derivação da célebre equação $E = mc^2$, que estabeleceu a equivalência entre massa e energia.

No primeiro artigo, intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”⁵³ (submetido em 18 de março), Einstein aborda as propriedades da radiação eletromagnética e investiga a hipótese de que, para algumas situações específicas, a energia luminosa está distribuída de maneira descontínua no espaço e no tempo, consistindo em um número finito de “*quanta* de energia” independente e indivisível, isto é, que

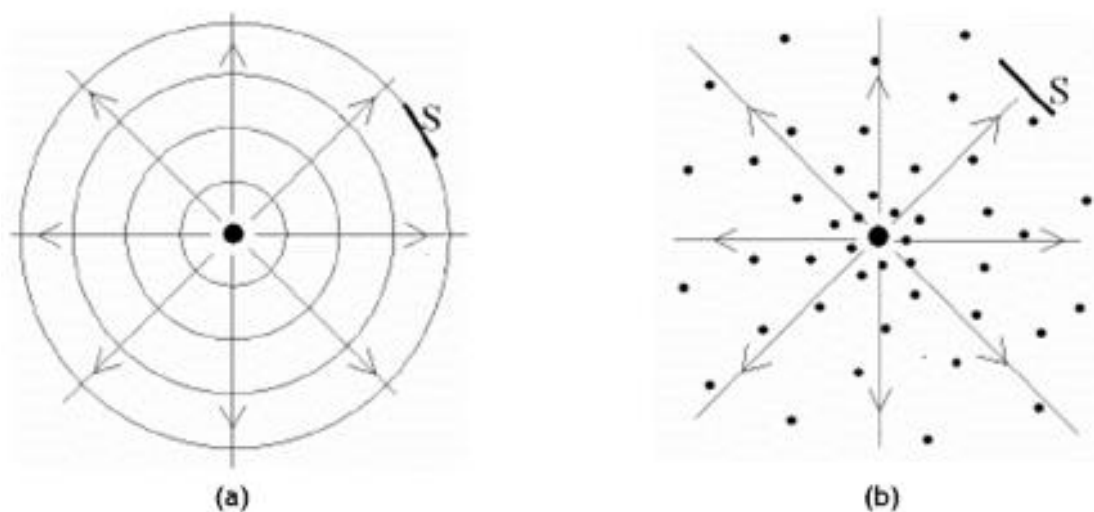
⁵³ Esse artigo, originalmente publicado em língua alemã (cf. Einstein, 1905), é amplamente conhecido e discutido na literatura em ensino de física, com tradução para vários idiomas (cf. Einstein, 1989, em inglês). Vale mencionar que o artigo conta com uma tradução do inglês para a língua portuguesa (cf. Einstein, 2005).

somente podem ser absorvidos e/ou emitidos em unidades inteiras. Nas palavras do próprio Einstein:

[...] De acordo com essa hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido de uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de “*quanta* de energia”, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais (Einstein, 1905, p. 133).

Na virada do século XX, essa concepção era completamente contraditória e inconsistente com todos os fatos estabelecidos pela bem-sucedida teoria clássica do eletromagnetismo. De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, incluindo a luz. Com efeito, a ideia de uma perturbação ondulatória eletromagnética que permanece localizada no espaço e no tempo, por si só, contrapõe-se à própria definição conceitual de onda, especialmente quando se consideram as propriedades de dispersão, difração e interferência da luz.

Figura 16 - Incompatibilidade conceitual entre as teorias clássica e quântica em relação à natureza da luz.



Nota: (a) A propagação da luz de acordo com a teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell: frente de ondas esféricas concêntricas expandem-se a partir de uma fonte puntiforme; (b) A propagação da luz de acordo com a teoria quântica de Einstein: “*quanta* de energia” localizados no espaço, gerados pela fonte puntiforme, afastam-se radialmente.

Fonte: Dionísio (2005, p. 157)

A Figura 16 esquematiza a incompatibilidade conceitual entre as teorias clássica e quântica em relação à natureza da luz. Primeiramente, (a) de acordo com a teoria clássica do eletromagnetismo, à medida que as frentes de ondas se afastam, a onda enfraquece, perdendo intensidade e amplitude, pois sua energia se distribui de maneira contínua sobre volumes cada vez maiores. Entretanto, uma determinada superfície S sempre será uniformemente iluminada

pela onda incidente, independentemente da fraqueza da fonte ou da distância em relação a ela. Em contrapartida, (b) segundo a teoria quântica da radiação, ao propagar-se, cada “*quantum* de luz” manterá sempre a mesma energia com a qual foi criado e transferirá essa energia para a superfície S sobre a qual incidir. Nesse modelo, a diminuição da intensidade se manifesta pela rarefação na concentração dos *quanta* por unidade de volume. Dessa forma, se a fonte for fraca ou se a superfície S estiver afastada, poucos “*quanta* de luz” transferirão sua energia para ela; no entanto, cada um realizará essa transferência integralmente (Dionísio, 2005).

Portanto, uma pergunta se impõe: Diante desse contexto histórico-científico relacionado à bem-sucedida teoria clássica do eletromagnetismo, sobre quais bases Einstein fundamentou sua “hipótese de *quantum* de luz”⁵⁴, que o conduziu ao desenvolvimento inicial da teoria quântica para a natureza da luz?

Para responder a esse questionamento, a seguir, será discutida cada uma das seções do artigo de Einstein (1905), buscando compreender a cadeia de raciocínio e os fatos que o levaram a tal hipótese. A estrutura textual do artigo é dividida em uma “introdução” e nove seções.

2.2.4.1 Análise e Discussão do Artigo de Einstein (1905)

(a) Introdução

De imediato, no primeiro parágrafo do artigo, Einstein afirma que a dicotomia entre a teoria atômica da matéria e a teoria clássica do eletromagnetismo do campo é o ponto de partida de suas considerações. Ele destaca que seu problema de pesquisa se origina do reconhecimento da existência de uma profunda diferença de conceitos teóricos e de formalismo matemático em relação à teoria cinética dos gases, que pressupõe a natureza descontínua e discreta da matéria, e a teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell, que se fundamenta na natureza contínua dos campos. Em suas palavras:

Há uma profunda diferença formal entre os conceitos teóricos que os físicos formularam a respeito dos gases e de outros corpos ponderáveis [partículas] e a teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no assim chamado espaço vazio. Embora consideremos o estado de um corpo como completamente determinado pelas posições e velocidades de um número muito grande, mas ainda assim finito, de átomos e elétrons, fazemos uso de funções espaciais contínuas para determinar o estado eletromagnético de um volume no espaço, de modo que um número finito de

⁵⁴ No artigo, Einstein sempre emprega o termo “*quantum* de luz”, e não a palavra “fóton”.

parâmetros não pode ser considerado suficiente para determinação completa do estado eletromagnético do espaço. De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, portanto também para a luz, enquanto, de acordo com o ponto de vista atual dos físicos, a energia de um corpo ponderável deve ser representada como uma soma sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser dividida em um número arbitrariamente grande de partes arbitrariamente pequenas, mas, de acordo com a teoria de Maxwell (ou, de modo mais geral, de acordo com qualquer teoria ondulatória), a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente (Einstein, 1905, p. 132).

Conforme observado por Martins (2005), o intuito do texto de Einstein parece ser prevenir sobre os possíveis limites de abrangência e de validade da teoria clássica do eletromagnetismo, levando o leitor a indagar: Uma vez que a matéria parece ser contínua vista de longe, mas sabe-se que ela se revela descontínua quando vista de muito perto, será que, talvez, para a luz, a teoria clássica do eletromagnetismo devesse ser também uma teoria descontínua do campo? De outro modo, seria o campo eletromagnético contínuo, com valores bem definidos para matéria e energia em todos os lugares e momentos, simples construções fictícias que representam, na verdade, médias sobre um grande número de partículas?

Com efeito, a questão filosófica/conceitual da “continuidade” *versus* “descontinuidade” já tinha sido explorada dez anos antes pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), no contexto do desenvolvimento da termodinâmica estatística, cujos trabalhos Einstein (1902, 1903, 1904) estudou em profundidade. Boltzmann assim afirmou:

Um *continuum* real deve consistir em um número infinito de partes; no entanto, um número infinito é indefinível. Além disso, ao assumir um *continuum*, é necessário considerar as equações diferenciais parciais para as propriedades em si como inicialmente dadas. No entanto, é desejável distinguir as equações diferenciais parciais, que podem ser submetidas a testes empíricos, de suas fundações mecânicas (como Hertz enfatizou especialmente para a teoria da eletricidade). Assim, as bases mecânicas das equações diferenciais parciais, quando baseadas no movimento de partículas menores, com valores médios restritos, ganham muito em plausibilidade; e até o momento nenhuma outra explicação mecânica dos fenômenos naturais, exceto o atomismo, foi bem-sucedida. [...] Uma vez que se admite que a aparência de um *continuum* é mais claramente compreendida ao assumir a presença de um grande número de partículas discretas adjacentes, supostas a obedecer às leis da mecânica, somos levado à suposição adicional de que o calor é um movimento permanente das moléculas (Boltzmann, 2011 [1896], §1, p. 5-6).

Na mesma perspectiva, Lima *et al.* (2017) afirmam que Einstein implicitamente defende a obrigatoriedade de uma simetria conceitual entre matéria e campo, com base no princípio metafísico subjacente de crença na unidade da Física, perguntando: A natureza é contínua ou descontínua?

Ao fim da introdução, Einstein faz a importante ressalva de que a proposição de sua “hipótese de *quantum* de luz” é, acima de tudo, em caráter heurístico⁵⁵, com o objetivo principal de explicar de maneira mais simplificada alguns fenômenos relacionados à emissão, absorção e transformação da luz, cuja ocorrência é temporalmente quase instantânea.

É nessa perspectiva que, na parte final do artigo (seções 7, 8 e 9), Einstein irá demonstrar como sua hipótese pode ser aplicada para interpretar mais facilmente as observações experimentais disponíveis a respeito dos fenômenos de fotoluminescência (a regra de Stokes), da produção de raios catódicos por luz ultravioleta (o efeito fotoelétrico)⁵⁶ e da ionização dos gases por meio da luz ultravioleta.

(b) 1. Sobre uma dificuldade que diz respeito à teoria da radiação do corpo negro

Na seção 1 de seu artigo, Einstein explora uma contradição específica entre a teoria cinética dos gases perfeitos e a teoria da radiação do corpo negro de Max Planck (1901)⁵⁷, a qual foi desenvolvida com base nos fundamentos da teoria clássica do eletromagnetismo e da teoria do elétron de Thomson (1904a). Sua análise concentra-se nos resultados obtidos para o cálculo da energia cinética média de um elétron ligado oscilando em movimento harmônico

⁵⁵ De acordo com Hertwig e Todd (2002, p. 449), o termo “heurístico” utilizado no título do trabalho de Einstein (1905) significa que o físico alemão considerava sua “hipótese de *quantum* de luz” ainda incompleta, ou até mesmo falsa, mas ainda assim útil. Ele afirmou: “Neste trabalho, desejo apresentar a cadeia de raciocínio e citar os fatos que me levaram por esse caminho, na esperança de que a abordagem aqui apresentada venha a se mostrar útil para alguns pesquisadores em suas investigações” (Einstein, 1905, p. 133). Dessa forma, é possível que Einstein reconhecesse que sua “teoria quântica da luz” ainda era incompleta, uma vez que seu desenvolvimento estava apenas começando, mas que ele acreditava em seu uso transitório no processo de construção de uma teoria mais completa. A palavra “heurística” (termo de origem grega que significa “servir para descobrir”) é um tipo de abordagem para um problema, que é necessariamente incompleta, dada a limitação do conhecimento disponível e, portanto, inevitavelmente falsa, mas que é útil como guia de pensamento para uma direção apropriada.

⁵⁶ Esse primeiro artigo de Einstein de 1905 é muitas vezes erroneamente referido como “o artigo de Einstein do efeito fotoelétrico”. Contudo, tanto seu título quanto a introdução deixam claro que questões mais abrangentes estão envolvidas, não se limitando ao efeito fotoelétrico. Na verdade, trata-se do desenvolvimento inicial de uma teoria quântica para a natureza da luz, que será empregada para explicar uma ampla gama de fenômenos relacionados à emissão e absorção de luz, englobando, assim, o efeito fotoelétrico somente com um caso particular.

⁵⁷ A famosa “lei de Planck” ($E = h \cdot \nu$) para radiação do corpo negro foi apresentada à Sociedade Alemã de Física na sessão de 19 de outubro de 1900 (cf. Planck, 1900a). No dia 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou um segundo trabalho à Sociedade Alemã de Física, no qual concluiu sua equação do corpo negro utilizando a dedução anterior, empregando uma análise probabilística dos osciladores eletrônicos, de acordo com o “princípio de Boltzmann” (cf. Planck, 1900b). Os dois trabalhos originais foram expandidos e também publicados em forma de artigo científico no ano seguinte na revista *Annalen der Physik* (cf. Planck, 1901, p. 553-563).

simples, que pode emitir e absorver ondas eletromagnéticas de períodos definidos⁵⁸, denominado de “ressonador”.

Igualando as expressões para “energia média de um ressonador” ($\underline{E}_v$) já obtida por Planck (1901) e para “energia cinética média” ($\underline{E}$) do movimento oscilatório linear de uma molécula de gás monoatômico (isto é, por grau de liberdade), ambas na condição de equilíbrio termodinâmico, quando a radiação é idêntica à radiação do corpo negro, Einstein mostrou que, no limite, obtém-se um valor que tende à emissão/absorção de energia infinita (Equação 1):

$$\underline{E}_v = \frac{L^3}{8\pi v^2} \rho_v = \underline{E} = \frac{R}{N} T \quad (1)$$

$$\rho_v = \frac{R}{N} \frac{8\pi v^2}{L^3} T \quad \rightarrow \quad \int_0^\infty \rho_v dv = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} T \int_0^\infty v^2 dv = \infty$$

Nas expressões apresentadas, T é a temperatura absoluta, R é a constante dos gases perfeitos, N é o número de Avogadro ($R/N = k =$ constante de Boltzmann), L representa a velocidade da luz no vácuo, $\rho_v dv$ é a densidade de energia da parte da radiação cujo intervalo de frequência está entre v e $v + dv$.

Essa dificuldade particular da teoria da radiação do corpo negro ficou conhecida pelo nome dramático de “catástrofe do ultravioleta de Rayleigh-Jeans”^{59,60}, pois representa, de fato, que, quanto maior o intervalo de frequências escolhidas do ressonador, maior a energia de radiação total do volume. “Essas relações, encontradas na condição de equilíbrio dinâmico, não apenas deixam de estar de acordo com o ponto de vista experimental, mas também implicam

⁵⁸ É importante notar que, ao contrário da “hipótese de gatilho” de Lenard (1902), Einstein está postulando a existência de uma transferência de energia entre radiação e elétrons, embora as evidências experimentais ainda fossem escassas na época.

⁵⁹ Expressões equivalentes às equações de Einstein (1905) foram publicadas no mês seguinte pelo astrônomo inglês James Hopwood Jeans (1905), sem o uso de ressonadores materiais que absorviam e emitiam radiação, em uma refacção e complementação do trabalho anterior de Lorde Rayleigh (1900), no qual o autor analisou as ondas estacionárias que se podiam formar na cavidade na qual a radiação de corpo negro estava presa. A “lei de Rayleigh-Jeans”, como ficou conhecida, mostra que a aplicação do teorema da equipartição da energia leva ao resultado incorreto de que a energia da radiação tende a se concentrar inteiramente em ondas de comprimento de onda infinitesimal, cuja densidade de energia é proporcional ao quadrado da frequência e à temperatura absoluta, tendendo à energia infinita para radiação de alta frequência (e.g., ultravioleta), algo que definitivamente não ocorre na natureza. De acordo com as datas, quando o artigo de Einstein foi publicado, o trabalho de Jeans ainda estava em análise de aceitação (Jeans, 1905).

⁶⁰ O nome dramático “catástrofe do ultravioleta de Rayleigh-Jeans”, atualmente bastante comum em muitos livros didáticos, foi cunhado por Paul Ehrenfest somente seis anos mais tarde, em 1911 (Ehrenfest, 1911).

que, em nosso modelo, uma distribuição definida de energia entre éter e matéria está fora de questão”, concluiu Einstein (1905, p. 136).

Embora alguns livros acadêmicos afirmem que o artigo de Einstein (1905) tenha sido uma generalização da teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901), pode-se constatar que essa informação não se sustenta historicamente, constituindo-se uma distorção e/ou mito.

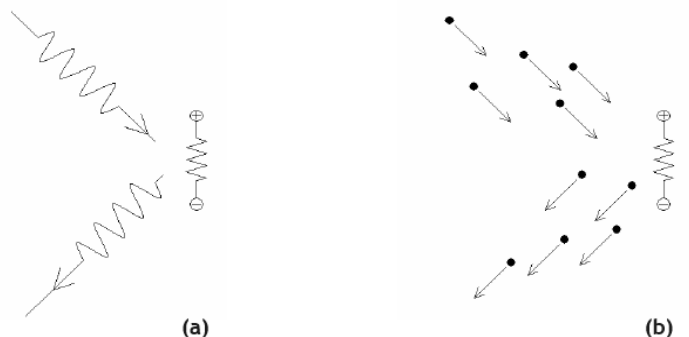
Compartilhando o entendimento de Kuhn (1978), a análise da seção 1 do artigo leva à conclusão de que, naquele momento, Einstein possuía fortes dúvidas em relação aos fundamentos da teoria da radiação de corpo negro de Planck, considerando-a problemática e conflituosa com as condições de equilíbrio termodinâmico (teoria cinética dos gases/teorema da equipartição da energia). Na mesma linha de raciocínio, Klein (1980) sugere que, à luz dos acontecimentos posteriores, quando escreveu o artigo no início de 1905, Einstein ainda não havia compreendido como Max Planck havia conseguido deduzir uma lei de distribuição de energia radiante diferente da de Lorde Rayleigh (1900).

Nessa perspectiva, é importante enfatizar que, embora Einstein tenha iniciado sua discussão a partir da teoria da radiação do corpo negro de Planck, ele faz isso com o intuito principal de explicitar as contradições resultantes dessa teoria, e não para fundamentar sua “hipótese de *quantum* de luz” nos trabalhos de Planck. Não existe nenhuma ruptura com a teoria clássica de Maxwell ou qualquer proposta de quantização da radiação eletromagnética na teoria da radiação do corpo negro, mas somente da distribuição de energia dos osciladores eletrônicos constituintes da matéria. De fato, o primeiro trabalho a sugerir uma revisão de tal esquema ontológico é o de Einstein (1905).

A Figura 17 ilustra uma comparação esquemática entre as propostas de Planck (1901) e Einstein (1905). Primeiramente (a), tem-se um oscilador eletromecânico absorvendo/emitando radiação eletromagnética de acordo com a perspectiva clássica de Planck. Cada oscilador absorve energia somente de ondas cuja frequência é igual à sua frequência natural de vibração (ressonância ondulatória). Ou seja, embora a energia da oscilação do oscilador eletrônico seja quantizada, com estados permitidos de energia expressos por $E = n.h.v$, a radiação incidente é interpretada como ondas eletromagnéticas contínuas no espaço e no tempo, conforme os fundamentos da teoria clássica de Maxwell. Em contrapartida, em (b) tem-se o mesmo processo sob a perspectiva da teoria quântica de Einstein. Como antes, o oscilador absorve energia de uma radiação eletromagnética específica igual à sua própria frequência natural. Contudo, nesse caso, a energia luminosa incide em forma “*quanta* de energia” e não de modo contínuo. Em uma situação de equilíbrio dinâmico, o oscilador deve reemitir toda a energia absorvida e de

maneira quantizada, em quantidades múltiplas de $E = n.h.v$. Nota-se, entretanto, que não há nenhuma restrição para os valores de energia vibracional do oscilador (Dionísio, 2005).

Figura 17 - Oscilador eletromecânico em interação – comparação esquemática entre as propostas de Planck (1901) e Einstein (1905).



(a) Oscilador eletromecânico em interação com a radiação eletromagnética de acordo com a teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901); (b) Oscilador eletromecânico em interação com a radiação eletromagnética, de acordo com a teoria quântica da luz de Einstein (1905).

Fonte: Dionísio (2005, p. 159).

(c) 2. Sobre a determinação dos “quanta elementares”⁶¹ por Planck

Nessa seção, Einstein objetiva demonstrar que a determinação realizada por Planck (1901) dos valores dos “quanta elementares” é, até certo ponto, independente da aplicação da teoria da radiação do corpo negro. Novamente, Einstein busca afastar-se ao máximo da proposta de Planck, apresentando um caminho alternativo (por meio da equação de Rayleigh-Jeans); um caminho no qual a teoria de Planck não é essencial para uma determinação precisa dos “quanta elementares”.

Einstein afirma que, até aquele momento, a equação de distribuição de energia deduzida por Planck (1901) é corroborada por todas as evidências empíricas disponíveis. Essa equação pode ser expressa da seguinte maneira (Equação 2):

$$\rho_v = \frac{\alpha v^3}{e^{\frac{\beta v}{T}} - 1} \quad (2)$$

⁶¹ Aqui, “quanta elementares” referem-se às constantes atômicas fundamentais. Em 1901, Planck determinou a massa do átomo de hidrogênio, o número de Avogadro (Loschmidt), a constante de Boltzmann e a carga elétrica elementar (cf. Planck, 1901, p. 553-563).

em que α e β são constantes ($\alpha = 6,100 \cdot 10^{-56}$ e $\beta = 4,866 \cdot 10^{-11}$). No entanto, para valores suficientemente grandes de T/ν , isto é, para grandes comprimentos de onda e altas temperaturas, essa equação pode ser reescrita na seguinte forma-limite (Equação 3):

$$\rho_\nu = \frac{\alpha}{\beta} \nu^2 T \quad (3)$$

Einstein observa a nítida equivalência entre a Equação 3 e a Equação 1 – que foi discutida na seção anterior –, no que diz respeito à dependência em relação à frequência (ν) e à temperatura (T). Ao igualar essas duas equações, obtém-se um resultado para o número de Avogadro N (e, conseqüentemente, para a massa do átomo de hidrogênio - $m_H = 1/N$), que coincide com o valor encontrado por Planck (1901). Esse valor, por sua vez, está em concordância satisfatória com os valores empíricos, embora tenha sido obtido por meio de uma linha de raciocínio diferente (Equação 4):

$$\frac{R}{N} \frac{8\pi\nu^2}{L^3} T = \frac{\alpha}{\beta} \nu^2 T \rightarrow N = \frac{\beta 8\pi R}{\alpha L^3} = 6,17 \cdot 10^{23} \quad (4)$$

Einstein considerou, portanto, que não seria necessário empregar a teoria da radiação de corpo negro de Planck em sua forma completa para determinar as constantes fundamentais da Física. Para valores elevados de T/ν (grandes comprimentos de onda e altas temperaturas), os fundamentos teóricos adotados na seção anterior, que levam à equação de Rayleigh-Jeans, mostraram-se razoáveis. Com efeito, Einstein parece utilizar esse argumento com o intuito de assegurar e validar seu avanço de forma independente em direção à teoria quântica da luz.

Ao término da seção, ele indica que sua abordagem se concentrará na região de alta frequência do espectro eletromagnético e baixa temperatura (densidade alta de radiação), na qual a equação de Rayleigh-Jeans falha completamente. Em suas palavras:

Chegamos, portanto, à seguinte conclusão: quanto maior a densidade de energia e o comprimento de onda da radiação, mais razoáveis se mostram os fundamentos teóricos que temos utilizado; entretanto, eles falham completamente no caso de pequenos comprimentos de onda e de densidades baixas de radiação (Einstein, 1905, p. 137).

(d) 3. Sobre a entropia da Radiação

Mas se a combinação da teoria cinética dos gases com a teoria clássica do eletromagnetismo (e com a teoria do elétron) revela-se problemática na obtenção de uma adequada teoria da radiação do corpo negro, resultando na “catástrofe do ultravioleta de Rayleigh-Jeans” para as situações específicas de pequenos comprimentos de onda e baixas temperaturas (densidades baixas de radiação), qual linha de raciocínio poderia ser seguida com alguma garantia de sucesso?

A resposta, discutida nas seções 3 a 6, é uma combinação de leis experimentalmente estabelecidas para radiação do corpo negro com os fundamentos da termodinâmica estatística, uma estrutura teórica independente de suposições especiais, baseada no “princípio de Boltzmann”, que fornece uma interpretação geral probabilística da segunda lei da termodinâmica, que tinha sido o principal objeto de investigação de Einstein nos últimos três anos (Einstein, 1902, 1903, 1904)⁶². Nessas três seções, Einstein desenvolve a ideia de que a radiação eletromagnética é um sistema descontínuo compostos por “*quanta* de energia”.

Na seção 3, por questão de completude em sua apresentação, Einstein apenas reproduz a dedução de um resultado teórico contido em estudo conhecido do físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), publicado em 1896 – portanto anterior aos trabalhos de Max Planck (1901) –, que investiga como uma função φ pode ser obtida a partir da lei da radiação do corpo negro, sem o pressuposto de uma teoria subjacente a respeito da produção e propagação da radiação eletromagnética.

De acordo com a definição de Wien (1896), para a radiação de corpo negro, em uma situação ideal de equilíbrio termodinâmico, a densidade (volumétrica) de radiação $\rho(\nu)$ é uma função de ν , tal que a entropia S da radiação eletromagnética é um valor máximo para determinada energia E (Equações 5, 6, 7) de tal forma que:

$$S = V \int_0^{\infty} \varphi(\rho, \nu) d\nu \quad (5)$$

⁶² Klein (1980, p. 66-67) comenta que os três artigos publicados por Einstein, entre 1902 e 1904, não atraíram muita atenção, parcialmente porque a interpretação estatística de Ludwik Boltzmann para a termodinâmica não era um assunto popular naqueles anos, e parcialmente porque qualquer interesse sobre mecânica estatística tinha sido completamente capturado pelo tratado do físico norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903), intitulado *Princípios Elementares de Mecânica Estatística* (*Elementary principles in statistical mechanics*) (Gibbs, 1902), publicado em 1902.

$$\delta = \int_0^{\infty} \varphi(\rho, \nu) d\nu = 0 \quad (6)$$

$$dS = \frac{1}{T} dE \quad (7)$$

em que V é o volume ocupado pela radiação e T é a temperatura absoluta.

Ao fim da breve apresentação, Einstein mostra que Wien (1896) derivou a seguinte “lei da radiação do corpo negro”, relacionando a entropia S da radiação eletromagnética com a função de distribuição espectral $\rho(\nu)$ (Equação 8):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \frac{dS}{dE} = \frac{1}{T} \quad (8)$$

em que $\rho(\nu)$ é a densidade de radiação para todas as frequências⁶³, que determina completamente as propriedades observáveis dessa radiação, e φ é uma função das variáveis $\rho(\nu)$ e T .

“Desse modo”, escreveu Einstein (1905, p. 139), “podemos deduzir a lei de radiação do corpo negro a partir da função φ , e, inversamente, a função φ pode ser determinada por integração, lembrando que φ anula-se para $\rho(\nu)=0$ ”.

(e) 4. Forma limite da lei para entropia da radiação monocromática para baixas densidades de radiação

Para progredir na construção teórica e obter uma função φ dependente das variáveis $\rho(\nu)$ e T , e determinar a entropia S da radiação eletromagnética, é necessário introduzir uma forma explícita para a lei de distribuição espectral $\rho(\nu)$ que seria utilizada na Equação 8. Contudo, deve-se ter em mente que Einstein deliberadamente excluiu a possibilidade de empregar a lei de distribuição de Planck (Equação 2), pelas razões apresentadas nas seções 1 e 2, apesar de sua total concordância com as evidências experimentais disponíveis. Desse modo, ele se viu compelido a escolher outra lei experimentalmente válida para pequenos comprimentos de onda e baixas temperaturas (densidade baixa de radiação).

⁶³ Einstein acrescentou a seguinte nota de rodapé: “Essa hipótese é arbitrária. Nós naturalmente iremos manter essa hipótese simples enquanto a experiência não nos obrigar a abandoná-la” (Einstein, 1905, p. 137, n. 1).

Era de conhecimento geral, em 1905, que a lei de distribuição proposta por Wilhelm Wien em 1896 (ao contrário da lei de Rayleigh-Jeans) possuía concordância limitada com os dados experimentais apenas na faixa espectral de pequenos comprimentos de onda. Em outras palavras, o modelo teórico de Wien (1896) para a radiação do corpo negro era válido exatamente (e somente) na região do espectro eletromagnético de interesse de Einstein. Para justificar sua escolha, ele escreveu:

As observações que foram feitas sobre a “radiação do corpo negro” mostram que a lei [Equação 9] originalmente postulada por Wien para essa radiação não é estritamente válida. No entanto, ela foi completamente confirmada pela experiência para valores grandes de ν/T . Fundamentaremos nossos cálculos sobre essa fórmula, tendo em mente, porém, que nossos resultados são válidos dentro de certos limites (Einstein, 1905, p. 139).

De fato, Einstein afirma repetida vezes ao longo de seu artigo que suas conclusões sobre a natureza quântica da radiação só podem ser consideradas válidas para a faixa da região espectral de pequenos comprimentos de onda, que corresponde ao intervalo no qual o modelo teórico de Wien concorda com os dados experimentais. A lei de distribuição espectral de Wien (1896) pode ser representada pela Equação 9:

$$\rho(\nu) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \frac{\nu}{T}} \quad (9)$$

Reescrevendo a Equação 9, obtém-se a Equação 10:

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{\beta \nu} \ln \left(\frac{\rho(\nu)}{\alpha \nu^3} \right) \quad (10)$$

Combinando as Equações 8 e 10, deduz-se a seguinte expressão para função $\varphi(\rho, \nu)$ (Equação 11):

$$\varphi(\rho, \nu) = -\frac{\rho}{\beta \nu} \left\{ \ln \frac{\rho}{\alpha \nu^3} - 1 \right\} \quad (11)$$

Nesse caso, para determinada radiação de energia E , sendo $E = \rho(\nu) \cdot \nu \cdot dv$, com frequências entre ν e $\nu + dv$, ocupando um volume V , a entropia S dessa radiação (considerando a Equação 5), é dada pela Equação 12:

$$S = V \varphi(\rho, \nu) dv = -\frac{E}{\beta \nu} \left\{ \ln \frac{E}{\nu \alpha \nu^3 dv} - 1 \right\} \quad (12)$$

Einstein afirma que, se a investigação for restringida à dependência da entropia S em relação ao volume V ocupado pela radiação, denominando de S_0 a entropia da radiação para o volume V_0 , obtém-se como resultado a Equação 13:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (13)$$

Ao deduzir a Equação 13 utilizando a lei de radiação e a lei de distribuição espectral do corpo de negro de Wien (1896), formuladas com base em argumentos termodinâmicos, Einstein tem como objetivo demonstrar, por analogia, que a entropia S da radiação eletromagnética monocromática, em densidade baixa, varia em função do volume V ocupado por essa radiação, da mesma forma que a entropia S de um gás ideal ou de uma solução diluída depende do volume.

Essa analogia é aprofundada na seção seguinte, na qual interpreta a Equação 13 com base no “princípio de Boltzmann” e na mecânica estatística, nos quais a entropia S de um sistema é uma função da probabilidade de seu estado, e cada aumento de entropia é concebido como uma transição para um estado de probabilidade mais alta, tendendo sempre ao equilíbrio termodinâmico, que corresponde a um estado de máxima probabilidade.

(f) 5. Investigação teórico-molecular da dependência da entropia dos gases e soluções diluídas em relação ao volume

Nessa seção, Einstein apresenta o “princípio de Boltzmann” (1872) apenas em sua formulação geral, mostrando que ele é logicamente válido para lidar com processos termodinâmicos. Em seguida, aplica tal princípio no caso especial do cálculo da variação da entropia S em um processo irreversível de uma expansão gasosa livre num sistema fechado⁶⁴.

O “princípio de Boltzmann”, em sua forma geral, pode ser representado pelas Equações 14a e 14b:

$$S = k \ln \ln W \quad (14a)$$

⁶⁴ Uma interpretação estatística e mais didática da entropia adicional pode ser consultada em Nussenzveig (2002, p. 285-293).

$$S - S_0 = k \ln \left(\frac{W_f}{W_i} \right) \quad (14b)$$

No caso do processo irreversível de uma expansão gasosa livre e isotérmica em um sistema fechado, que contém n moléculas de um gás ideal, suficientemente pequenas, de tal forma que as interações intermoleculares possam ser desprezadas, estando em movimento aleatório e independente, sem que nenhuma parte do espaço (e nenhuma direção dentro dele) tem preferência sobre as outras, pode-se demonstrar que a seguinte relação é válida (Equação 16):

$$\frac{W_f}{W_i} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (15)$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 14b, obtém-se como resultado que a variação da entropia S numa expansão livre do volume V_0 ao volume V é dada pelas Equações 16a e 16b:

$$S - S_0 = k \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (16a)$$

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (16b)$$

em que R é a constante dos gases perfeitos e N é o número de Avogadro.

Conforme apontou Einstein, nesse caso, ao contrário da definição de entropia S por meio da teoria cinética dos gases, tem-se a vantagem de que não é necessário fazer qualquer hipótese a respeito da lei que governa o movimento das moléculas. As Equações 16a e 16b estabelecem, portanto, a conexão entre a termodinâmica e a mecânica estatística, sendo uma das relações fundamentais da Física.

(g) 6. *Interpretação da expressão para a dependência da entropia em relação ao volume da radiação monocromática, de acordo com o princípio de Boltzmann (1872)*

A cadeia de raciocínio de Einstein (1905), até esse ponto, envolveu a determinação de uma expressão para a variação da entropia ΔS da radiação eletromagnética monocromática em função do volume ocupado por essa radiação, dentro dos limites de validade da lei de distribuição proposta por Wien (1896) (seções 3 e 4). Em seguida, Einstein demonstrou, por meio da aplicação do “princípio de Boltzmann”, a dedução da expressão matemática para a variação da entropia ΔS de um gás ideal contido em um recipiente, quando este varia de volume (seção 5).

O objetivo de Einstein na seção 6 de seu trabalho, portanto, é mostrar que ambas as expressões para entropia S possuem estruturas matemáticas idênticas. Com isso, Einstein quer propor que a hipótese de tal semelhança não é fortuita, mas que sinaliza o fato de que a radiação do corpo negro, nos limites de validade da lei de distribuição de Wien (1896), pode ser interpretada analogamente como um gás ideal. Em outras palavras, a radiação pode ser heurísticamente entendida como constituída por um número finito de “*quanta* de energia” indivisíveis e independentes, da mesma forma que as moléculas compõem o modelo de gás ideal.

A Equação 13, obtida na seção 4, para a dependência da entropia S de uma radiação eletromagnética monocromática em relação ao volume foi:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (13)$$

Que pode ser reescrita na seguinte forma (Equação 17):

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\beta v}} \right] \quad (17)$$

Enquanto a Equação 18, obtida na seção 5, para a dependência logarítmica da entropia S em relação ao volume, no caso especial de uma expansão gasosa em um sistema fechado, foi:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \quad (18)$$

Comparando a estrutura matemática de ambas as expressões para a variação da entropia $S - S_0$, chega-se à seguinte conclusão para a energia total E da radiação eletromagnética (Equação 19):

$$\frac{N}{R} \frac{E}{\beta v} = n \longrightarrow E = n \left(\frac{R\beta}{N} \right) v \quad (19)$$

Ou seja, com base na semelhança entre ambas as expressões matemáticas, Einstein considerou que a radiação eletromagnética monocromática, com frequência ν , de densidade baixa, comporta-se, do ponto de vista da dependência da sua entropia S em relação ao volume, *como se* a radiação fosse um meio descontínuo no espaço e no tempo, que consiste em conjunto de n “*quanta* de energia”, indivisíveis e independentes, cada um de magnitude unitária $E = R\beta\nu/N$. Nas palavras do próprio Einstein:

A partir disso, podemos concluir também que a radiação monocromática de baixa densidade (dentro dos limites de validade da fórmula de radiação de Wien [1896]) comporta-se termodinamicamente *como se* ela consistisse em *quanta* de energia mutuamente independentes de magnitude $R\beta\nu/N$ (Einstein, 1905, p. 143, grifo nosso).

Conforme apontado por Kuhn (1978), Klein (1980) e Martins e Rosa (2014), deve-se notar que Einstein não escreveu $E = h.\nu$, como se escreve atualmente, e sim $E = R\beta\nu/N$. Ele também não indica que o valor da constante de Planck (h) é da mesma magnitude que o termo constante de proporção ($R\beta/N$). Esses elementos reforçam o entendimento de que Einstein buscava afastar-se da teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901).

Nesse contexto, faz-se relevante destacar um ponderamento de Klein (1980, p. 70), em que o autor considera que Einstein possivelmente tenha julgado que outros cientistas poderiam fazer questionamentos após a leitura de seu trabalho, a saber: “Até que ponto deve-se considerar essa analogia de maneira séria? Será que ela realmente representa algo mais do que uma mera coincidência, sendo a expressão ‘como se’ a essência fundamental de sua afirmação?”. De acordo com Klein (1980), a construção textual de Einstein sugere que a analogia deveria ser levada muito a sério. Para o historiador, essa é a razão pela qual Einstein imediatamente explorou a aplicação de sua “hipótese heurística” sobre a natureza quântica da radiação, por

mais tênue que pudesse vir a parecer, direcionando-a para caminhos que resultassem em consequências empiricamente verificáveis.

Klein (1980) ainda sustenta que é exatamente por supor os questionamentos que poderiam advir de sua teoria que, após finalizar na seção 6 a descrição da cadeia de raciocínio que o levou a inferir a “hipótese de *quantum* de luz”, Einstein propõe para as próximas três seções finais do artigo “[...] investigar se a leis [experimentalmente estabelecidas] que governam a emissão e transformação da luz são também construídas como se a luz consistisse em tais “*quanta de energia*” (Einstein, 1905, p. 143-144, grifo nosso).

(h) 7. Sobre a “regra de Stokes” (Fluorescência)

O primeiro fenômeno analisado por Einstein associado à absorção/emissão e transformação da luz é a fotoluminescência, mais especificamente a fluorescência, que é governada pela “regra (lei) de Stokes”. Em resumo, essa regra estabelece que um material fluorescente não pode emitir luz com frequência maior que a da luz externa que é absorvida ($\nu_2 \leq \nu_1$), como observado experimentalmente.

A “regra de Stokes” é difícil de ser explicada classicamente, praticamente pelas mesmas razões que o efeito fotoelétrico. Pela perspectiva da teoria clássica do eletromagnetismo, no caso de uma luz monocromática ser transformada por fotoluminescência em uma luz de frequência diferente, o fator determinante deveria ser a intensidade (amplitude) da luz incidente, e não a sua frequência. Isso porque a ocorrência está associada à quantidade de energia luminosa que foi absorvida pelo material fluorescente. Portanto, uma luz intensa, de qualquer frequência, deveria, a princípio, provocar fluorescência em todas as frequências do espectro eletromagnético. Porém, verifica-se que isso não é observado (Dionísio, 2005).

No entanto, sob a perspectiva da “hipótese de *quantum* de luz”, ou seja, admitindo-se que tanto a luz incidente absorvida quanto a luz emitida são constituídas por um número finito de “*quanta* de luz” de magnitude unitária $E = R\beta\nu/N$, o processo de transformação da luz por fotoluminescência pode ser interpretado do seguinte modo, conforme escreveu Einstein:

[...] cada *quantum* de energia incidente de frequência ν_1 é absorvido e – pelo menos para uma densidade de distribuição suficientemente baixa dos *quanta* de energia incidentes – gera por si próprio um *quantum* de luz de frequência ν_2 ; é possível que a absorção do *quantum* de luz incidente possa simultaneamente dar origem à emissão de *quanta* de luz de frequências ν_3, ν_4 etc., assim como energia de algum outro tipo

(isto é, calor). Não faz diferença por quais processos intermediários esse resultado final ocorre. Se a substância fotoluminescente não for considerada como uma fonte permanente de energia, então, de acordo com o princípio da conservação da energia, a energia de um *quantum* emitido não pode ser maior do que a energia do *quantum* de luz que o produziu; portanto, $R\beta \nu_2/N \leq R\beta \nu_1/N$, ou, $\nu_2 \leq \nu_1$. Esta é a já bem conhecida regra de Stokes (Einstein, 1905, p. 144).

Einstein enfatizou que, para iluminações fracas, a quantidade de energia emitida deve ser proporcional à intensidade da luz incidente, pois cada “*quantum* de luz” incidente desencadeará um processo elementar do tipo indicado na citação, de maneira independente em relação aos outros *quanta* de energia incidente. Portanto, de acordo com a interpretação quântica, não deve haver limite inferior para a intensidade da luz incidente, abaixo do qual a luz seria incapaz de provocar o efeito fluorescente, mas um limite inferior para a frequência da luz. E isso era exatamente o que as observações empíricas sugeriam para a fluorescência.

A fim de assegurar o sucesso da aplicação de sua hipótese, Einstein antecipou que pequenos desvios da regra de Stokes são concebíveis em duas situações: (i) se ocorrer a absorção de vários “*quanta* de energia” incidente; e (ii) se a luz incidente (ou emitida) não possuir a mesma distribuição de energia que a radiação do corpo negro (dentro do domínio de validade da lei de Wien), por exemplo, no caso de uma luz emitida por um corpo com temperatura muito elevada.

(i) 8. Sobre a geração de raios catódicos por meio da iluminação de corpos sólidos

O segundo fenômeno examinado foi a produção de raios catódicos em virtude da incidência de luz ultravioleta em superfícies metálicas recém-polidas, ou seja, o efeito fotoelétrico. Lenard (1902) interpretou suas observações experimentais com base em sua “hipótese de gatilho”, objetivando eliminar quaisquer inconsistências e contradições com a teoria clássica do eletromagnetismo, cuja aceitação pela comunidade científica naquele momento era consensual. Entretanto, Einstein considerou que essa explicação dos fenômenos fotoelétricos, fundamentada pela perspectiva de que a energia da luz está continuamente distribuída no espaço e no tempo, enfrentava grandes dificuldades.

Para Einstein, as observações experimentais de Lenard (1902) – especialmente a independência da velocidade dos elétrons emitidos em relação à intensidade de luz – podiam ser compreendidas mais facilmente considerando a teoria quântica da radiação, admitindo que a energia luminífera está descontinuamente distribuída no espaço e no tempo. Além disso, ao

contrário de Lenard, Einstein tinha a convicção de que a energia cinética dos elétrons emitidos era proveniente da energia luminosa absorvida pela superfície metálica, embora as evidências experimentais quanto a isso ainda não fossem totalmente conclusivas.

Na perspectiva de Einstein, o mecanismo do efeito fotoelétrico se dava da seguinte maneira:

De acordo com o entendimento de que a luz incidente consiste em *quanta* de energia com energia $E = R\beta\nu/N$, a produção de raios catódicos pela luz pode ser concebida do seguinte modo. A camada superficial do corpo é penetrada por *quanta* de energia cuja energia é convertida, pelo menos parcialmente, em energia cinética dos elétrons. A concepção mais simples é a de que um *quantum* de luz transfere sua energia total para um único elétron. Admitiremos que isso pode ocorrer. Entretanto, não excluiremos a possibilidade de que elétrons absorvam apenas uma parte da energia dos *quanta* de luz. Um elétron, do interior do corpo, que possua energia cinética terá perdido parte dessa sua energia quando tiver atingido a superfície. Além do mais, admitiremos que, ao deixar o corpo, cada elétron deve despende um certo trabalho P (característico do corpo). Os elétrons que deixam o corpo com maior velocidade perpendicular são aqueles localizados mais próximos à superfície e que são ejetados na direção normal em relação a ela (Einstein, 1905, p. 145-146).

Com base a descrição citada e aplicando o princípio da conservação da energia, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos da superfície metálica irradiada é determinada pela seguinte expressão (Equação 20):

$$\frac{R\beta}{N}v - P \quad (20)$$

Se o corpo estiver carregado com um potencial positivo Π (e cercado por condutores de potencial zero), e se o potencial Π é apenas o suficiente para impedir a perda de carga elétrica por parte do corpo (atualmente essa grandeza é denominada de “potencial de frenagem”), obtém-se a famosa “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (Equação 21):

$$\Pi\epsilon = \frac{R}{N}\beta v - P \quad (21)$$

em que (ϵ) é a carga elétrica elementar do elétron.

Utilizando os valores conhecidos na literatura de pesquisa sobre a produção de raios catódicos, Einstein mostrou que os resultados obtidos por meio da Equação 21 concordavam, em ordem de magnitude, com os resultados experimentais de Lenard (1902).

Além disso, Einstein fez uma importante previsão verificável a respeito de sua “lei do efeito fotoelétrico” que, como sabemos nos dias de hoje, levaria cerca de dez anos para os

físicos alcançarem um consenso sobre sua validade empírica: “Se a fórmula deduzida for correta, então o potencial Π , quando colocado no gráfico em coordenadas cartesianas, em função da frequência da luz incidente, deve fornecer uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza da substância em análise” (Einstein, 1905, p. 146).

Além do mais, Einstein afirmou que sua interpretação quântica não era contraditória com as propriedades e observações experimentais de Lenard (1902). A independência da distribuição de velocidade dos elétrons emitidos em relação à intensidade de luz, de acordo com Einstein, deve ser esperada, pois cada “*quantum* de luz” deve transferir sua energia aos elétrons de maneira individual e independente, e a quantidade de energia luminosa transferida depende exclusivamente da frequência da luz incidente ($E = R\beta v/N$), e não de sua intensidade. Ao mesmo tempo, o número de elétrons que deixa a superfície metálica deve ser de energia proporcional à intensidade de luz incidente, pois a intensidade está associada ao número de “*quantum* de luz” emitidos pela fonte de luz, que depois são absorvidos pelos elétrons.

A análise da aplicação da “hipótese de *quantum* de luz” para o efeito fotoelétrico foi finalizada com uma consideração acerca da suposição provável de que pelo menos alguns *quanta* de energia da luz incidente transferem, cada um deles, sua energia total a um único elétron. Einstein apontou que, se essa suposição não for aceita, deve-se admitir então que os *quanta* de energia transferem apenas uma parte de sua energia luminosa aos elétrons. Logo, em lugar da Equação 21, a seguinte relação deve ser válida (Equação 22):

$$\Pi\epsilon \leq \frac{R}{N}\beta v - P \quad (22)$$

Einstein apontou que a validade da Equação 22, de acordo com as substâncias examinadas por Lenard (1903a, p. 449-490)⁶⁵, era apoiada pela observação de que o produto $\Pi\epsilon$ é consistentemente muito superior a $R\beta v/N$, uma vez que a diferença de potencial que os raios catódicos precisam superar para gerar luz visível atinge, em alguns casos, centenas e, em outros, milhares de volts. Portanto, em sua perspectiva, esses resultados experimentais indicavam que a energia cinética de um elétron contribui para a produção de número elevado de *quanta* de energia luminosa.

⁶⁵ cf. também Lenard (1903b, p. 714-744).

(j) *Sobre a ionização dos gases por meio da luz ultravioleta*

O terceiro e último fenômeno analisado por Einstein foi o processo de ionização de um gás utilizando uma fonte de luz ultravioleta. Ele explicou que, admitindo a hipótese de que um “*quantum* de luz” é capaz de ionizar uma molécula do gás, pode-se inferir que o processo ocorrerá se, e somente se, a energia de ionização de uma molécula, isto é, o trabalho mínimo teoricamente necessário para efetuar sua ionização, for menor que a magnitude da energia transferida por um “*quantum* de luz” absorvido.

Dessa forma, se J representa energia mínima de ionização de uma molécula, por equivalente-grama, a seguinte relação é válida (Equação 23):

$$J \leq R\beta v_{\min} \longrightarrow v_{\min} \geq \frac{J}{R\beta} \quad (23)$$

Einstein afirmou que, de acordo com as medições de Lenard, o maior comprimento de onda efetivo para fotoionização do ar é aproximadamente $\lambda = 190 \text{ nm}$, resultando em uma energia mínima de ionização igual a $J = 6,4 \cdot 10^{12} \text{ erg}$ [$6,4 \cdot 10^5 \text{ joules}$]. Ainda, acrescentou que, de acordo com os resultados experimentais de Stark (1902, p. 57), com base nos potenciais de ionização para o ar, o valor obtido era igual a $J = 9,6 \cdot 10^{12} \text{ erg}$, que é aproximadamente igual ao valor encontrado por meio da aplicação da sua “hipótese de *quantum* de luz”.

Por fim, Einstein ainda mencionou outra consequência da aplicação de sua hipótese no processo de fotoionização de um gás: “Se cada *quantum* de energia luminífera absorvido ioniza uma molécula, então a seguinte relação entre a quantidade de luz absorvida L e o número j de moléculas-grama de gás ionizado dever ser válida: $j = \frac{L}{R\beta v}$ ” (Einstein, 1905, p. 148). Einstein considerou esse resultado mais importante que o anterior, porque essa última relação, além de ainda não ter sido amplamente testada, deveria ser válida para todos os gases que não exibem absorção apreciável na frequência relevante.

2.2.4.2 Análise e Discussão do Artigo de Einstein (1906)

Em 11 de maio de 1906, quase um depois ano da publicação do artigo “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, Einstein apresentou outro trabalho abordando a teoria quântica da radiação. Nesse segundo estudo, ele analisa uma aplicação adicional de sua “hipótese de *quantum* de luz”, derivando uma relação importante entre o “efeito Volta” e a “difusão fotoelétrica” ou “sensibilidade fotoelétrica” (Einstein, 1906).

Se (V) é a diferença de potencial de um metal em relação a um gás, associada à camada dupla formada, então a quantidade de eletricidade (e) de um elétron requer um trabalho ($W=V.e$) para ser removida. Quanto maior for (V), ou seja, quanto menos eletropositivo for o metal, maior será a energia necessária para que ocorra a dispersão fotoelétrica (“efeito Hall”), e menos sensível será o metal à luz incidente. De acordo com a “hipótese de *quantum* de luz”, um tipo específico de luz só será capaz de ejetar elétrons de um metal se o “*quantum* de luz” ($E_{Luz} = h.\nu$) tiver, pelo menos, o valor W de energia radiante ($E_{Luz} = W$). Se assumirmos que, uma vez que a energia do “*quantum* de luz” supera o trabalho requerido ($E_{Luz} > W$) (ignorando a energia térmica do elétron), uma fração dos elétrons absorventes pode escapar do metal, então a menor frequência efetiva da luz capaz de induzir a emissão eletrônica será determinada pela equação por: $\nu_{min} = \frac{V.e}{h}$. Ou seja, quanto mais eletropositivo é um metal, menor será a frequência mínima efetiva da luz necessária para provocar o efeito fotoelétrico (ou seja, maior será o comprimento de onda efetivo). Isso se reflete na ampla observação de que os metais alcalinos, que são altamente eletropositivos, apresentam o efeito fotoelétrico já com a irradiação de luz visível. Conforme demonstrado nos experimentos mais recentes da época por Ernst Müller (1909)⁶⁶, esses metais são capazes de emitir elétrons até mesmo sob a incidência de raios vermelhos extremamente longos, que já não são mais visíveis ao olho humano (Einstein, 1906).

Contudo, a principal razão de esse artigo de 1906 merecer uma breve discussão histórica é porque nele Einstein modifica sua percepção inicial sobre a fundamentação da teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901). Na introdução, ele escreveu:

Em um estudo publicado no último ano [Einstein, 1905], mostrei que a teoria de Maxwell da eletricidade, em conjunto com a teoria dos elétrons, leva a resultados que contradizem as evidências sobre a radiação do corpo negro. Por um caminho descrito naquele estudo, fui levado à visão de que a luz de frequência ν só podia ser absorvida ou emitida em *quanta* de energia ($R\beta\nu/N$) [...]. Naquela ocasião, pareceu-me que a teoria da radiação do corpo negro de Planck [1901] constituía, em certos aspectos,

⁶⁶ MÜLLER, Ernst. Lichtelektrische Untersuchung an Alkalimetallen. **Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, v. 11, p. 72-81, 1909.

uma contrapartida [antítese] ao meu trabalho. Novas considerações, que estão sendo relatadas na seção § 1 deste artigo, mostraram-me, no entanto, que a fundamentação teórica sobre a qual a teoria da radiação do sr. Planck está baseada difere daquela que emergiria da teoria de Maxwell e da teoria dos elétrons, precisamente porque a teoria de Planck faz uso implícito da hipótese dos *quanta* de luz mencionada acima (Einstein, 1906, p. 199).

Em primeiro lugar, o trecho destacado evidencia, nas palavras do próprio Einstein, que no artigo anterior ele considerava que a teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901) era contraditória com sua teoria quântica da radiação. Klein (1980, p. 171) faz o seguinte comentário sobre essa citação: “Qualquer pessoa que ainda pense que o uso dos *quanta* de luz por Einstein em 1905 era uma generalização ou extensão da teoria de Planck, precisa apenas ler esse artigo de 1906 para se libertar dessa ideia”.

Em segundo lugar, se antes Einstein considerava a teoria da radiação do corpo negro de Planck (1901) uma antítese de sua teoria quântica da radiação, ele agora pensava que Planck havia empregado implicitamente (e inconscientemente) a hipótese dos *quanta* de luz, ambas as interpretações eram equivocadas. Max Planck sempre rejeitou a hipótese da quantização da radiação em seus artigos científicos e correspondências.

Em carta enviada em 1913 ao ministro da Cultura (*Kultusminister*), assinada por Max Planck (1858-1947), Heinrich Rubens (1865-1922), Walther Hermann Nernst (1864-1941) e Emil Gabriel Warburg (1846-1931), na tentativa de convencê-lo da importância da contratação do físico (não alemão) Albert Einstein para a “Sociedade Kaiser Wilhelm”⁶⁷ e para a Academia de Ciências da Prússia, os autores se referiram à hipótese quântica da radiação como meramente especulativa:

Pode ser que ele [Einstein] tenha ocasionalmente se perdido em suas especulações, como, por exemplo, com sua ‘hipótese de *quanta* de luz’. No entanto, penso que não seja seguro nos opormos demasiadamente a ele, pois é impossível introduzir novas ideias, mesmo em ciências exatas, sem correr riscos (*apud* Wheaton, 1983, p. 194).

As novas considerações a que Einstein se refere na introdução dizem respeito ao seguinte questionamento sobre o desenvolvimento da teoria da radiação do corpo negro por Planck (1901): Se a teoria cinética dos gases, combinada com a teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell e com a teoria dos elétrons de Thomson, leva a uma lei da

⁶⁷ A “Sociedade Kaiser Wilhelm para o Avanço da Ciência” (*Kaiser Wilhelm Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften*) foi fundada em 1911 por Guilherme II (1859-1918), o último imperador alemão e rei da Prússia, com objetivo de fazer frente ao acelerado desenvolvimento científico-tecnológico de outros países europeus. Até o fim da Segunda Guerra Mundial, ela foi a mantenedora dos “Institutos Kaiser Wilhelm”, que agrupavam diversas instituições dedicadas à pesquisa científica e avanços nas ciências naturais. Após o término da guerra, os institutos afiliados foram gradualmente incorporados pela recém-fundada “Sociedade Max Planck”.

radiação do corpo negro (Equação 1), que não apenas deixa de estar de acordo com as observações experimentais, mas também implica que uma distribuição de energia definida de energia entre radiação e matéria está fora de questão, conforme demonstrado nas primeiras seções do artigo de 1905, qual é a razão pela qual Planck (1901) não deduziu a mesma fórmula (Equação 1), mas, em vez disso, obteve outra expressão para a densidade da energia $\rho_{(v)}$ da radiação do corpo negro (Equação 2), que é satisfeita por todas as experiências até agora realizadas?

Para responder a essa questão, no decorrer da seção 1, Einstein mostra que tanto a utilização da lei de distribuição Maxwell-Boltzmann (que determina a distribuição de velocidades em um gás a certa temperatura T) quanto a abordagem do cálculo da entropia S de um sistema termodinâmico constituído de ressonadores infinitesimais resultam na obtenção da lei inválida da radiação do corpo negro (Equação 1).

Assim, para evitar o resultado inválido (Equação 1) e derivar a fórmula de Planck (Equação 2), Einstein afirmou que “[...] é necessário postular que, em vez de assumir qualquer valor, a energia E_α de um ressonador só pode assumir valores que são múltiplos inteiros de ϵ , em que $\epsilon = \frac{R}{N}\beta v$ ” (Einstein, 1906, p. 202). Em outras palavras, Einstein está apontando que Planck (1901) adotou implicitamente, como um postulado subjacente à sua teoria da radiação do corpo negro, a quantização da energia de um ressonador elementar, cujos valores são múltiplos inteiros de $R\beta v/N$, devido à emissão e/ou absorção da energia da radiação. Como consequência, a energia de um ressonador deve variar discretamente em saltos de múltiplos inteiros de $R\beta v/N$, e não continuamente.

Na conclusão da seção 1, Einstein foi ainda muito mais longe, atribuindo ao próprio Planck a autoria primária da revolucionária “hipótese de *quantum* de luz”: “Em minha opinião, as considerações acima não refutam de modo algum a teoria de radiação de Planck [1901]; pelo contrário, parecem mostrar que, com sua teoria de radiação, o sr. Planck introduziu na Física um novo elemento hipotético: a hipótese dos *quanta* de luz” (Einstein, 1906, p. 203).

Einstein considerava imprescindível uma mudança profunda nas nossas visões sobre a natureza e a constituição da luz. Ele empreendeu esforços para formular uma nova teoria da luz porque estava convencido de que “a próxima fase do desenvolvimento da física teórica nos traria uma teoria da luz que poderia ser interpretada como uma espécie de fusão da teoria ondulatória e da teoria de emissão da luz [corpúscular]” (Einstein, 1909, p. 817).

2.2.4.3 A Rejeição Inicial à Hipótese de “Quantum de luz”

A hipótese quântica para a natureza da luz foi considerada pelo próprio Einstein “muito revolucionária”, como consta em uma carta enviada ao amigo Conrad Habicht, datada de 18 de maio de 1905 (Einstein, 1995). Entretanto, apesar dos argumentos de Einstein e mesmo que apenas em caráter heurístico, essa hipótese não recebeu praticamente nenhum apoio da comunidade científica após a sua publicação.

Essa hipótese foi adjetivada em 1913 como “especulativa” na carta de recomendação assinada por Max Planck e outros cientistas, e também descrita como “audaciosa e imprudente” por Millikan (1916c). Além do mais, a definição de “*quantum* de luz” como unidades independentes e indivisíveis de energia, localizadas em pontos do espaço, comportando-se de modo análogo às partículas ou moléculas de um gás, representava, em certa medida, o ressurgimento e a revitalização da teoria corpuscular da natureza da luz proposta pelo físico inglês Isaac Newton (1643-1727). Essa teoria já havia sido refutada e abandonada sob o peso de inúmeras evidências empíricas acumuladas a favor da teoria clássica do eletromagnetismo durante quase um século de pesquisas científicas.

Como indicativo do pensamento predominante entre os físicos da época, de maneira representativa, vale a pena destacar a percepção inicial do físico alemão Max von Laue (1879-1960), expressa em uma carta a Einstein, datada de 2 de junho de 1906, enquanto era professor assistente de Max Planck:

Quando, no início do seu último artigo, você formula seu ponto de vista heurístico de que a energia radiante só pode ser absorvida e emitida em quantidades específicas finitas, eu não tenho objeções a fazer. Todas as suas aplicações também concordam com essa formulação. Agora, isso não é uma característica dos processos eletromagnéticos no vácuo, mas sim da matéria que emite ou absorve, e, portanto, a radiação não consiste em *quanta* de luz, como diz na seção 6 do seu primeiro artigo [Einstein, 1905]; em vez disso, é somente quando está trocando energia com a matéria que se comporta como se consistisse nelas. A prova de que a primeira suposição leva a implicações impossíveis parece-me ser o ponto mais essencial da minha termodinâmica dos fenômenos de interferência; mas então a derivação da lei de distribuição de Wien [Equação 9] dada na seção §4 também cai por terra, e seu lugar é ocupado pela lei de Planck [Equação 2]. *Sua restrição a baixas densidades de radiação torna-se então supérflua*, e é, na minha opinião, de grande importância que a mesma ideia possa ser utilizada em áreas tão distantes da teoria da radiação propriamente dita, como é o caso do “efeito Volta”, a “geração de raios catódicos” etc.

A propósito, nunca discuti seu ponto de vista heurístico com meu chefe [Max Planck]. É possível que haja diferenças de opinião entre ele e eu sobre essa questão; estou quase certo de que esse é o caso em relação aos artigos de Rayleigh-Jeans. Mas ele também não comentou sobre isso quando examinou minhas provas. Em qualquer caso,

todo artigo no qual considerações de probabilidade são aplicadas ao vácuo [mecânica estatística] me parece duvidoso. Com os melhores cumprimentos, M. Laue (Einstein, 1995, p. 26, doc. 38, grifo do autor).

Outro indicativo do pensamento predominante entre os físicos na década de 1910, refletindo a hesitação geral da comunidade científica em aceitar a teoria quântica da radiação de Einstein, pode ser extraído do relatório das pesquisas mais recentes sobre a emissão de elétrons negativos provocada por raios de luz e raios-X, conduzidas entre 1904 e 1909, elaborado pelo físico alemão Rudolf Walter von Ladenburg (1882 – 1956). Na introdução, o autor expressa uma visão relutante e cautelosa, e talvez um pouco cética, em relação à hipótese dos “*quanta* de luz”:

No final do relatório, discuti resumidamente as concepções teóricas que se formaram até agora sobre o processo de emissão de elétrons, nomeadamente a concepção de Lenard sobre a “liberação” dos elétrons [“hipótese de gatilho”] e a hipótese dos *quanta* de luz de Einstein. No entanto, parece que ainda não é possível fornecer uma explicação única para todas as propriedades conhecidas dos elétrons secundários gerados por radiação, de acordo com nossas concepções anteriores sobre os elétrons e a natureza da radiação. Embora a hipótese dos *quanta* de luz seja útil para entender os fenômenos da emissão de elétrons e outros fenômenos relacionados à geração e transformação da luz, ela encontrou pouca aceitação, uma vez que ainda não foi possível conciliar as concepções atomistas subjacentes a essa hipótese com nossas concepções anteriores sobre a natureza da radiação. No entanto, discuti a hipótese dos *quanta* de luz e suas bases — também a pedido do editor deste anuário — de forma bastante detalhada. Pois o objetivo deste relatório não é apenas referir verdades amplamente aceitas, mas incluir o máximo possível de tudo o que foi feito e pensado até agora neste campo, fornecendo assim uma visão geral conveniente para aqueles que trabalham com os fenômenos em questão ou que apenas desejam se orientar, e talvez também oferecendo sugestões sobre quais direções de pesquisa parecem particularmente promissoras (Ladenburg, 1909, p. 427).

É interessante notar que Ladenburg (1909) menciona ter discutido detalhadamente a hipótese de “*quanta* de luz” de Einstein apenas a pedido do editor do anuário alemão *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. Isso sugere que, por si só, talvez não a considerasse suficientemente robusta ou relevante para incluí-la inicialmente em seu relatório de revisão bibliográfica. Esse contexto indica que, embora reconhecesse o valor heurístico da hipótese de Einstein para explicar certos fenômenos, Ladenburg ainda mantinha ressalvas em relação à teoria quântica da radiação. Todavia, a inclusão da discussão, mesmo sob demanda, demonstra o compromisso de Ladenburg com a abrangência e a imparcialidade científica, ainda que ele mantivesse um certo distanciamento crítico em relação a essa hipótese emergente.

Esse distanciamento de Ladenburg (1909) reflete uma postura que não era exclusiva dele. De acordo com o historiador Kragh (1992), a razão principal para a rejeição da “hipótese de *quantum* de luz” não era o incipiente *status* acadêmico de Einstein, ou que outros físicos

conservadores estivessem muito fortemente apegados ao velho paradigma da Física Clássica, embora alguns estivessem. Segundo o autor, os cientistas, incluindo o próprio Einstein, perceberam que o que estava em jogo era o elevado preço teórico que a aceitação da teoria quântica da luz impunha: o abandono completo da teoria clássica ondulatória-eletromagnética da luz, uma das mais impressionantes e exaustivamente confirmadas teorias da Física até então.

Einstein, no entanto, continuou a desenvolver sua concepção quântica da luz. Ele chegou à concepção de que a radiação monocromática de baixa densidade, que segue a lei de radiação de corpo negro de Wilhelm Wien (1896) em relação à sua dependência do volume, comporta-se como se fosse composta de “*quanta* de energia” ou “*quanta* de luz de magnitude $E_{Luz} = h \cdot \nu$ por dois outros caminhos independentes daquele analisado originalmente em seu artigo de 1905. Em 1909, Einstein publicou um estudo intitulado “Sobre o estado presente do problema da radiação”, no qual investigou as flutuações na distribuição de energia e as flutuações na pressão da radiação dentro de uma cavidade opaca ao calor. Em suas conclusões, ele defendeu que a teoria quântica da radiação tem seu ponto central de apoio na parte da fórmula de Planck (1901) que foi confirmada experimentalmente. Ele afirmou que, mesmo que a fórmula completa seja questionada, a base experimental da lei de Wien (1896) ainda sustenta a teoria quântica. Em suas palavras:

Na minha opinião, das duas últimas considerações, segue irrefutavelmente que a constituição da radiação deve ser diferente da que achamos atualmente. [...] É verdade que não se pode afirmar que a teoria quântica siga como *uma consequência* direta e inevitável da lei da radiação de Planck; isso significa que outras interpretações não estão excluídas. Entretanto, pode-se, sim, afirmar que a teoria quântica fornece a interpretação mais simples da fórmula de Planck. Deve ser enfatizado que, essencialmente, as considerações apresentadas não perderiam de maneira nenhuma o seu valor, caso se comprovasse que a fórmula de Planck é inválida: é precisamente aquela parte da fórmula de Planck que foi suficientemente comprovada pela experiência (a lei da radiação de Wien válida no limite para grandes ν/T) que leva à teoria dos quanta de luz (Einstein, 1909, p. 74, grifo do autor).

O período entre 1909 e 1913 foi marcado por uma crescente controvérsia científica em torno da explicação do efeito fotoelétrico na comunidade de físicos. De fato, o mencionado o artigo de Einstein (1909) foi uma resposta necessária às recentes críticas apontadas por H. A.

Lorentz (1908)⁶⁸, Jeans (1908)⁶⁹ e Ritz (1908)⁷⁰. Deve-se recordar que nesse ínterim a “hipótese de gatilho” de Lenard foi sendo abandonada, porém, simultaneamente, ainda se rejeitava a ideia dos “*quanta* de luz”.

Dessa forma, naturalmente, surgiram defensores de outras interpretações clássicas. Entre eles estavam o físico austríaco Arthur Erich Haas (1884-1941), o físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), e os físicos britânicos Joseph J. Thomson (1856-1940) e Owen Willans Richardson (1879-1959).

A seguir, discutiremos acerca da hipótese de Arthur Haas e, na sequência, serão analisadas outras duas hipóteses de Joseph J. Thomson, formuladas entre 1910 e 1913, com destaque para a última pelo fato de que o cientista britânico conseguiu derivar uma equação linear entre a energia cinética dos fotoelétrons emitidos e a frequência da radiação incidente, assemelhando-se à “lei do efeito fotoelétrico” (Equação 21) de Einstein (1905).

2.2.5 1910-1913: Tentativas Clássicas de Interpretação do Efeito Fotoelétrico⁷¹

Até a virada do século XX, a mecânica do efeito fotoelétrico permaneceu incompreendida desde a observação inesperada de Heinrich Hertz, em 1887, que demonstrou que a luz ultravioleta facilita a produção de descargas elétricas. Essa situação modificou-se a partir da compreensão de que processo primário de todas as manifestações fotoelétricas é a emissão de elétrons do interior dos átomos dos materiais irradiados (metais, não-metais, sólidos, líquidos e gases). Esse fato científico forneceu a base para a construção de uma teoria para fenômeno. Assim, nos anos seguintes, os cientistas se dedicaram a explicar, de maneira mais aprofundada, como ocorre a emissão de elétrons do interior dos átomos das superfícies iluminadas.

⁶⁸ LORENTZ, Hendrik Antoon. Zur Strahlungstheorie [Sobre a Teoria da Radiação]. *Physikalische Zeitschrift*, v. 9, p. 562-563, 1908.

⁶⁹ JEANS, James Hopwood. Zur Strahlungstheorie [Sobre a Teoria da Radiação]. *Physikalische Zeitschrift*, v. 9, p. 853-855, 1908.

⁷⁰ RITZ, Walter. Über die Grundlagen der Elektrodynamik und die Theorie der schwarzen Strahlung [Sobre os Fundamentos da Eletrodinâmica e a Teoria da Radiação de Corpo Negro]. *Physikalische Zeitschrift*, v. 9, p. 903-907, 1908.

⁷¹ A discussão histórica apresentada nesta seção, em conjunto com uma análise sobre a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902), encontra-se originalmente publicada em Suttini, Caluzi e Errobidart (2024).

Na final da década de 1910, para abordar essa questão, deviam ser considerados os seguintes fatos científicos fundamentais, estabelecidos com base em quase 300 investigações experimentais: (i) a quantidade de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da radiação efetiva; (ii) a velocidade máxima dos elétrons emitidos é independente da intensidade da radiação efetiva, mas aumenta com a diminuição do comprimento de onda; (iii) tanto a quantidade quanto a velocidade máxima dos elétrons emitidos não são alteradas pela variação de temperatura (entre -180°C e $+800^{\circ}\text{C}$) da placa irradiada ou de seu entorno; (iv) uma placa metálica também emite elétrons sob a influência de raios-X (Ladenburg, 1907, 1909).

Conforme discutido nas seções 2.2.3 e 2.2.4, nesse ínterim, duas visões fundamentalmente distintas foram propostas para explicar as emissões fotoelétricas: a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) e a “hipótese de *quantum* de luz” de Albert Einstein (1905). A primeira defende a ideia de que a radiação incidente provoca uma “excitação” dos elétrons baseada nas propriedades de ressonância ondulatória devido à ação de sua força eletromagnética periódica. Sob essa perspectiva, a energia cinética dos elétrons emitidos já está presente na reserva de energia interna do átomo antes da incidência da radiação. Em contraste, a segunda defende que a energia cinética dos elétrons emitidos provém exclusivamente da radiação efetiva, cujo processo de transferência ocorre instantaneamente, em forma de unidades discretas de pacotes de energia radiante (“*quanta* de luz”), que são todas exatamente iguais a $E = h\nu$, que se movem sem se dividir e só podem ser absorvidos e gerados integralmente.

A concepção de Lenard (1902) de um processo de ressonância ondulatória-eletromagnética para explicar o efeito fotoelétrico mostrou-se satisfatória nos primeiros anos, estando, por exemplo, em perfeita consonância com os resultados experimentais obtidos por Eich Ladenburg e Karl Markau (1908). Neste estudo, foi demonstrado que para cada faixa estreita de comprimento de onda, há uma faixa igualmente estreita de velocidades eletrônicas correspondentes. Além disso, ao considerar as forças de ligação no átomo como independentes da temperatura, tornava-se possível explicar a independência das emissões fotoelétricas em relação à temperatura com base na “hipótese de gatilho”.

No entanto, no mesmo estudo, Ladenburg e Markau (1908) afirmam que a proporcionalidade direta entre a número total de elétrons emitidos e a intensidade da luz incidente (“lei de Lenard”) é difícil de compreender dentro dessa concepção de um processo de ressonância ondulatória-eletromagnética causado por excitação, sem a introdução de novas hipóteses arbitrárias. Ademais, os autores argumentam que é insatisfatória a ideia de que todas as velocidades eletrônicas possíveis estejam sempre presentes no átomo, variando

continuamente entre si, em valores que vão de 'alguns volts' a '30 mil volts', especialmente ao se tentar explicar de maneira semelhante os elétrons gerados por raios X.

O caminho para o alcance de uma conclusão sólida se mostrou complexo e incerto. No ano seguinte, Joffé (1908) analisou os dados experimentais obtidos por Ladenburg (1907) sobre a relação entre frequência e energia máxima de emissão fotoelétrica – que sempre foi mensurada pelo potencial retardador necessário apenas para interromper a descarga de elétrons sob a influência da luz ultravioleta – e mostrou que os dados se encaixavam muito bem na “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905).

Com efeito, a validade da “hipótese de gatilho” foi vigorosamente questionada em meados de 1910. Os novos resultados experimentais obtidos a respeito do processo de ionização fotoelétrica em gases rarefeitos por luz ultravioleta, publicados pelo próprio Lenard, em a colaboração de Carl Ramsauer (Lenard; Ramsauer, 1911, p. 5-8), se mostraram cruciais para a insustentabilidade dessa tentativa clássica de interpretação do efeito fotoelétrico. Eles observaram que essa ionização sempre era sucedida por uma absorção correspondente de energia luminosa, o que contradizia a premissa fundamental de interação não energética sobre a qual a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) foi construída. Eles concluíram:

Tanto para gases quanto para sólidos e fluidos, o efeito fotoelétrico está correlacionado não apenas com a absorção [da luz], mas com uma absorção muito forte (metálica) no átomo interno; essas [observações] indicam muito mais que a luz incidente fornece a energia do que o contrário (Lenard; Ramsauer, 1911, p. 5-6).

Conforme relata Bruce R. Wheaton (1983, p. 321), “[...] em 1913, Lenard reconheceu que o efeito fotoelétrico era uma ‘dificuldade’ [para sua hipótese de gatilho], a qual tornara-se intransponível após a aceitação da teoria de Bohr para a estrutura atômica”.

Por outro lado, “hipótese de *quanta* de luz” de Einstein (1905) fornecia uma explicação satisfatória para os quatro fatos científicos estabelecidos sobre os fenômenos fotoelétricos mencionados no início desta seção. Essa hipótese, embora de reconhecido valor do ponto de vista heurístico para a compreensão da emissão de elétrons e de outros fenômenos relacionados à geração e transformação da luz (fotoluminescência, efeito fotoelétrico, ionização de gases por luz ultravioleta e raios X, a teoria do calor específico), enfrentava resistência significativa entre os físicos da época, encontrando pouquíssima aceitação na comunidade científica. A principal dificuldade residia na incompatibilidade entre as concepções atomistas que fundamentavam a “hipótese de *quantum* de luz” e a teoria clássica do eletromagnetismo predominante sobre a natureza da radiação.

Até o final da década de 1910, os experimentos realizados sobre a dependência da velocidade máxima dos elétrons emitidos em relação ao comprimento de onda, em especial aqueles conduzidos por Ladenburg (1907), Ladenburg e Markau (1908) e Albert W. Hull (1909), embora compatíveis com a “lei do efeito fotoelétrico” derivada por Einstein (1905), foram considerados inconclusivos.

Em seu estudo de revisão bibliográfica sobre as pesquisas mais recentes sobre a emissão de elétrons negativos induzida por luz e raios X, Rudolf Walter von Ladenburg (1909) reconhece o valor da teoria quântica de Einstein, mas também ressalta que ela não resolve todas as questões e contradições existentes. Ele enfatiza a necessidade de mais pesquisas e experimentações para entender melhor a teoria e suas implicações, bem como para resolver as discrepâncias e investigar novas áreas relacionadas. Ele concluiu o relatório oferecendo uma análise crítica e uma orientação para futuras pesquisas:

Portanto, se a hipótese dos *quanta* de luz de Einstein é capaz de explicar uniformemente as propriedades conhecidas dos elétrons fotoelétricos e dos gerados por raios X, e se esta hipótese é, até agora, a única que torna compreensível a magnitude absoluta da velocidade dessas duas espécies de elétrons, **não devemos esquecer, por outro lado, que isso não é uma "explicação" no sentido convencional, pois não relaciona os fatos com fenômenos conhecidos.** Até agora, para a luz, não foi possível resolver as contradições entre uma estrutura atomística da radiação e a atual teoria clássica do eletromagnetismo, que pressupõe uma distribuição contínua de energia; uma teoria cuja validade para os valores médios diretamente perceptíveis não é contestada devido à sua excelente concordância com os experimentos.

Certamente, a teoria quântica da radiação de Einstein representa uma hipótese de trabalho muito promissora para a física experimental, e o campo da emissão de elétrons discutido no presente relatório é particularmente adequado para testar as consequências desta hipótese. **Portanto, é especialmente desejável uma investigação exata da dependência da velocidade dos elétrons em relação à frequência da radiação atuante, estendendo-se a uma faixa de frequência o mais ampla possível e a diferentes substâncias.** Além disso, o estudo da ionização gasosa induzida por radiação é importante. **Também é crucial investigar a "sensibilidade fotoelétrica" absoluta de uma substância, considerando a quantidade de luz absorvida, a dependência da sensibilidade em diferentes metais em relação ao comprimento de onda da radiação,** com referência à posição dos metais na série de tensões de Volta, e o efeito da textura da superfície e dos gases ocluídos. Além disso, a discrepância entre o valor absoluto da carga específica dos elétrons fotoelétricos lentos e o valor convencional ainda não foi esclarecida, e a investigação adicional das relações recentemente descobertas entre o efeito fotoelétrico e reações fotoquímicas, problemas fotográficos, fluorescência e fosforescência é de grande interesse (Ladenburg, 1909, p. 484, grifo nosso).

De fato, para explicar a maioria dos problemas em questão, muitos cientistas consideravam suficiente, em vez de atribuir uma ideia revolucionária de estrutura corpuscular à energia da radiação eletromagnética, assumir, em aparente conformidade mais próxima com a hipótese original de Max Planck para a radiação de corpo negro, que a energia de um único

"ressonador" (por exemplo, como o elétron) só pode ser alterada pela emissão ou absorção de radiação em um múltiplo inteiro de um “*quantum* de luz”.

Esse contexto histórico-científico indica que, no período de 1910 a 1913, vivenciava-se uma crescente controvérsia e disputa em torno da explicação para o efeito fotoelétrico na comunidade de físicos. Naturalmente, surgiram defensores de outras interpretações clássicas. Entre eles estavam Arthur Erich Haas (1884-1941), Joseph J. Thomson (1856-1940), Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) e Owen Willans Richardson (1879-1959).

A seguir, por ora, serão exploradas somente as hipóteses clássicas de Arthur Haas (1910) e Joseph J. Thomson (1910 e 1913). As outras hipóteses restantes – de Debye-Sommerfeld (1913) e de Richardson (1914) – serão abordadas em discussões futuras, ampliando a análise histórica dessa temática. Essa distinção se deve ao fato de que, com a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902), essas foram as tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico efetivamente analisadas e discutidas no curso de História da Ciência 2023 – 1.

2.2.5.1 A hipótese de Arthur Erich Haas (1910)

O principal registro da defesa do físico neerlandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) de uma hipótese clássica para explicar o efeito fotoelétrico – ou, ao menos, frequentemente citado por historiadores da teoria quântica –, é derivado de uma série de seis palestras ministradas na Universidade de Göttingen, Alemanha, entre 24 e 29 outubro de 1910. O objetivo do evento era discutir os “velhos e novos problemas na física” (Jammer, 1966; Stuewer, 1970; Kragh, 1992, 2010). Essas palestras foram posteriormente editadas por Max Born (1882-1970), físico e matemático alemão, e publicadas na revista científica *Physikalische Zeitschrift* (Lorentz, 1910a, 1910b). Em um trecho, Max Born declara: “[...] Lorentz não nega o valor heurístico dessa hipótese [*quantum* de luz], mas quer defender a velha teoria [ondulatória eletromagnética clássica] pelo maior tempo possível” (Lorentz, 1910b, p. 1250).

A hipótese clássica defendida publicamente por Lorentz, durante a conferência na Universidade de Göttingen, em 1910, não era de sua própria autoria. Ela foi desenvolvida seis meses antes, pelo físico austríaco Arthur Erich Haas (1910a, 1910b).

No início de 1909, “Haas estava explorando a ‘literatura mais recente de física’ com o objetivo de escolher um tema de pesquisa para sua tese de doutorado” (Hermann, 1971, p. 90). Tratava-se de um dos pré-requisitos para a escolha do cargo pretendido por ele de

“*Privatdozent*” no campo da História da Física, na Faculdade de Filosofia da Universidade de Viena. Como parte do processo de avaliação, Haas submeteu um manuscrito intitulado “A história do princípio da conservação da energia”. Entretanto, a banca examinadora, composta pelos físicos Franz Serafin Exner (1881-1947) e Victor von Lang (1838-1921), indeferiu a nomeação de Haas. Sugeriram que ele deveria elaborar um estudo na área da Física, e não apenas um trabalho de natureza histórica, para submetê-lo com a complementação do primeiro trabalho apresentado (Hermann, 1971).

Naquela época, os estudos mais atuais da Física abrangiam os trabalhos de Wilhelm Wien (1864-1928), Max Planck, “3º Barão” Lorde Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919), James Hopwood Jeans (1877-1946), Albert Einstein (1879-1955) e Hendrik Lorentz (1853-1928). Esses trabalhos estavam relacionados à teoria termodinâmica da radiação de corpo negro, abordando a questão da distribuição da energia em virtude do comprimento de onda e da temperatura. Embora a corroboração empírica da “lei de Planck” não estivesse em dúvida, muitas discussões e debates surgiram quanto ao significado físico da constante de Planck (h), a qual Planck denominou de “*quantum* de ação elementar”. Segundo Haas:

Das teorias que tratam dessa questão, a de Planck deve ser definitivamente considerada a mais importante. [...] E, no entanto, como o próprio autor enfatiza repetidamente, a teoria de Planck não pode, de forma alguma, ser considerada perfeita. Porque, nela, é essencial uma constante universal, a que Planck deu o nome de “*quantum* de ação elementar”, cujo significado físico ainda está envolto em completa escuridão; e, como o próprio Planck explica, a termodinâmica da radiação não pode chegar a uma conclusão totalmente satisfatória até que essa “constante h ” seja reconhecida em sua plena universalidade – e especialmente em seu significado eletrodinâmico (Haas, 1910b, p. 119-120).

Havia duas perspectivas em discussão. Por um lado, alguns cientistas defendiam que a estrutura atômica era uma consequência direta da constante de Planck (h), enquanto outros sustentavam a visão oposta, ou seja, que a interpretação mais adequada era que a constante de Planck (h) fosse uma consequência direta da estrutura atômica (Hermann, 1971).

Nesse contexto de controvérsia científica (em relação ao significado físico da constante de Planck (h)), o físico alemão e historiador Armin Hermann, em seu livro *The genesis of quantum theory (1899-1913)*, afirmou que “Haas foi um dos primeiros a tentar aplicar o ‘*quantum* de ação elementar’ de Planck à constituição do átomo” (Hermann, 1971, p. 90). Segundo o autor, o objetivo de Haas era derivar a relação $E = h \cdot \nu$ com base em princípios eletrodinâmicos bem estabelecidos ou, ao menos, mostrar a compatibilidade dessa lei com esses princípios, buscando, assim, compreender a natureza do “*quantum* de ação elementar” de Planck (1901).

Além do trabalho de Planck como referencial teórico, a hipótese clássica de Haas levava em consideração as características do modelo atômico de Thomson (1904a), assim como os estudos de espectroscopia atômica e as propriedades de ressonância ondulatória entre a radiação eletromagnética incidente e os elétrons ligados aos átomos da superfície metálica (Jammer, 1966; Stuewer, 1970; Hermann, 1971; Kragh, 1992, 2010)⁷².

No início da introdução de seu artigo, datado de fevereiro de 1910, Haas apresentou seus objetivos da seguinte forma:

No presente trabalho, será realizada uma tentativa de interpretação eletrodinâmica do “*quantum* de ação elementar” de Planck. O objetivo é estabelecer uma fórmula que relacione a constante (h) com as grandezas fundamentais da teoria do elétron e , como será demonstrado, com a fórmula espectral de [Johann Jakob] Balmer. Além disso, essa abordagem permitirá um cálculo mais preciso de duas importantes propriedades físicas que, até o momento, têm sido consideradas como constantes ainda desconhecidas: o *quantum* elétrico elementar [carga elétrica] e o raio do átomo de hidrogênio (Haas, 1910b, p. 120).

E acrescentou ao fim da introdução:

Na investigação a seguir, o modelo de J. J. Thomson para o átomo de hidrogênio será considerado como um caso especial de um ressonador óptico [oscilador hertziano idealizado] e uma conexão será buscada por meio da aplicação simultânea da teoria do elétron e da teoria da radiação de Planck ao mesmo problema (Haas, 1910b, p. 121).

De acordo com a interpretação de Haas (1910b), dentro da esfera positivamente carregada da estrutura atômica proposta por Thomson (1904a), os muitos elétrons imersos estão localizados em diferentes regiões, alguns mais internos e outros mais próximos à fronteira externa. Todos eles em movimentos circulares uniformes concêntricos (oscilando harmonicamente)⁷³. Nesse caso, a rapidez de cada elétron é função do raio orbital. Ao serem atingidos por uma radiação eletromagnética, esses elétrons devem ganhar um incremento, tanto na energia cinética quanto no raio orbital, devido às propriedades de ressonância ondulatória e, conseqüentemente, também na energia potencial (Haas, 1910b; Jammer, 1966; Stuewer, 1970; Hermann, 1971; Kragh, 2010).

⁷² É importante notar que, embora a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) também estivesse igualmente baseada em algum tipo de uma ação ressonante, seu modelo de estrutura atômica subjacente era totalmente diferente, conforme discutido na seção anterior. Na verdade, como será visto ao longo do texto, todas as tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico envolvem o fenômeno de ressonância ondulatória entre a radiação e os elétrons ligados, porém são fundamentadas em distintos modelos atômicos, o que resulta em propriedades e predições específicas para cada uma delas.

⁷³ Vale recordar que o movimento harmônico simples (MHS) de uma partícula pode ser descrito matematicamente como uma projeção do movimento circular uniforme sobre um diâmetro de um círculo.

Tomando-se por base essas considerações iniciais, e tomando o átomo de hidrogênio com apenas um elétron como objeto de estudo – o mais simples e idealizado possível –, Haas analisou o caso específico de um determinado elétron, de massa (m) e carga elétrica elementar (e), movendo-se em órbita circular de raio ($r = a$), próximo à fronteira externa da esfera positiva. Portanto, nessa situação particular, considera-se que o elétron está na iminência de ser ejetado do interior do átomo, mas ainda está eletricamente ligado à esfera positiva devido à ação do campo elétrico. Caso o elétron absorva uma quantidade de energia radiante, suficiente para romper o limiar energético, ele será emitido da esfera positiva. Simultaneamente, de acordo com a lei de conservação da energia, uma quantidade discreta de energia deve ser abstraída da radiação incidente (Haas, 1910b; Jammer, 1966; Stuewer, 1970; Hermann, 1971; Kragh, 2010).

A situação física analisada por Haas (1910b) é similar ao problema clássico de um elétron em movimento circular uniforme, no qual o módulo da força elétrica é numericamente igual ao módulo da força centrípeta ($|F_e| = |F_{cp}|$). Logo, num primeiro momento, sua análise e interpretação são equivalentes às realizadas por Ernest Rutherford (1871-1937) na mesma época, quando este último propôs o modelo atômico nuclear (Kragh, 2010).

De acordo com a condição inicial fundamental de Haas (1910b), nessa situação física idealizada e de iminência de fotoemissão do elétron, a energia potencial máxima do elétron (quando $r = a$) deve ser calculada pela igualdade com o “*quantum* de ação elementar” de Planck. Matematicamente, $|E_{p(máx)}| = e^2/r = e^2/a = h \cdot \nu$, em que (h) é a constante de Planck e (ν) é a frequência de revolução orbital (unidades de medidas no sistema centímetro-grama-segundo – CGS). Na visão de Haas (1910b), essa condição teórica expressa o significado físico da constante de Planck (h), ou seja, (h) representa fisicamente a energia potencial máxima que um elétron pode armazenar dentro da estrutura atômica antes de ser emitido⁷⁴.

Com base nessas premissas, assumindo que $\omega = 2\pi\nu$, isto é, que existe uma relação entre a frequência (ν) e a frequência orbital do elétron (ω), Haas demonstrou que a constante de Planck (h) e o raio da esfera atômica estavam relacionados da seguinte forma (Equação 24):

$$h = 2 \cdot e \cdot \pi \sqrt{a \cdot m} \quad \text{ou} \quad a = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m} \quad (24)$$

⁷⁴ Deve-se notar que tanto a energia cinética quanto a energia potencial para um elétron em movimento circular uniforme no interior do átomo é função do raio (r). Ambas as energias aumentam de $r = 0$ (centro da esfera) até $r = a$ (superfície da esfera). No entanto, para $r > a$, a energia cinética irá diminuir pelo fator $1/r$, enquanto a energia potencial continuará aumentando à medida que $r \rightarrow \infty$ visto que a força elétrica atrativa ainda estará sendo aplicada sobre o elétron, mesmo na região externa. Portanto, a interpretação de Haas apresenta um erro conceitual ao assumir que a energia potencial do elétron é máxima quando $r = a$. Dessa forma, somente se pode concordar com essa afirmação de Haas se for excluída a possibilidade $r > a$ como condição inicial (Hermann, 1971).

Com base nos estudos do espectro de emissão do átomo de hidrogênio e na equação (versão resumida) da série do físico e matemático suíço Johann Jakob Balmer (1825-1898) (Balmer, 1885) $\left[\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \right]$, Haas complementou a sua Equação 1 com a hipótese de que a frequência (ν) está em concordância com $\nu = \nu_{\infty} (1 - 4/n^2)$, em que ν_{∞} é a frequência limite na série de Balmer, com $n_1 = 2$ e $R_{\infty} = 4/\lambda_{\infty}$, sendo R_{∞} denominada constante de Rydberg, cujo valor aceito na época era $R_{\infty} = 109677 \text{ cm}^{-1}$.

Usando a Equação 1 resolvida para o raio da esfera atômica ($r = a$), e que nesse momento vale a condição inicial fundamental $|E_{p(\text{máx})}| = e^2/a = h \cdot \nu_{\infty}$, Haas derivou uma expressão para a medição da constante de Rydberg (R_{∞}) do espectro do átomo de hidrogênio, que interrelacionava os valores massa (m), da carga elétrica elementar (e) e da constante de Planck (h) (Equação 25):

$$R_{\infty} = 16\pi^2 \frac{me^4}{ch^3} \quad (25)$$

Com base nessas duas equações matemáticas, Haas (1910b) observou que a ordem de grandeza dos resultados estimados para a energia potencial máxima (e para o “*quantum* de ação elementar”) era consistente com os valores experimentais aceitos na época. De fato, foi somente no ano seguinte, em 1911, que o físico norte-americano Robert A. Millikan publicou os resultados de suas investigações com a técnica experimental de “gota de óleo”, tornando possíveis valores consideravelmente mais precisos para a carga elétrica elementar (e).

Na mencionada conferência na Universidade de Göttingen em 1910, Lorentz concluiu: “Portanto, temos à nossa frente uma estrutura [atômica] que só pode absorver certas quantidades finitas de energia, isto é, elementos discretos de energia” (Lorentz, 1910b, p. 1.246). Lorentz ainda destacou que as recentes aplicações da hipótese de Arthur Haas ao estudo de ionização do gás argônio, com o objetivo de determinar o limiar energético para a estrutura atômica, forneciam um valor que correspondia à mesma ordem de grandeza teoricamente estimada para a constante de Planck (h).

Contudo, Lorentz também ressaltou que a hipótese de Haas era criticada naquele momento, sobretudo, em razão das pressuposições arbitrárias de seu propositor. Em primeiro lugar, alguns críticos argumentavam que essa hipótese tinha sido construída combinando duas áreas da Física até então separadas: os estudos de linhas espectrais (ramo da óptica) com a teoria quântica em “fase embrionária” (ramo da termodinâmica) (Jammer, 1966). Em segundo lugar,

afirmava-se que Haas utilizou como referência as características do modelo atômico mais simples possível – o átomo de hidrogênio, com um único elétron movendo-se na superfície da esfera positiva, proposta por Thomson (1904a) –, tornando sua hipótese apenas uma aproximação quando aplicada aos átomos das superfícies metálicas (Kragh, 2010). Conforme afirmou Lorentz, “[...] nesses átomos, vários elétrons teriam que ser emitidos da esfera positiva, o que resultaria em valores de energia ligeiramente diferentes para cada elétron e, conseqüentemente, nessa situação, a constante de Planck (h) só poderia representar um valor médio” (Lorentz, 1910b, p. 1247). Outros físicos, como Arnold Sommerfeld (1868-1951) e Niels Bohr (1885-1962), rejeitaram a ideia de que a constante de Planck (h) fosse derivada de estruturas atômica particulares. Em vez disso, argumentavam que ela deveria ser deduzida de uma teoria geral e independente do campo elétrico do átomo (Jammer, 1966; Hermann, 1971).

Segundo o historiador da ciência Armin Hermann, Arthur Haas escreveu em sua autobiografia que sua hipótese clássica foi recebida com desdém e até mesmo ridicularizada pelos demais cientistas na Universidade de Viena:

Quando apresentei meus estudos durante o encontro da Sociedade de Físicos e Químicos de Viena, Ernst Lecher, o diretor do Instituto de Física na Universidade de Viena, considerou-os uma piada de carnaval; e, quando Laurenz Müller questionou [Friedrich] Hasenöhl a meu respeito, foi informado de que eu não poderia ser levado a sério, uma vez que ingenuamente misturei e confundi campos científicos completamente desconexos, como a teoria quântica (associada à termodinâmica) e a espectroscopia (associada à óptica). É compreensível que eu tenha ficado completamente desanimado diante dessa situação (Hass, 1965 *apud* Hermann, 1971, p. 96).

Embora a hipótese clássica de Arthur Haas não tenha sido aceita pela comunidade científica, não significa que tenha sido totalmente ignorada ou eventualmente deixada de ser debatida. Durante o I Congresso de Solvay, em 1911, realizado em Bruxelas, Bélgica, o físico alemão Arnold Sommerfeld (que também estava presente nas palestras de Lorentz na Universidade de Göttingen, em 1910) fez uma referência explícita ao recente artigo científico de Haas, publicado na revista *Physikalische Zeitschrift*, considerando-o uma importante contribuição para o desenvolvimento de sua própria interpretação semiclássica para o efeito fotoelétrico – posteriormente designada “hipótese h ” de Debye-Sommerfeld (Jammer, 1966; Stuewer, 1970).

É relevante destacar que o resultado da Equação 25 possui a mesma ordem de grandeza que os dados empíricos. Contudo, é exatamente oito vezes maior que o valor derivado por Niels Bohr, em 1913, a partir da quantização do momento angular do elétron (Kragh, 2010). Para que houvesse uma concordância entre os resultados teóricos estimados e os dados empíricos, Haas

teria de assumir, de maneira ainda mais arbitrária, que a energia potencial máxima do elétron corresponderia ao dobro do “*quantum* de ação elementar” de Planck ($2h\nu$).

2.2.5.2 As duas hipóteses clássicas de J. J. Thomson (1910 e 1913)

O físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940) propôs duas hipóteses clássicas como explicação para o efeito fotoelétrico entre os anos de 1910 e 1913. Embora ambas sejam construídas com base em modelos distintos de estrutura atômica, a explicação pressupõe, mais uma vez, uma ação ressonante entre as frequências da radiação eletromagnética incidente e de vibração (revolução e/ou oscilação) do elétron no interior dos átomos das superfícies metálicas.

A primeira hipótese de Thomson (1910) foi publicada alguns meses antes das palestras, anteriormente mencionadas, de Hendrik Lorentz na Universidade de Göttingen. Thomson tomou como ponto de partida os controversos resultados experimentais do físico alemão Erich Robert Ladenburg (1878-1908), publicados em 1907. Ao investigar o efeito fotoelétrico sobre superfícies metálicas de platina, cobre e zinco, decorrente da incidência de luz ultravioleta em uma pequena faixa de comprimento de onda ($220\text{ nm} < \lambda < 270\text{ nm}$), observou que a energia cinética máxima dos elétrons emitidos era independente da intensidade de radiação (em concordância com a “lei de Lenard”), e variando muito pouco em relação à natureza do material irradiado. No entanto, essa quantidade de energia era proporcional ao quadrado da frequência (ν^2). Ou seja, os resultados sugeriam que a velocidade máxima – e não a energia cinética máxima – dos elétrons emitidos era diretamente proporcional à frequência da luz incidente (Ladenburg, 1907).

No ano seguinte, com a colaboração de Karl Markau, ele publicou novas medições que corroboravam a hipótese de que a fotoeletricidade era um fenômeno puramente de ressonância pura, e que velocidade dos elétrons segue a lei de distribuição de Maxwell. Esses recentes resultados experimentais indicavam um importante suporte à “hipótese de gatilho” (Ladenburg; Markau, 1908).

Todavia, em 1910, Thomson mantinha um ceticismo considerável tanto em relação à “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) quanto à “hipótese de *quantum* de luz” de Einstein (1905). Sobre a primeira, argumentou que a existência de um contínuo de velocidades aumentando linearmente com a frequência de radiação incidente, conforme sugerido por Ladenburg (1907), implicava em um número grande de elétrons no interior de cada átomo. Isso

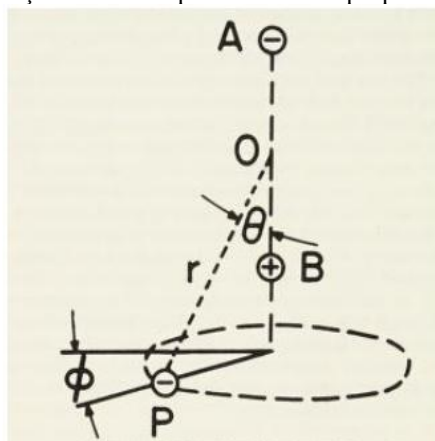
resultaria em movimentos oscilatórios distintos para cada elétron, mesmo entre os átomos de um mesmo elemento químico, o que seria improvável e conflitante com as evidências espectroscópicas de homogeneidade atômica (Wheaton, 1983). Por outro lado, com relação à segunda, ele indagou: “Por que uma unidade de luz, ao passar sobre um corpúsculo [elétron], deve ser obrigada a transferir-lhe toda a sua energia, ou nenhuma?” (Thomson, 1910, p. 239). Para Thomson, somente respostas arbitrárias seriam possíveis diante dessa pergunta.

Em busca de uma explicação clássica alternativa às interpretações de Lenard e de Einstein para o efeito fotoelétrico, Thomson postulou a existência de “dupletos-elétricos” no interior dos átomos das superfícies metálicas. Com efeito, ele já tinha sugerido a ideia de “dupletos elétricos” como constituintes da matéria três anos antes, num trabalho acerca da “teoria da radiação em corpos quentes” (Thomson, 1907).

Essa teoria foi retomada considerando que a radiação eletromagnética se originaria a partir do impacto de um corpúsculo negativamente carregado (elétron) com as moléculas do “corpo quente”. De acordo esse modelo teórico, a quantidade de radiação emitida é função do intervalo de tempo de colisão. No entanto, para evitar contradições com a segunda lei da termodinâmica, Thomson teve de assumir que as forças repulsivas exercidas durante a colisão deveriam variar de modo inversamente proporcional ao cubo da distância, como uma força centrífuga ordinária. Segundo ele, “[...] forças desse tipo poderiam ser exercidas [sob os corpúsculos] por ‘dupletos-elétricos’ de momento constante com suas extremidades apontando para os corpúsculos” (Thomson, 1910, p. 239).

Portanto, o postulado fundamental do modelo científico de Thomson é a existência de “dupletos elétricos” de momento M , dispersos no interior dos átomos de uma superfície metálica fotossensível. A Figura 18 representa esquematicamente o “duplete elétrico” anteriormente descrito.

Figura 18 - Representação de um “dupletos elétrico” proposto por Thomson (1910).



Fonte: Stuewer (1975, p 52).

De acordo com sua perspectiva, um “duplete elétrico” poderia ser representado da seguinte forma:

Se AB é um “duplete” com a extremidade positiva em B, e P é um corpúsculo [elétron], então é possível ter um estado de movimento constante, quando P descreve um círculo em volta de AB como eixo, o plano da órbita sendo perpendicular a AB e o centro da órbita no prolongamento de AB (Thomson, 1910, p. 244).

Thomson assumiu que somente alguns poucos “dupletos elétricos” deveriam ter um elétron girando abaixo da extremidade positiva com uma frequência angular (ϕ). Nessa situação, o movimento orbital poderia ser descrito por um vetor ($\mathbf{r}$) traçado a partir da posição do elétron, formando uma superfície cônica de ângulo (θ) com o ponto médio da distância AB (Thomson, 1910; Stuewer, 1975).

Considerando as equações clássicas para dinâmica do movimento do elétron e as condições iniciais adotadas, Thomson estimou que a distância entre as cargas do “dupletos elétricos” deveria ser de, aproximadamente, $4,0 \cdot 10^{-9} \text{ cm}$ e que $\theta = \tan^{-1}\sqrt{2} = 55^\circ$ (Thomson, 1910). O cientista demonstrou que, valendo-se desse modelo, havia uma proporcionalidade direta entre energia cinética do elétron e sua frequência angular de rotação (ϕ), com uma constante de proporção da mesma ordem de grandeza que a constante de Planck (h), calculada por meio da seguinte expressão (Equação 26):

$$\frac{1}{2}mv^2 = \left(\sqrt{Mme} \cos^{\frac{3}{2}}\theta\right) \cdot \phi \approx \phi \quad (26)$$

em que (M) é o momento do dipolo elétrico, (m) é a massa e (e) é a carga elétrica elementar, (θ) é o ângulo da superfície cônica formada pelo vetor ($\mathbf{r}$) e (ϕ) é a frequência angular.

Com base nesse modelo de estrutura atômica constituído por “dupletos elétricos”, Thomson interpretou as observações empíricas que indicavam uma ampla variedade de frequências orbitais e de energias cinéticas dos elétrons emitidos, mesmo com um número pequeno de elétrons no interior dos átomos das superfícies metálicas. Segundo ele, a força repulsiva exercida sobre o corpúsculo é inversamente proporcional ao cubo da distância ($F_e \sim 1/r^3$), o que implica que tanto o plano orbital quanto a rapidez do movimento não permanecerão constantes e não serão iguais para todos os elétrons, mesmo em átomos do mesmo elemento químico (Thomson, 1910).

Em sua perspectiva, o efeito fotoelétrico ocorria porque, quando uma radiação eletromagnética de frequência (ν_l) é irradiada sobre a superfície metálica, ela encontra, pelo menos, um corpúsculo (elétron) orbitando um “duplete elétrico” com frequência angular

idêntica à da radiação ($\nu_1 \approx \nu_2$). Esse processo inicia uma ação ressonante que provocará uma perturbação cada vez maior no equilíbrio dinâmico do movimento do elétron, até que ele seja lançado para fora do átomo (Thomson, 1910).

Em suas considerações finais, Thomson (1910) argumentou que sua hipótese de “dupletos elétricos” explicava de forma mais simples os resultados de Ladenburg (1907) e, ao mesmo tempo, demonstrava que não era necessária a aplicação da “hipótese de *quantum* de luz” de Einstein (1905). Segundo o cientista britânico, a hipótese de Einstein, mesmo a considerando somente de natureza heurística, dificilmente poderia ser consistente com as explicações bem-sucedidas dos fenômenos óticos de difração e interferência. Em suas palavras:

Assim, a energia dos corpúsculos ejetados [fotoelétrons] pela luz seria, nesta visão, proporcional à frequência da luz, quer a energia da onda de luz fosse composta de diferentes unidades ou não; de modo que não podemos considerar as experiências de Ladenburg [1907] como uma prova da estrutura unitária da luz (Thomson, 1910, p. 246).

As principais críticas em relação ao modelo de “duplete elétrico” de Thomson (1910) referiam-se à estrutura dinamicamente instável do átomo⁷⁵. Embora tenha argumentado que uma estabilidade, em longo prazo, era desnecessária para o sucesso de sua teoria, a maioria dos físicos a considerou improvável e de caráter especulativo (Stuewer, 1970, 1975).

Contudo, tais críticas aparentemente nunca foram totalmente desconsideradas por Thomson. Em 1913, ele apresentou um novo modelo de estrutura atômica (Thomson, 1913a). Essa segunda tentativa de interpretação clássica engloba as diversas classes de propriedades atômicas que obedecem à lei de Planck [$E = h.v$]. A fotoemissão elétrica foi explicitada por Thomson como uma dessas importantes propriedades.

A premissa fundamental no novo modelo de estrutura atômica de Thomson (1913a) foi postular que as forças elétricas existentes nos átomos podem não ter exatamente as mesmas características daquelas das leis ordinárias da eletrostática. Segundo ele, em virtude do grande número de corpúsculos eletricamente carregados no interior do átomo, peculiaridades tendem a desaparecer. O efeito resultante seria apenas uma “média aparente” das forças elétricas individuais exercidas, conforme afirmou: “[...] é possível que a força exercida por uma única carga atômica [elétrica] não se propague uniformemente em todas as direções, mas esteja concentrada ao longo de certas linhas ou cones⁷⁶” (Thomson, 1913a, p. 793).

⁷⁵JEANS, James Jopwood. On the motion of a particle about a doublet. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 20, n. 116, p. 380-382, 1910.

⁷⁶ Para saber mais, cf. também Joseph J. Thomson, **Notes on recent researches in electricity and Magnetism**, Clarendon Press, 1913.

Em síntese, nessa segunda tentativa clássica de interpretação do efeito fotoelétrico, Thomson sugeriu que a força exercida por uma carga elétrica individual não preenche uniformemente todo o espaço ao redor dela, mas permanece confinada em estreitos “*tubos de força elétrica*”, em formato de superfícies cônicas, cujos efeitos do lado externo são nulos. Ainda, argumentou que o único critério que se impunha era a necessidade de que as propriedades previstas por esse novo modelo deveriam ser correspondentes às aquelas já conhecidas para a estrutura atômica em sua época (Thomson, 1913a).

Com base nesse novo modelo científico, Thomson afirmou que tal correspondência seria possível se as forças elétricas agindo sobre os elétrons fossem:

- (1) uma força repulsiva radial, variando inversamente com o cubo da distância a partir do centro da carga elétrica, difundindo-se ao longo de todo átomo, combinada com;
- (2) uma força atrativa radial variando inversamente, como quadrado da distância a partir do centro da carga elétrica, *confinada a um número limitado de tubos radiais no átomo* (Thomson, 1913a, p. 793).

Na introdução de seu artigo, Thomson (1913a) ressaltou que não discutiria detalhes ou considerações sobre a origem dessas forças, limitando-se a postular a existência delas e deduziria seu modelo de estrutura atômica como uma consequência direta. Tomando-se por base essas considerações iniciais, ele analisou o caso especial de um elétron submetido simultaneamente a ambas as forças, atrativa e repulsiva, oscilando harmonicamente em equilíbrio estável dentro do “tubo de forças elétricas”, numa determinada posição $r = a$, quando descolado radialmente por uma distância x . Aplicando a segunda lei de Newton, ele demonstrou que quando $x \rightarrow \infty$ (x tende ao infinito), o trabalho (W) realizado pela força repulsiva sobre o elétron é dado pela Equação 27:

$$W = \pi\sqrt{C \cdot e \cdot m} \cdot v \quad (27)$$

em que (C) é uma constante da força repulsiva, (e) é o valor da carga elétrica elementar, (m) é a massa, e (v) é a frequência de oscilação.

Assumindo (de forma *ad hoc*) que o trabalho (W) realizado é diretamente proporcional à frequência de oscilação ($W = h \cdot v$), conforme estabelecido pela lei de Planck, Thomson obteve a seguinte expressão para a constante de Planck (h) (Equação 28):

$$h = \pi\sqrt{C.e.m} \quad (28)$$

Usando esse novo modelo científico, Thomson interpretou classicamente o efeito fotoelétrico da seguinte maneira: uma luz de frequência (ν) atinge um determinado átomo no qual existe algum elétron em equilíbrio estável, em movimento oscilatório harmônico de frequência angular idêntica ($\nu_1 \approx \nu_2$), possibilitando uma ação ressoante entre a luz e o elétron, com transferência de energia radiante para energia cinética. Para que o elétron seja ejetado para fora do “tubo de forças elétricas”, é necessário realizar um trabalho externo mínimo (W), em oposição à força atrativa que está agindo sobre o elétron. Ou seja, é necessária uma quantidade mínima de transferência de energia radiante. No entanto, ao sair do “tubo de forças elétricas”, a energia cinética do elétron será nula. Se o elétron estiver sujeito apenas à força repulsiva, sua energia cinética irá aumentar progressivamente à medida que se afasta do centro do tubo. A energia cinética máxima do elétron, portanto, após ser ejetado do átomo, é numericamente igual ao trabalho realizado pela força repulsiva quando a distância tende ao infinito ($x \rightarrow \infty$), a partir da posição de equilíbrio. Portanto, tem-se $W = h.\nu$ (Thomson, 1913a).

Dessa forma, Thomson concluiu sem citar o nome de Einstein: “Assim, observamos que a energia cinética com a qual o corpúsculo [elétron] é ejetado é proporcional à frequência da luz e é igual à frequência multiplicada pela constante de Planck (h). Essa é a conhecida lei da fotoeletricidade” (Thomson, 1913a, p. 796).

Thomson ainda explicou que existe outro meio pelo qual o elétron pode ser ejetado nas mesmas condições iniciais: sob a ação de uma força magnética em ângulo correto, cuja direção coincide com aquela em que o corpúsculo está se movendo. Nesse caso, o elétron será defletido de sua trajetória de oscilação e sua velocidade radial diminuirá, enquanto sua velocidade tangencial aumentará, mantendo sua energia cinética total constante. Segundo ele, “[...] um átomo desse tipo só absorverá energia radiante de frequência ν por múltiplos de $h\nu$ ” (Thomson, 1913a, p. 796).

Ao recordar a pergunta apresentada no artigo de 1910 – “Por que uma unidade de luz, ao passar sobre um corpúsculo [elétron], deve ser obrigada a transferir-lhe toda a sua energia ou nenhuma?” (Thomson, 1910, p. 244) –, Thomson argumentou que, a menos que o elétron seja deslocado para fora do “tubo de forças elétricas”, no qual inicialmente está se movimentando harmonicamente, nenhuma absorção real de energia radiante ocorrerá. Sendo assim, qualquer pequena quantidade de energia radiante absorvida pelo elétron será reemitida como espalhamento de ondas elétricas (luz), sem absorção líquida. Em contrapartida, quando a ação luminosa é suficiente para deslocar o corpúsculo para fora do “tubo de forças elétricas”,

há uma absorção real direcionada a cessar o movimento oscilatório inicial e a superar as forças atrativas. Nessa perspectiva, “[...] a energia está sendo absorvida em unidades, o que corresponde exatamente à quantidade de energia necessária para liberar um corpúsculo [elétron] de seu tubo de forças” (Thomson, 1913a, p. 796).

De acordo com Stuewer (1970, p. 19, 1975, p. 35), embora as duas hipóteses clássicas de Thomson tenham atraído a atenção de alguns físicos e até mesmo estimulado algumas investigações experimentais, o consenso era de que muitas de suas suposições eram *ad hoc*, ou seja, de caráter arbitrário. O autor menciona, por exemplo, que a segunda hipótese foi alterada pelo próprio Thomson, apenas dois meses após sua publicação, quando percebeu a insustentabilidade dinâmica das superfícies cônicas como “tubos de forças elétricas”. Em carta aos editores da revista *Philosophical Magazine*, em 8 de novembro de 1913, Thomson declarou:

Caros senhores. Em meu artigo sobre a Estrutura do Átomo (Phil. Mag. Out. 1913), supus que as regiões nas quais as forças elétricas dentro do átomo deveriam estar confinadas eram delimitadas por superfícies cônicas. Descobri em investigações posteriores que, com tais superfícies, o período de um corpúsculo dentro da região aumentaria à medida que sua energia aumentasse, e o corpúsculo deixaria de estar em uníssono com a luz antes de adquirir energia suficiente para escapar da região de força elétrica. Se, no entanto, os limites dessas regiões forem cilíndricos em vez de cônicos, o período será independente da energia cinética do corpúsculo, e esse último estará em ressonância com a luz até que adquira energia suficiente para escapar da região. Assumindo contornos cilíndricos em vez de cônicos, os resultados apresentados no artigo podem ser aplicados sem modificações adicionais. Atenciosamente, J. J. Thomson (Thomson, 1913b, p. 1.044).

Além essas quatro primeiras tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, vale a pena mencionar outras duas propostas que, por questões de extensão, não foram inseridas aqui, mas que publicamos como artigo científico e recomendamos a leitura. A primeira, trata-se da teoria semiclássica desenvolvida por Arnold Sommerfeld e Peter Debey entre 1911 e 1913, atualmente conhecida como “*hipótese-h*”. Originalmente formulada durante as investigações sobre raios X, essa teoria foi ampliada para abarcar diversos fenômenos atômicos, incluindo as emissões de raios X e raios gama (γ), o potenciais de ionização e, de modo mais destacado, as emissões fotoelétricas [cf. Suttini, Caluzi e Errobidart (2025)]. A segunda, refere-se à “*teoria da ação fotoelétrica*” desenvolvida pelo físico britânico O. W. Richardson, cujos fundamentos são princípios termodinâmicos e estatísticos⁷⁷ (Stuewer, 1970, 1975). Ambas as teorias derivaram a mesma “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905).

⁷⁷ Na data de escrita dessa tese, o artigo científico elaborado pelos autores sobre a “teoria da ação fotoelétrica” de O. W. Richardson está aguardando o parecer dos avaliadores.

Conforme enfatizado por Stuewer (1970, 1975), o ponto central das tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, em oposição à “hipótese de *quantum* de luz” de Einstein, mesmo que tenham sido rejeitadas, deve ser compreendida em maior profundidade. Tanto a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902) quanto a de Arthur Haas (1910b), bem como as duas hipóteses de Thomson (1910, 1913), tinham como objetivo mostrar que era possível, com base em modelos particulares de estrutura atômica, explicar as observações empíricas sobre o efeito fotoelétrico, compreendendo a interação entre a radiação e a matéria por meio das propriedades clássicas de ressonância ondulatória.

2.2.6 1914-1917: As Investigações de R. A. Millikan sobre o Efeito Fotoelétrico⁷⁸

Robert Andrews Millikan (1868-1953) foi um físico experimental norte-americano, notabilizando-se por medir com precisão o valor da carga elétrica elementar do elétron entre os anos de 1909 e 1913, por meio de célebre “experiência da gota de óleo”. Contudo, sua contribuição estendeu-se à determinação fotoelétrica da constante de Planck (h) no período de 1914 e 1916. Os resultados obtidos confirmaram – contrariamente às suas expectativas iniciais –, pela primeira vez, todas as proposições relacionadas à hipotética “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905). Em 1923, Millikan foi laureado com o Prêmio Nobel de Física (cf. Figura 19), em reconhecimento “por seu trabalho sobre a carga elementar de eletricidade e sobre o efeito fotoelétrico” (The Nobel Foundation, 1998b).

Figura 19 - Fotografia oficial de Robert Andrews Millikan para o Prêmio Nobel de 1923.



Fonte: Coleção Emilio Segrè Visual Archives, American Institute of Physics.

⁷⁸ A discussão histórica apresentada nesta seção, em conjunto com uma análise sobre a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902), encontra-se originalmente publicada em Suttini, Caluzi e Errobidart (2024).

No entanto, o árduo percurso de Robert A. Millikan até o recebimento do prêmio Nobel de Física de 1923 começou a ser construído quase três décadas antes. Em 1896, ao regressar de um período de estudos na Alemanha, ele assumiu o cargo de professor e pesquisador de Física na Universidade de Chicago (Estados Unidos), onde desenvolveu suas funções no renomado Laboratório de Física Ryerson, um centro de referência para investigações experimentais da época⁷⁹.

Dez anos mais tarde, em 1905, seu grupo de trabalho deu início uma série de investigações com objetivo de determinar a quantidade carga elétrica elementar do elétron (e). No famoso artigo de 1916, Millikan (1916c, p. 355) observou que isso ocorreu exatamente no mesmo ano em que Albert Einstein estabeleceu sua primeira associação entre os fenômenos de emissões fotoelétricas e a sua teoria quântica da radiação, “[...] apresentando a ousada, para não dizer imprudente, hipótese de um corpúsculo de luz eletromagnética de energia $h\nu$, em que essa energia é transferida para os elétrons por meio da absorção”.

Embora Millikan estivesse engajado a determinação experimental do valor da quantidade da carga elétrica elementar do elétron (e) até meados de 1913, esse não era o único objeto de investigação de sua equipe no Laboratório Ryerson. Ao longo de quase uma década, entre 1905 e 1914, Millikan participou ativamente no desenvolvimento de arranjos experimentais com o propósito de estudar os processos de absorção e emissão entre luz e matéria, especialmente para testar a validade da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905). Durante esse período, publicou cinco trabalhos diretamente vinculado ao tema: Millikan e Winchester (1907), Millikan (1910), Millikan e Wright (1912) e Millikan (1913a, 1913b).

As investigações avançaram de maneira mais significativa no início de 1914. Em 24 de abril, Millikan apresentou um resumo expandido à Sociedade Americana de Física intitulado “Uma determinação direta de ‘ h ’”, no qual relata os dados preliminares coletados com base em testes experimentais acerca de três assertivas contidas na “lei do efeito fotoelétrico”. As medidas foram obtidas com a utilização de uma superfície metálica de sódio, com luz na faixa de comprimento de onda de $\lambda = 230$ nm a $\lambda = 680$ nm, e confirmaram integralmente a relação linear prevista pela equação de Einstein (1905). Esses resultados reforçaram as conclusões apontadas em janeiro por William H. Kadesch (1914a), um dos cientistas da equipe de Millikan

⁷⁹ Além de Robert A. Millikan, vários cientistas renomados trabalharam no Laboratório de Física de Ryerson, tais como: Albert Abraham Michelson (Prêmio Nobel de Física em 1907); Arthur Holly Compton (Prêmio Nobel de Física em 1927); Henry Gordon Gale (astrofísico); Robert Sanderson Mulliken (Prêmio Nobel de Química em 1966).

responsáveis pela montagem e testagem prévia do equipamento. O valor experimental para a constante de Planck foi igual a $h = 6,561 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, com erro aproximado de 0,2% (Millikan, 1914).

Ainda nesse mesmo encontro da Sociedade Americana de Física, juntamente com outro membro de sua equipe, o físico Wilmer Henry Souder, Millikan discutiu pela primeira vez a questão do “potencial de contato” entre os dois metais eletricamente conectados em seus experimentos sobre o efeito fotoelétrico, ou seja, a diferença de potencial inicialmente existente devido à conexão dos eletrodos das placas emissora e coletora⁸⁰. Além disso, eles analisaram a influência dos gases residuais no surgimento de fotocorrentes, um aspecto que, até então, não havia sido objeto de análise em trabalhos anteriores (Millikan; Souder, 1914).

Depois disso, após dezoito meses de coleta e análise de dados experimentais, Millikan deu início a uma série de publicações mensais acerca da determinação da constante de Planck (h) por meio do efeito fotoelétrico. O primeiro artigo, apresentado em dezembro de 1915, com a colaboração de Wilmer Henry Souder, abordava novamente a questão do potencial de contato, intitulado “Evidência experimental para a identidade essencial dos efeitos fotoelétricos seletivos e normais”. Os resultados confirmaram a hipótese de que as correntes fotoelétricas (fotocorrentes) surgiam em virtude da influência de algum gás ativo, o qual teria se difundido na superfície metálica e cuja ação era retardada pela presença de um gás inerte (Millikan; Souder, 1916).

O segundo artigo, lançado em janeiro de 1916, com o título “Equação fotoelétrica de Einstein e a força eletromotriz de contato”, adotou uma abordagem mais sistemática em comparação com os trabalhos anteriores, apresentando resultados consistentes e precisos. Além disso, a construção da narrativa textual apresenta-se mais detalhada em relação à descrição do funcionamento do arranjo experimental e ao processo de coleta e análise de dados (Millikan, 1916a).

No terceiro artigo, divulgado em fevereiro de 1916 e intitulado “Relações quânticas no fenômeno fotoelétrico”, Millikan descreveu os resultados obtidos utilizando uma superfície metálica de lítio nos testes experimentais sobre o efeito fotoelétrico. Nesse estudo, os dados mais uma vez confirmaram as três assertivas contidas na equação fotoelétrica de Einstein (1905), as quais já haviam sido investigadas no ano anterior. Adicionalmente, foram apresentadas as conclusões a respeito de uma quarta assertiva – “*a frequência crítica ν_0 em que*

⁸⁰ Atualmente, essa diferença de potencial (d.d.p.) é conhecida como “potencial de contato”, porém já foi denominada de “potencial de Volta”. Millikan (1914, 1916c) a denomina de “força eletromotriz de contato” (E.M.F.). Santos (2018) para uma discussão detalhada sobre o tema.

$v = 0; p = h \cdot v_0$, isto é, que na intersecção da linha $V v$ no eixo v é a menor frequência em que o metal em questão pode ser fotoeletricamente ativado” –, mostrando uma concordância perfeita entre os dados experimentais e a previsão teórica, tanto para o sódio quanto para o lítio. Millikan ainda determinou um valor para a constante de Planck igual a $h = 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$, dessa vez com erro aproximado de 0,5%. Por fim, indicou que os resultados experimentais de duas outras assertivas, também contidas na “lei do efeito fotoelétrico”, seriam em breve apresentados (Millikan, 2016b).

É nesse contexto histórico-científico que, em março de 1916, Robert A. Millikan compilou todos os resultados experimentais obtidos até então, para fazer um relatório completo sobre o seu método de investigação. Millikan o publicou no formato de um quarto de artigo científico, com o título “A determinação fotoelétrica direta do ‘ h ’ de Planck”, contendo todos os dados experimentais acerca dos testes de cinco assertivas preditas pela “lei do efeito fotoelétrico” (Millikan, 2016c).

O artigo Millikan (1916c) contém trinta e oito páginas, distribuídas em seis seções⁸¹. Na seção 1 (“Introdução”), é apresentado um breve resumo dos principais resultados alcançados no Laboratório Ryerson nos últimos dez anos, de 1905 a 1915. A seção 2 (“Arranjo experimental”) detalha o funcionamento do arranjo experimental construído pela equipe de Millikan para testar a validade da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905). Na seção 3 (“Fontes de erros e suas eliminações”), discute-se o processo de identificação e eliminação de sete fontes de erros presentes em trabalhos anteriores de outros cientistas, o que possibilitou maior acurácia de seus resultados experimentais em comparação com outras pesquisas. Nas seções 4 e 5 são detalhadas as análises de dados e a determinação fotoelétrica da constante de Planck “ h ”. Na última seção, de número 6 (“Teorias da fotoemissão”), após apresentar dados referentes à correspondência empírica altamente precisa para a “lei do efeito fotoelétrico” e à determinação da constante de Planck (h), contribuindo para a resolução da controvérsia científica sobre a linearidade ou não da energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos em relação à frequência da radiação incidente, Millikan dedica seis páginas para discutir a “teoria das cordas de éter” em oposição aos fundamentos da teoria quântica da radiação proposta por Einstein (1905). A seguir, será apresentada uma discussão sobre cada uma dessas seções⁸².

⁸¹ Há um erro de digitação no artigo de Millikan (1916c). A última seção é numerada como “9. Theories of photo emission”. No entanto, a numeração correta deveria ser “6. Theories of photo emission”.

⁸² Para implementação do curso de História da Ciência 2023-1, foi realizada a tradução parcial do artigo de Millikan (1916c), a saber: seção 1 (“Introdução”) e seções 2, 3 e 6. No último encontro (semana 18), os estudantes, divididos em quatro grupos, apresentaram um seminário sobre o assunto.

2.2.6.1 Análise e Discussão do Artigo de Millikan (1916c)

a) *Seção 1. Introdução*

Millikan (1916c) afirma que foram estabelecidos dois objetivos principais para suas investigações: (i) determinar o valor experimental da constante de Planck (h) e, ao mesmo tempo, (ii) testar a validade da equação fotoelétrica de Einstein (1905) – a “lei do efeito fotoelétrico”: $\frac{1}{2}mv_{máx}^2 = Ve = h\nu - p$ (Equação 21)⁸³. De acordo com essa equação, a energia cinética máxima ($\frac{1}{2}mv_{máx}^2$) de um elétron emitido é medida indiretamente pelo produto de sua carga elétrica elementar (e) e da diferença de potencial (V) necessária para interromper completamente a corrente fotoelétrica, denominada de “potencial de frenagem”.

Nesse contexto, Millikan (1916c) assevera que a hipotética “lei do efeito fotoelétrico” apenas poderia ser completamente corroborada mediante testes acerca de cinco assertivas que nela estão contidas em forma de relações experimentalmente verificáveis:

1. Que existe para cada frequência de excitação ν , acima de um certo valor crítico, uma velocidade máxima definitivamente determinável de emissão de corpúsculos [elétrons];
2. Que existe uma relação linear entre V [potencial de frenagem] e ν [frequência];
3. Que $dV/d\nu$, ou a inclinação da linha $V\nu$ [potencial-frequência] é numericamente h/e ;
4. Que na frequência crítica ν_0 [frequência de corte], em que $\nu=0$ e $p=h\nu_0$, ou seja, que o ponto de intersecção da linha $V\nu$ [potencial-frequência] no eixo ν [frequência] corresponde à menor frequência em que o metal em questão pode estar ativo fotoeletricamente.
5. Que a força eletromotriz de contato (E.M.F) [potencial de contato] entre dois condutores quaisquer é dada pela equação:

$$\text{Contact E. M. F} = \frac{h}{e}(\nu_0 - \nu'_0) - (V_0 - V'_0)$$

(Millikan, 1916c, p. 356).

Ele ressalta que, das cinco assertivas, apenas a primeira tinha sido confirmada com precisão por Lenard (1902)⁸⁴ quando Einstein (1905) propôs sua “hipótese de *quantum* de luz”

⁸³ Millikan (1916c) utiliza símbolos modernos e diferentes daqueles empregados por Einstein (1905) para derivar sua “lei do efeito fotoelétrico” (Equação 21, neste trabalho). Portanto, o leitor deve considerar a seguinte substituição simbólica, em que $Ve = \Pi e$, $h = R\beta N$ e $p = P$.

⁸⁴ Nota do autor: Lenard (1902) observou que existe uma velocidade máxima [dos elétrons emitidos], embora não tenha evidenciado o efeito da frequência sobre ela.

e a aplicou para derivar sua “lei do efeito fotoelétrico”. Também enfatiza que, antes de iniciar os estudos no Laboratório de Física Ryerson, a terceira e a quarta assertivas não haviam sido submetidas a testes verdadeiramente rigorosos e, especialmente, que a quinta nunca tinha sido testada e nem se quer considerada por outros pesquisadores – exceto por Richardson e Compton (1912a, 1912b)⁸⁵.

Em sua perspectiva, embora a segunda assertiva já estivesse sendo objeto de análise de várias investigações por quase uma década, havia, naquele momento, um ambiente de controvérsia científica em torno da validade da equação fotoelétrica de Einstein (1905). Para reforçar sua justificativa, Millikan (1916c) cita outros cientistas que pensam de forma semelhante:

Em uma revisão recente, Pohl e Pringsheim [1913], que possuem vasta experiência em trabalhos fotoelétricos, cuja própria experiência extensa com o trabalho fotoelétrico possivelmente os predisponha a ver as dificuldades além do óbvio, afirmam não apenas que quaisquer conclusões a respeito da validade das assertivas (3) e (4) são prematuras e totalmente desprovidas de suporte por quaisquer experimentos com ondas de luz, mas também que a assertiva (2), para a qual praticamente todo o trabalho sobre as energias de fotoemissão tem sido direcionado até agora, não é dedutível dos dados existentes (Millikan (1916c, p. 357).

Além disso, sir J. J. Thomson, em artigo escrito em 29 de dezembro de 1914, afirma: “[...] os resultados experimentais obtidos até agora parecem, em geral, confirmar completamente esse resultado [assertiva (2)], embora eu deva admitir que as evidências experimentais diretas em favor da proporcionalidade estrita são escassas demais para nos permitir afirmar que isso é um resultado direto do experimento [p. 105]” (Millikan (1916c, p. 357-358).

Em seguida, Millikan (1916c) apresenta um breve estado da arte acerca dos métodos, resultados e conclusões de algumas pesquisas experimentais conduzidas sobre a relação linear entre energia cinética máxima e frequência da luz incidente⁸⁶.

O físico norte-americano recorda que os resultados experimentais do estudo pioneiro conduzido por Erich Ladenburg (1907) indicaram a refutação “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein, sugerindo que a velocidade máxima – e não a energia cinética máxima – dos elétrons emitidos era independente da intensidade de luz e diretamente proporcional à frequência da luz

⁸⁵ Millikan (1916c, p. 357, nota 7) comenta: “O professor Richardson em suas notas afirma, com razão, que ele (e Karl Taylor Compton) desenvolveram um ‘novo’ método para estimar as forças eletromotriz de contato E.M.F’s no vácuo, e por isso eles merecem bastante crédito. Mas eles não poderiam utilizar este método no caso do sódio, pois definitivamente afirmam que, por efeitos de fadiga, foram incapazes de obter uma curva completa de fotocorrente-potencial para o sódio. Mais adiante, meu próprio trabalho mostra que esse novo método nem sempre é válido para determinar as forças eletromotriz de contato E.M.F’s”. cf. também Compton (1912).

⁸⁶ Em ordem cronológica, as seguintes pesquisas foram analisadas: Ladenburg (1907), Joffé (1907), Wright (1911), Lindemann (1911), Richardson e Compton (1912a, 1912b), Hughes (1912, 1913, 1914), Page (1913), Pohl e Pringsheim (1913) e Ramsauer (1914a, 1914b).

(ν) (matematicamente, tem-se: $\sqrt{V} \sim \nu$ ou $V \sim \nu^2$). No entanto, ressalta que, no mesmo ano, o físico russo Abram Fedorovich Joffé (1880-1960) reanalisou os dados de Ladenburg (1907) e apontou que é mais provável que se possa deduzir dos experimentos uma relação linear entre as duas grandezas físicas [$V \sim \nu$] (Joffé, 1907), e que Ladenburg mais tarde aderiu a essa conclusão. Para Millikan (1916c), a razão para essa incerteza residia no fato de que nos experimentos de Ladenburg (1907) a relação entre o “potencial de corte” (V) e a frequência de luz (ν) foi investigada somente para três frequências específicas em uma faixa estreita de comprimento de onda, de $\lambda_1=200$ nm a $\lambda_2=260$ nm. Assim, “[...] com uma faixa tão restrita de comprimento de onda sob investigação, e erros experimentais relativamente grosseiros ao realizar os ajustes, praticamente qualquer curva teórica poderia ser ajustada aos dados experimentais” (Millikan, 1916c, p. 358).

Millikan (1916c) argumenta que o mesmo problema metodológico estava presente também nos resultados experimentais obtidos por Richardson e Compton (2012a, 1912b) e por Hughes (1912, 1913, 1914), os quais eram, em sua opinião, os mais confiáveis encontrados nos estudos predecessores. Recorda que os resultados obtidos por Hughes (1912) indicaram corroboração da relação linear entre o potencial de corte (V) e a frequência de luz (ν) [$V \sim \nu$], sugerindo uma evidência favorável à equação fotoelétrica de Einstein (1905). Contudo, alega que esse teste não pode ser considerado rigoroso, pois suas observações e inferências fundamentavam-se exclusivamente na análise de dados de dois comprimentos de onda, a saber, $\lambda_1 = 184,9$ nm a $\lambda_2 = 253,7$ nm, sendo que o primeiro foi considerado pelo próprio cientista como arduamente difícil de determinar por conta extrema da fragilidade da fonte de luz empregada. Millikan (1916c, p. 358) assevera que, “[...] como ele [Hughes (1912)] não leva em conta quaisquer forças eletromotrizes de contato E. M. F entre as superfícies metálicas opostas em seus experimentos, os pontos de intersecção determinados graficamente devem estar incorretos”. Millikan (1916c) sustenta que essa crítica era apoiada pelo recente trabalho de Pohl e Pringsheim (1913)⁸⁷, no qual os autores mostraram que uma relação linear entre a velocidade máxima ($\sqrt{V}$) dos elétrons emitidos e a “frequência de luz” (ν) [$\sqrt{V} \sim \nu$] poderia ser igualmente

⁸⁷ Os resultados de Pohl e Pringsheim (1913, p. 393) sugeriram uma corroboração empírica da equação fotoelétrica de Einstein (1905): “A amplitude da energia dos elétrons emitidos é aproximadamente uma função linear da frequência; isto é, a energia máxima é uma função linear da frequência”. Hughes (1914, p. 474) também chegou a mesma conclusão: “Os arranjos experimentais de Kunz (1910, 1911) e Cornelius (1913) estão sujeitos à consideráveis objeções, como tem sido apontado muito claramente por Compton e, portanto, é duvidoso afirmar que seus resultados são valiosos para decidir sobre a natureza exata da relação entre velocidade e frequência. Os experimentos de Richardson e Compton [1912a, 1912b] – e os meus – são os únicos que abordam esse problema e nos quais as medições foram suficientemente precisas, [...] e ambas as investigações levam à conclusão de que a equação fotoelétrica de Einstein é a relação verdadeira”.

ajustada com base nos dados coletados por Richardson e Compton (1912a, 1912b) e Hughes (1912, 1913a, 1913b, 1914).

Essa breve revisão construída por Millikan (1916c) objetiva, sobretudo, justificar que o uso de uma faixa mais ampla de comprimento de onda e a medição da força eletromotriz de contato eram imprescindíveis na realização de testes experimentais rigorosos da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905). Portanto, em seu entendimento, todos os resultados obtidos anteriormente sobre a relação entre potencial de corte (V) e frequência de luz (ν) necessitavam de ser reavaliados, pois estavam apoiados em base experimental incerta e insegura.

Na sequência, Millikan (1916c) resume os seis principais resultados obtidos por sua equipe no Laboratório de Física Ryerson, na Universidade de Chicago, durante as investigações experimentais sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico:

1. As energias de emissão fotoelétrica são independentes da temperatura da superfície metálica. Ou seja, os fotoelétrons emitidos não compartilham as energias internas associadas à agitação térmica, como normalmente se suponha⁸⁸ [publicado em Millikan; Winchester, 1907].
2. As energias cinéticas de emissão fotoelétrica foram determinadas para em onze superfícies metálicas diferentes. Ao contrário das conclusões de Richardson e Compton (1912a, 1912b) e de Page (1913), os resultados sugerem que essas energias são diferentes para cada metal investigado; e em alguns casos, com uma diferença acima de 1 volt no potencial de corte [publicado em Millikan, 1916a, 1916b].
3. As energias cinéticas de emissão fotoelétrica decrescem consideravelmente quanto maior o tempo de iluminação. Com base nesse resultado, foi investigada e confirmada a hipótese de que tal influência é devida à presença de um filme de impurezas sobre as superfícies metálicas irradiadas [publicado em: Millikan, 1910; Millikan; Wright, 1912].
4. Os efeitos negativos dos filmes de impurezas nas superfícies metálicas devem ser completamente eliminados em qualquer teste experimental rigoroso da “lei do efeito fotoelétrico”, seja por remoção direta ou por meio de medições simultâneas (no vácuo) dos fotopotenciais e das forças eletromotriz de contato (E.M.F's). Se possível, por ambos os procedimentos [publicado em Hennings, 1914].

⁸⁸ Essa é uma consequência imediata com base na “hipótese de gatilho” de Lenard (1902). Esse resultado contraditório foi explicado por Philipp Lenard com base em uma modificação em sua hipótese inicial. No entanto, essa dificuldade com a “hipótese de gatilho” estimulou outros estudos experimentais sobre a relação entre a frequência da luz e a energia dos elétrons, tais como os Ladenburg (1907), Joffé (1907), Ladenburg e Markau (1908), Hull (1909) e Kunz (1910, 1911).

5. Para um mesmo comprimento de onda específico, uma fonte de luz de arco voltaico, funcionando com um milésimo da potência instantânea gerada por uma fonte de luz de descargas elétricas, produz exatamente as mesmas energias de emissão fotoelétrica. Essa observação confirmou de maneira bastante precisa que as energias de emissão fotoelétrica são independentes da intensidade da luz incidente, conforme observado inicialmente por Lenard (1902) [publicado em Wright (1911); Millikan (1913a)].
6. Em contradição com os resultados anteriores divulgados por Wright (1911), a relação linear entre “potencial de corte máximo” (V) e frequência de luz (ν) foi corroborada de forma definitiva e robusta, pela primeira vez, nos estudos de Kadesch (1914a, 1914b)⁸⁹ com superfícies de sódio e potássio livres de filmes de impurezas e com uso de luz na faixa de comprimento de onda entre 220nm e 390nm, a mais ampla já testada até então; e o valor experimental para a constante de Planck (h) foi determinado com um erro aproximadamente igual a 6%.

Millikan (1916c) conclui lembrando o fato de que em seu discurso⁹⁰ de posse como vice-presidente da Associação Americana para o Avanço da Ciência, em dezembro de 1912, tinha expressado a esperança de que em pouco tempo seria possível testar rigorosamente a “lei do efeito fotoelétrico” e, assim, determinar fotoeletricamente o valor da constante de Planck (h)⁹¹. Além disso, enfatiza que sua participação pessoal na investigação restringiu a testar, com máximo de precisão possível, a validade da terceira, quarta e quinta assertivas da equação fotoelétrica de Einstein (1905), mencionadas no início da seção.

⁸⁹ “Os resultados das investigações estão de acordo com aqueles encontrados por Hughes [1914] e Richardson e Compton [1912a, 1912b]. Eles podem ser expressos na forma $V = k\nu - V_0$ ” (Kadesch, 1914a, p. 367).

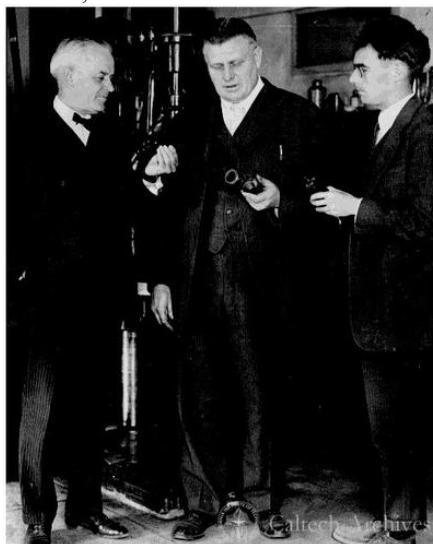
⁹⁰ Nota do autor: A seguir está a citação do discurso: “Mas não apenas é a absorção da energia por um elétron de uma onda luminosa proporcional à frequência da luz (ν); sua magnitude numérica [dessa energia] é dada aproximadamente pela multiplicação da frequência de luz (ν) pelo valor da constante de Planck (h). É verdade que não há aqui nenhum acordo preciso ainda, pois parte da energia absorvida pelo elétron é perdida ao ser ejetado do metal, e a quantidade exata dessa perda não tem sido medida com tanta precisão como esperamos em breve seremos capazes de obter” (Millikan, 1913b, p. 131).

⁹¹ Os resultados das pesquisas de Richardson e Compton (1912a, 1912b) e Hughes (1912, 1913, 1914) indicavam, respectivamente, no melhor dos casos, um erro acima de 10,5% e de 36,0% entre o valor experimental e teórico para constante de Planck (h).

b) *Seção 2. Arranjo Experimental*

Na segunda seção, Millikan (1916c) dedica quatro páginas à descrição de seu método investigação e de seu arranjo experimental, esse último denominado “oficina mecânica no vácuo”. O cientista explicou que, desde o início do projeto, ao analisar as fontes de erros em trabalhos mais antigos e outros contemporâneos (ver próxima seção), ficou estabelecido como pré-requisito essencial que todas as operações e medições deveriam ser realizadas em um ambiente de vácuo extremo tanto quanto possível, pois somente assim seria possível assegurar uma medição precisa da constante de Planck (h) e um teste experimental rigoroso da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905).

Figura 20 - Robert A. Millikan, Julius Pearson e Ira Bowen na Caltech Instrument Shop.



Nota: Millikan, Pearson e Bowen (da esquerda para a direita) estão examinando um eletroscópio de raios cósmicos projetado por Millikan e Bowen e construído por Pearson.

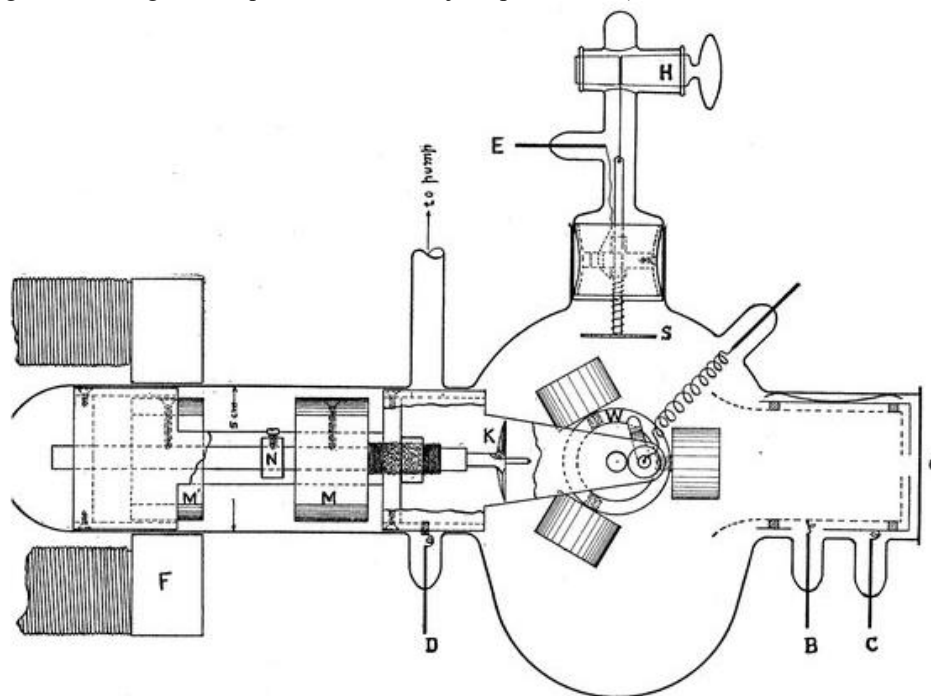
Fonte: Caltech Archives.

Millikan (1916c) enfatizou que o equipamento foi projetado e construído no próprio Laboratório de Física Ryerson, passando por diversas modificações ao longo de quase uma década de pesquisas. Além disso, agradeceu às colaborações de Albert Hennings e William Kadesch no desenvolvimento e testagem do equipamento⁹². Em particular, reconheceu explicitamente que “[...] o sucesso obtido nesses experimentos se deve, em grande parte, à

⁹² Com base nos agradecimentos feitos por Millikan (1916c), pode-se inferir que ele encarregou Hennings e Kadesch de testar o equipamento, permitindo-lhes que publicasse alguns trabalhos sem sua coautoria. Em outras palavras, Millikan costumava definir quais artigos seus colaboradores deveriam assinar e quais ele seria o único autor ou primeiro autor. De acordo com Santos (2018), aparentemente, esse era o padrão seguido por Millikan na relação profissional com seus colaboradores, pois algo similar também aconteceu no caso do experimento da gota de óleo (Kadesch, 1914a; 1914b; Kadesch; Hennings, 1916; Hennings; Kadesch, 1916).

habilidade e experiência do mecânico, o Sr. Julius Pearson⁹³ (cf. Figura 20), responsável desde o início pela fabricação de todos os tubos, e que contribuiu significativamente para seu design” (Millikan, 1916c, p. 361).

Figura 21 - Diagrama esquemático do arranjo experimental (“oficina mecânica no vácuo”).



Nota: Equipamento utilizado por Robert Millikan e colaboradores para determinar fotoelétricamente a constante de Planck (h) e testar a validade da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905).

Fonte: Millikan (1916c, p. 362).

O físico norte-americano destaca que, em seu método de investigação, três operações principais são executadas dentro da “oficina mecânica no vácuo”: (1) a remoção dos filmes de impurezas nas superfícies metálicas a serem irradiadas; (2) a medição das fotocorrentes e dos fotopotenciais decorrentes dessas superfícies metálicas sem filmes; e (3) a medição simultânea força eletromotriz de contato (E.F.M.) das superfícies metálicas imediatamente após a remoção dos filmes de impurezas e antes de serem irradiadas. Ele ressalta que essas três operações são realizadas em rápida sucessão, pois os metais alcalinos (sódio, lítio e potássio) são substâncias

⁹³ Julius Pearson e seu irmão Fred Pearson, ambos de nacionalidade sueca, foram contratados por Albert A. Michelson (1852-1931) no início dos anos de 1900 para trabalhar como fabricantes de instrumentos no Laboratório de Física Ryerson, na Universidade de Chicago. Eles já haviam se destacado como mestres artesãos na *Petitdidier's Optical Shop*, em Chicago, e Michelson os empregou para trabalhar em grades de difração e outros dispositivos ópticos. Em 1921, Julius seguiu Millikan quando ele foi indicado para diretor do Laboratório de Física Norman Bridge no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), em Pasadena, enquanto Fred permaneceu com Michelson na Universidade de Chicago (Livingston, 1973). Certa vez, Millikan disse sobre Julius Pearson: “Ele ganhou três prêmios Nobel – o de Michelson [1907], o meu [1923] e o de Anderson [1936]”. Disponível em: <https://digital.archives.caltech.edu/collections/Images/1.36-1/>. Acesso em: 3 fev. 2024.

facilmente inflamáveis. O cientista forneceu uma fotografia e um diagrama esquemático da nona versão do equipamento (cf. Figura 21).

O equipamento “oficina mecânica no vácuo” consiste em um tubo de quartzo no qual o seu interior está em um vácuo de alta qualidade (entre 10^{-6} e 10^{-7} mmHg)⁹⁴ e totalmente transparente à luz ultravioleta. Em seu interior há uma roda (*W*) na qual três cilindros fundidos de lítio, sódio e potássio estão acoplados em sua periferia. Essa roda (*W*) é girada por um eletroímã (não ilustrado no diagrama) até que esteja posicionada em frente à faca rotativa (*K*). A faca (*K*) pode ser ativada externamente pela ação do eletroímã (*F*) sobre as armaduras *M* e *M'*, removendo uma lâmina muito fina da superfície facilmente corroída do cilindro. Isso resulta em uma superfície metálica recém-laminada e totalmente limpa para ser irradiada. Em seguida, a roda (*W*) é então girada até que a superfície metálica recém-laminada fique voltada perpendicularmente para a extremidade (*O*), através da qual um feixe de luz com alto grau de monocromaticidade é projetado por cerca de trinta segundos. Os fotoelétrons ejetados são coletados em um cilindro de Faraday de malha de cobre (*B*) e cobre sólido (*C*), registrando assim uma série de fotocorrentes correspondentes a várias diferenças de potencial (d.d.p.). Em qualquer instante desejado, a força eletromotriz de contato (E.M.F.) na superfície recém-laminada pode ser medida ajustando a posição da roda (*W*) para ficar de frente para a placa teste de cobre (*S*) (Millikan, 1916c).

Millikan (1916c) foi diligente ao apresentar justificativas sólidas para respaldar a confiança tanto em seus resultados experimentais quanto em suas conclusões. Primeiramente, ele julgou que era necessário analisar os dados coletados considerando diferentes superfícies metálicas. A ideia inicial era apresentar ao menos as medições de três metais alcalinos (sódio, lítio e potássio); no entanto, um acidente impediu a inclusão de dados referente ao potássio⁹⁵.

O segundo aspecto diz respeito à rigorosa calibragem de seus instrumentos de medidas. Millikan (1916c) fez questão de ressaltar que a determinação força eletromotriz de contato foi feita com uma precisão melhor que 0,5%, e que todas as medidas de potenciais de contato foram expressas em termos das indicações dos voltímetros do *Weston Standard Laboratory*. Esses

⁹⁴ Millikan (1916c) ressalta que não mediu especificamente a quantidade de vapor de mercúrio presente no interior do tubo, pois não havia razões para acreditar que a “bomba de vácuo” não tivesse removido o vapor de mercúrio tão completamente quanto outros gases. Além disso, afirma que a “bomba de vácuo” funcionou de modo ininterrupto durante a coleta de dados nos testes experimentais.

⁹⁵ A natureza do acidente não foi especificada. Na verdade, são incertas as razões pelas quais Millikan (1916c) tenha avaliado que, naquele momento, a inclusão dos dados sobre a superfície de potássio pudesse, de alguma maneira, prejudicar a precisão e a confiabilidade em seus resultados experimentais. Isso porque Kadesch (1914b) já tinha publicado alguns resultados preliminares que corroboravam a relação linear entre a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos e a frequência da radiação incidente utilizando uma superfície de potássio.

voltímetros foram certificados e calibrados com precisão de 0,1% pelo *National Bureau of Standards*, a agência nacional de pesos e medidas dos Estados Unidos.

Em consonância com o aspecto anterior, Millikan enfatizou que, para testar com máxima precisão a hipotética relação linear entre a frequência da radiação incidente e a diferença de potencial de frenagem (“potencial de corte”), foram tomados dois cuidados prévios: “[...] primeiramente, era necessário conhecer a frequência (ν) com extrema exatidão; e, em segundo lugar, era importante assegurar que nenhum vestígio de luz de frequência maior do que aquela investigada atravessasse a fenda do espectroscópio” (Millikan, 1916c, p. 364). Para isso, foram utilizados vários filtros de luz que eliminavam os espalhamentos de luz comprimento de onda curto e uma lâmpada de quartzo-mercúrio como fonte de luz monocromática, cujos comprimentos de onda foram calibrados pelo Sr. Walter T. Whitney, da *General Electric Research Laboratory*.

Em terceiro lugar, comparativamente a outros estudos, Millikan (1916c) empregou uma faixa de comprimento de onda significativamente maior em sua pesquisa, abrangendo praticamente todo espectro de luz visível e ultravioleta. Foram utilizadas oito linhas espectrais: $\lambda_0 = 680,00$ nm (vermelho), $\lambda_1 = 546,10$ nm (verde), $\lambda_2 = 433,94$ nm (azul), $\lambda_3 = 404,68$ nm (violeta), $\lambda_4 = 365,20$ nm (UV-A), $\lambda_5 = 312,55$ nm (UV-A), $\lambda_6 = 253,47$ nm (UV-C) e $\lambda_7 = 239,90$ nm (UV-C).

c) *Seção 3. Fontes de Erros e suas Eliminações*

Outro aspecto importante do artigo de Millikan (1916c) que realça sua diligente abordagem metodológica, bem como a apresentação de justificativas sólidas para assegurar maior confiabilidade em seus resultados experimentais, é a extensa discussão sobre sete possíveis fontes de erros (e suas eliminações) identificadas em pesquisas anteriores sobre a validade da equação fotoelétrica de Einstein (1905).

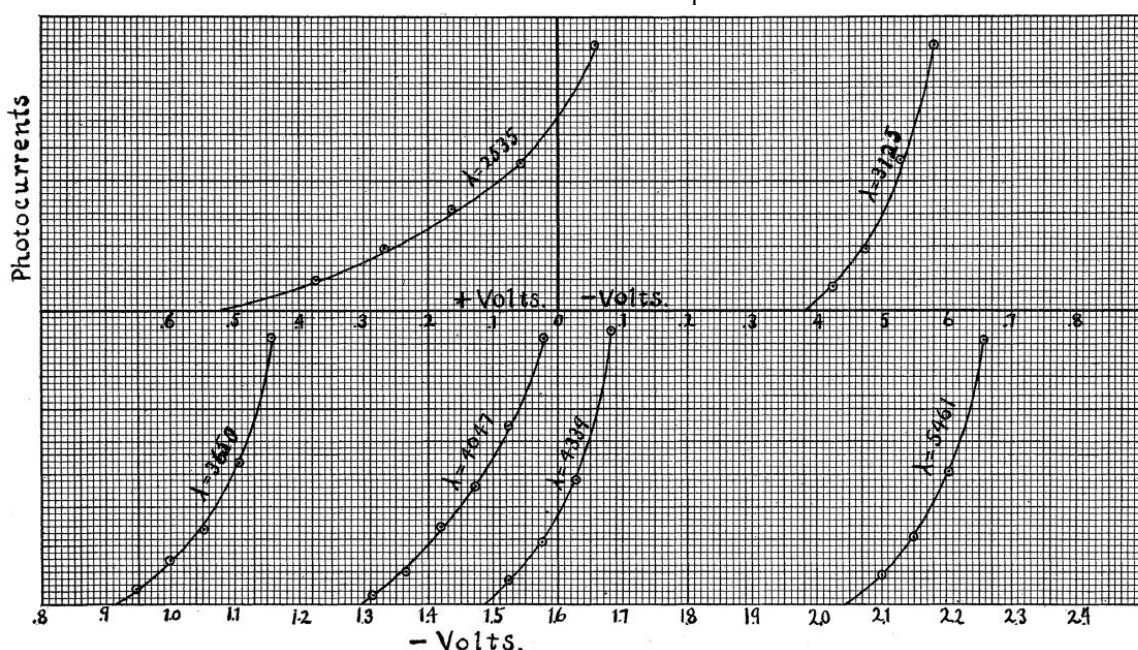
A primeira fonte de erro está associada à medição exata da “*magnitude das fotocorrentes*”, o que interfere diretamente nas medidas do “potencial de corte” e da “energia cinética máxima” de emissão dos fotoelétrons da placa. Millikan (1916c, p. 364-365) afirmou que: “[...] dado que os fotopotenciais são independentes da intensidade de luz, é evidente que a precisão na determinação do ponto de intersecção da curva fotocorrente-potencial com o eixo potencial [o potencial de corte] é diretamente proporcional à magnitude das fotocorrentes”. A

solução encontrada foi a ideia de remover os filmes de impurezas das superfícies metálicas antes de serem irradiadas. Ele observou que, mantendo-se as mesmas condições experimentais, as fotocorrentes produzidas por uma superfície de sódio recém-laminada eram até quinhentas vezes maiores que aquelas de superfícies existentes a algumas horas.

Millikan (1916c) destaca que a abordagem empregada para determinar o “potencial de corte” – e, conseqüentemente, a “energia cinética máxima – não consistiu em localizá-lo experimentalmente apenas reduzindo gradativamente a diferença de potencial até a interrupção completa da fotocorrente e da emissão dos fotoelétrons, pois considerava esse procedimento incerto, embora tivesse sido adotado por vários outros pesquisadores. Em vez disso, optou por construir uma curva fotocorrente-potencial com vários pontos na vizinhança de sua possível localização e, assim, determinar o exato ponto de “potencial de corte” seguindo o traçado dessa curva, como mostrado na Figura 22.

A segunda fonte de erro refere-se à possibilidade de “fotoelétrons serem emitidos pela luz refletida”. Millikan (1916c) adverte que é fundamental assegurar que a fotocorrente mensurada seja constituída exclusivamente por elétrons emitidos da superfície metálica diretamente iluminada, sem quaisquer elétrons adicionais liberados pela incidência da luz refletida nas paredes internas do tubo de quartzo ou em outras partes metálicas do equipamento, especialmente aquelas feitas cobre oxidado. Evidentemente, esse erro experimental torna-se mais significativo quanto menor for a magnitude da fotocorrente.

Figura 22 - Gráfico ilustrando curvas fotocorrente-potencial para uma superfície metálica recém-laminada de sódio irradiada com seis diferentes comprimentos de onda.



Nota: Valores informados em angström (Å).

Fonte: Millikan (1916c, p. 371).

Millikan (1916c) defendeu que uma solução possível, porém incerta, seria a aplicação de uma pequena diferença de potencial positiva na superfície metálica iluminada. Entretanto, a solução mais confiável foi utilizar um conjunto de linhas espectrais de radiação eletromagnética cujo comprimento de onda mínimo fosse incapaz de liberar elétrons das partes internas do equipamento, mas que ainda assim as superfícies metálicas de sódio, lítio e potássio fossem fotossensíveis. Para o teste com o sódio, o comprimento de onda limite foi de $\lambda_{\min} = 268,80$ nm, enquanto para o lítio foi de $\lambda_{\min} = 253,50$ nm.

Ele ainda apontou que foi por causa desse erro experimental que Richardson e Compton (1912a, 1912b) provavelmente depositaram mais confiança em suas medições da energia cinética média (mais frequentemente observada) em detrimento da energia cinética máxima. No entanto, Millikan (1916c, p. 366) observou que “a validade da equação [fotoelétrica] de Einstein [1905] somente pode ser testada por determinações precisas da energia máxima” dos fotoelétrons emitidos, e não por sua energia média.

A terceira fonte de erro está relacionada à questão da “*força eletromotriz de contato*”. Esse problema percebido e tratado quase que exclusivamente por Millikan e seus colaboradores no Laboratório de Física Ryerson. Ao ser submetida a testes experimentais, a “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905) demanda uma atenção meticulosa que aparentemente foi negligenciada por muitos pesquisadores. A função trabalho (P) na equação possui duas partes distintas. Uma delas (p_1) representa a energia necessária para liberar o elétron do átomo, enquanto a outra (p_2) diz respeito à energia requerida para ejetar o elétron da superfície metálica. Essa última componente (p_2) está intrinsecamente ligada à força eletromotriz de contato. Resultados anteriores que sustentaram tanto a corroboração quanto a refutação da “lei do efeito fotoelétrico” foram obtidos sem considerar a mensuração do potencial de contato nas superfícies metálicas antes de serem irradiadas (Santos, 2018).

Millikan (1916c) relata variações nas medições do potencial de contato entre os metais alcalinos utilizados e a placa teste de cobre (S) de 0,4 até 3,0 volts, dependendo das condições experimentais, como a idade das superfícies recém-laminadas e os gases absorvidos. Segundo ele:

Essa variação é suficiente para evidenciar a inutilidade de tentar obter informações precisas sobre as relações entre o potencial de corte e a frequência no caso de metais alcalinos sem a medição simultânea em vácuo dos fotopotenciais e das forças eletromotrizes de contato (Millikan 1916c, p. 366).

Em vez de corrigir cada medição de fotopotencial por uma medição simultânea da força eletromotriz de contato (E.M.F.), Millikan (1916c, p. 366-367) afirma que, naquele momento: “[...] a melhor solução foi descobrir as condições experimentais nas quais a força eletromotriz de contato permanecesse constante por um tempo suficientemente longo para possibilitar uma série completa de medições fotopotencial-frequência”. Millikan menciona que foi surpreendente quando, após um número considerável de testes, descobriu-se que tais condições eram obtidas não no ambiente de vácuo extremo, mas a uma pressão de cerca de 0,01 mmHg dentro do tubo. No entanto, ele ressaltou que, mesmo nessas condições, os resultados obtidos para a determinação fotoelétrica da constante de Planck (h) estavam em perfeito acordo outros obtidos no vácuo mais extremo ($\approx 10^{-7}$ mmHg). Além disso, afirmou que foi exatamente nessas condições que foi obtida a curva de fotopotencial-frequência mais confiável para uma superfície metálica de sódio em suas pesquisas (cf. Figura 22).

A quarta fonte de erro está associada ao “*comprimento da curva fotopotencial-frequência*”, ou, de outro modo, ao tamanho da faixa de comprimento de onda ao longo da qual fotopotenciais confiáveis podem ser medidos de maneira precisa. Millikan aponta que Ladenburg (1907) empregou uma faixa estreita de apenas 59 nm (201 nm até 260 nm), Hughes (1912, 1913), de 69 nm (185 nm até 253 nm), Richardson e Compton (1912a, 1912b), de no máximo 117 nm (313 nm até 430 nm), enquanto as medições de Kadesch (1914b) cobriram a faixa de 170 nm (220 nm até 390 nm).

Por outro lado, ele relata que empregou uma faixa de comprimento de onda significativamente maior em suas investigações, o que lhe possibilitou um número maior de pontos experimentais, aumentando a precisão do ajuste da curva fotopotencial-frequência. Com efeito, a escolha pelos metais alcalinos sódio, lítico e potássio foi feita por apresentarem emissões fotoelétricas em várias frequências. A fonte de radiação emitia luz monocromática com linhas espectrais de $\lambda = 239,90$ nm (UV-C) a $\lambda = 680,00$ nm (vermelho), totalizando 440 nm de faixa. Enquanto os fotopotenciais foram determinados entre 265 nm e 577 nm, correspondendo a uma faixa de 312 nm. Portanto, “a faixa é quatro vezes maior que a de Ladenburg [1907] e Hughes [1913a, 1913b], e a região na qual ajustes totalmente confiáveis podem ser feitos é quase três vezes maior que a de Richardson e Compton [1912a, 1912b] ou de Kadesch [1914b]” (Millikan, 1916c, p. 368).

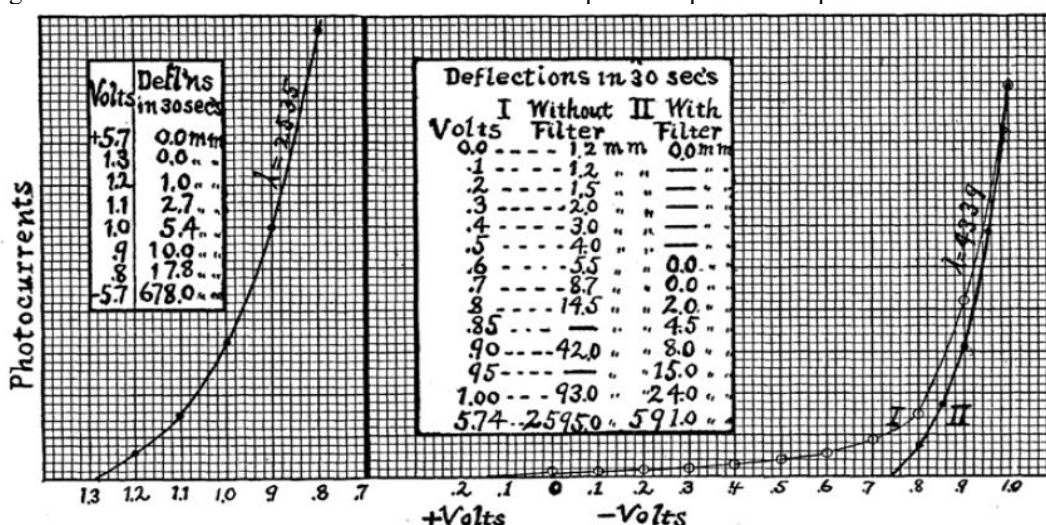
A quinta fonte de erro analisada, e possivelmente a mais significativa para imprecisão dos resultados experimentais, refere-se à emissão fotoelétrica causada por vestígios de “*espalhamento de luz comprimento de onda curto*”, isto é, abaixo do limite mínimo estabelecido para a linha espectral em estudo. Esse espalhamento originava-se na reflexão difusa da luz nas

faces do prisma, lentes ou no refletor plano do monocromador. As suspeitas iniciais da ocorrência desse efeito indesejado surgiram quando foi observado que os gráficos da curva fotocorrente-potencial se aproximavam assintoticamente do eixo horizontal (potencial), formando algo parecido com um “pé” (cf. Figura 23), lado direito [Curva I]), em vez de seguir a tendência da curva e rapidamente interceptar o eixo horizontal. Além disso, as suspeitas se tornaram mais plausíveis após alguns testes com luz de comprimento de onda mais elevados e, sobretudo, pelas alterações observadas nos “pés” da curva fotocorrente-potencial após a substituição do refletor plano do monocromador por outro construído no próprio laboratório com metal espelhado. Ele informou:

Isso [espalhamento de luz de comprimento de onda curto] foi confirmado, de forma bastante conclusiva, quando se constatou que a interposição de filtros, os quais absorviam todos os comprimentos de onda mais curtos (alta frequência) do que aquele sob investigação, resultava no desaparecimento completo desses pés (Millikan, 1916c, p. 368).

Millikan (1916c) afirmou que os recentes resultados divulgados por Ramsauer (1914a, 1914b), os quais foram utilizados pelo autor para defender a tese de que não existe uma velocidade máxima definida e determinável para os elétrons emitidos de uma superfície metálica devido à incidência de luz de uma frequência específica, são imprecisos e, portanto, não confiáveis, exatamente por conta dos erros causados pelo espalhamento de luz de comprimento de onda mais curto (luz falsa), sendo essa a razão principal para a determinação de um valor para constante de Planck (h) tão errático e abaixo do valor teórico em seu estudo.

Figura 23 - Gráfico ilustrando duas curvas fotocorrente-potencial para uma superfície metálica de lítio.



Nota: No lado esquerdo, para o comprimento de onda $\lambda = 2533 \text{ \AA}$, não se observa a formação de um “pé”, ou seja, não há quaisquer efeitos indesejados decorrentes do espalhamento de luz de comprimento de onda mais curtos. Em contrapartida, no lado direito, para o comprimento de onda $\lambda = 4339 \text{ \AA}$, observa-se um pronunciado “pé” (Curva I), que desapareceu completamente após a interposição de um filtro de luz específico (Curva II).

Fonte: Millikan (1916c, p. 369).

No decorrer das pesquisas, para cada linha espectral investigada, foram selecionados filtros específicos que absorviam praticamente toda a energia de comprimento de onda mais curto do que aquele de interesse. Entretanto, Millikan (1916c) ressaltou que o uso de filtros implicava em uma redução considerável na intensidade das fotocorrentes de saturação, influenciando negativamente a determinação exata do ponto intersecção do potencial de corte. Por isso, ele considerou mais adequado eliminar os “pés” nas curvas fotocorrentes-potencial tornando as superfícies transmissoras e refletoras o mais escuras possível. O gráfico ilustrado na Figura 22, plotado com os dados obtidos para uma superfície de sódios, considerado o mais confiável do estudo, foi construído exatamente sob essas condições.

A última fonte de erro analisada está associada à diferença conceitual entre “*energia máxima de emissão*” e “*energia mais frequente de emissão*”. Retomando o comentário sobre o trabalho de Richardson e Compton (1912a, 1912b) no fim da discussão a respeito da segunda fonte de erro – “*électrons liberados pela luz refletida*” –, Millikan (1916c) afirmou que os autores assumiram como premissa para as suas conclusões que, num eventual teste experimental com uma ampla variedade de frequências de luz, a razão entre a “energia mais frequente” e a “energia máxima” dos elétrons emitidos é constante. Entretanto, seus resultados experimentais com uma superfície metálica de sódio sugerem que tal premissa não é válida, nem mesmo provável. Ele argumentou que, mesmo considerando hipoteticamente a superfície metálica de sódio como homogênea, as diferenças na capacidade de penetração da luz de diferentes comprimentos de ondas, assim como as diferenças na absorção de elétrons em diferentes velocidades nas camadas do sódio pelas quais eles emergem, parecem requerer diferentes curvas de distribuição de velocidades com diferentes linhas espectrais. Dessa forma, em sua perspectiva, não há qualquer justificativa para usar a medição da “energia mais frequente de emissão” em teste experimental rigoroso sobre a equação fotoelétrica de Einstein (1905).

Millikan finalizou a terceira seção do artigo com a seguinte conclusão:

Se a constante de Planck (h) está de fato envolvida no fenômeno do efeito fotoelétrico, espera-se que sua presença seja corroborada por meio de medições precisas das energias máximas de emissão sob a incidência de luzes de diferentes frequências. A atenção neste estudo foi, portanto, direcionada completamente para esta finalidade (Millikan, 1916c, p. 370).

Compartilhando o entendimento de Franklin (2013, 2016), pode-se afirmar que as investigações de Millikan (e seus colaboradores) sobre a determinação da constante de Planck (h) e a validade da “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905) foram, portanto, um teste experimental metodologicamente robusto. Embora seja verdade que possa haver alguma dúvida

sobre como a precisão do comprimento de onda da luz incidente foi determinada por Walter T. Whitney, ou por que os dados referentes às superfícies metálicas de sódio e de lítio eram mais confiáveis que outros, ou ainda por que os dados de potássio foram excluídos, mesmo que já tivessem sido publicados por Kadesch (1914b), o efeito geral foi de resultados experimentais bastante críveis⁹⁶.

Em 1914, por exemplo, o físico britânico Owen Willans Richardson fez o seguinte comentário após a apresentação dos resultados preliminares fornecidos por Millikan (1914) no encontro da Associação Americana para o Avanço da Ciência:

Em relação aos fatos acima mencionados, eu de forma alguma tenho o desejo de discordar das conquistas do Professor Millikan, cuja importância dificilmente pode ser exagerada. Não há dúvida de que o trabalho de Kadesch (1914a, 1914b) exhibe uma evolução em relação aos experimentos iniciais de Hughes (1914) e Richardson e Compton (1912), e que o Professor Millikan foi bem-sucedido em fornecer um avanço ainda maior nessa mesma direção. Em relação aos resultados de sua investigação, eu estou particularmente feliz em recebê-los, uma vez que estão totalmente de acordo com a visão defendida por mim em decorrência dos experimentos realizados em colaboração com o Dr. Compton (Richardson, 1914, p. 523).

d) *Seções 4 e 5. A Determinação Fotoelétrica da Constante de Planck (h)*

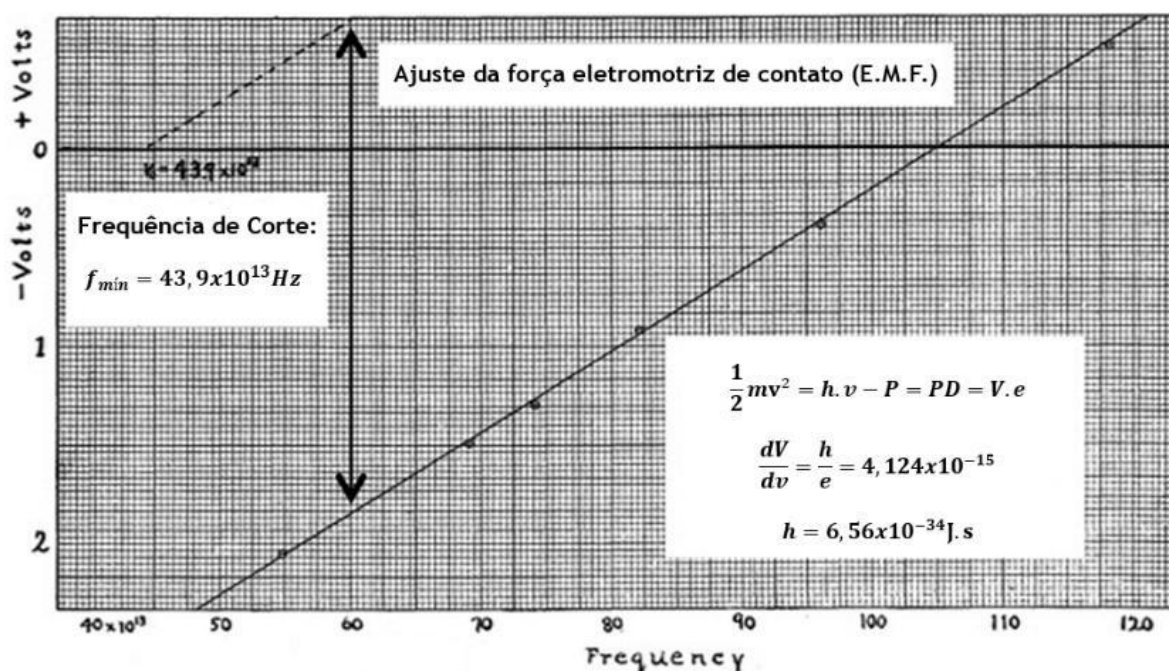
Com as possíveis fontes de erros eliminadas ao máximo, Millikan procedeu à coleta e análise de dados para determinar o valor experimental da constante de Planck (h). Os dados coletados para uma superfície metálica de sódio recém-laminada com seis linhas espectrais, os quais ele repetidamente enfatiza como os mais confiáveis⁹⁷, estão representados na curva fotopotencial-frequência no gráfico ilustrado na Figura 24.

⁹⁶ Vale a pena mencionar dois trabalhos recentes que abordam alguns problemas nos experimentos e no artigo de Millikan (1916c) sobre o efeito fotoelétrico. Lloyd (2015) discute a possibilidade de que a superfície metálica de sódio, mesmo recém-laminada no vácuo, estivesse quase sempre contaminada por uma finíssima película isolante de hidróxido de sódio cristalino (NaOH). Isso ocorre devido às limitações (desconhecidas na época) da bomba à vácuo para detecção de pressão de vapor d'água condensado nas paredes de vidro quando os gases residuais são removidos. O resultado implica que a verdadeira pressão final provavelmente foi cerca de duas ordens de grandeza maior que a medição. Por outro lado, Santos (2018) discute o tratamento teórico e experimental fornecido à problemática do potencial de contato. Ao expor os seus cálculos relativos ao potencial de contato, Millikan (1916c) apresenta um resultado equivocado que aparentemente não foi percebido pelos especialistas no tema. Em 1921, Millikan corrige o equívoco sem fazer referência ao erro anterior. O autor conclui que não parece haver uma justificativa plausível para esse engano como fruto de um erro de digitação.

⁹⁷ Millikan (1916c) não explicita as razões pelas quais considera os dados da superfície metálica de sódio como os mais confiáveis, nem mesmo porque entre esses dados específicos, alguns são ainda mais confiáveis. Entretanto, pode-se inferir que esse julgamento está possivelmente associado a estabilidades das medições dos valores da força

Em primeiro lugar, Millikan (1916c) observa que os seis pontos se ajustam quase perfeitamente em uma linha reta, corroborando a assertiva 2 contida na equação fotoelétrica de Einstein (1905), isto é, que existe uma relação linear entre a energia cinética máxima – medida indiretamente pelo potencial de corte (V) – e a frequência da luz incidente (ν); e confirmando as conclusões anteriores alcançadas sucessivamente nos trabalhos de Joffé (1907), Hull (1909), Kunz (1910, 1911), Richardson e Compton (1912a, 1912b), Hughes (1912, 1913, 1914) e Kadesch (1914a). Em segundo lugar, Millikan (1916c) relata que utilizou cinco pontos para determinar a inclinação da reta e, assim, obter o valor experimental da constante de Planck (h): $h = 6,562 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$. Ele nota que nenhum dos pontos se afastava da linha em mais do que 0,01 volts. Dessa forma, como a variação máxima do potencial de corte foi de aproximadamente 2 volts para essas cinco linhas espectrais, a incerteza na inclinação da reta foi estimada em 1 parte em 200 ou 0,5%.

Figura 24 - Potencial de Corte [V] x Frequência [ν] para uma superfície metálica de sódio recém-laminada.



Fonte: Adaptado de Millikan (1916c, p. 373).

Millikan (1916c) então calcula o valor da constante de Planck (h) por meio de uma segunda abordagem metodológica. Para determinar a inclinação da reta, fixou-se o ponto referente à linha espectral de comprimento de onda igual a $\lambda = 546,10 \text{ nm}$ (verde) – por ser o

eletromotriz de contato (E.M.F.) e das fotocorrentes, cujo período, em condições específicas, foi informado de algumas horas. Em certo momento, Millikan (1916c, p. 374) escreveu: “Em um vácuo extremo, embora a força eletromotriz de contato (E.M.F.) não mude rapidamente após a remoção [dos filmes de superfície], as fotocorrentes muitas vezes decaem para um terço ou um quarto do valor inicial em meio hora, tornando impossível obter um conjunto completo de curvas como a acima (cf. Figura 23).

mais intenso e o de maior valor –, enquanto o segundo ponto foi localizado alternando sucessivamente as outras quatro linhas espectrais. Millikan (1916c, p. 375) apresenta uma tabela com os resultados de nove determinações diferentes de inclinação de reta – duas para $\lambda = 404,7$ nm, duas para $\lambda = 365,0$ nm, quatro para $\lambda = 312,6$ nm e uma para $\lambda = 253,5$ nm. Nesse caso, o valor médio obtido para a constante de Planck foi igual a $h = 6,576 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, cuja incerteza foi estimada entre 1% e 4%.

Com base nos dois valores experimentais obtidos para a constante de Planck (h) para uma superfície de sódio, tem-se o valor médio igual a $h_{méd}(Na) = 6,569 \cdot 10^{-34} J \cdot s$.

Millikan (1916c) continuou sua determinação fotoelétrica da constante de Planck utilizando os dados coletados para uma superfície metálica de lítio. Contudo, mencionou que um novo tubo experimental e um novo espectrômetro foram empregados nessa segunda etapa da investigação. Além disso, relatou que a coleta foi acompanhada por cerca de seis meses com uma única superfície recém-laminada de lítio, isso porque o material exibiu uma excelente estabilidade nas medições de fotocorrentes. Com esse segundo conjunto de dados, e utilizando as duas abordagens metodológicas, o valor médio experimental determinado para a constante de Planck foi igual a $h_{méd}(Li) = 6,584 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, cuja incerteza foi estimada em aproximadamente 1%.

Portanto, Millikan (1916c) apresentou a determinação fotoelétrica de quatro valores experimentais para a constante de Planck (h): dois para o sódio e dois para o lítio. No entanto, enfatizou: “No que diz respeito à precisão, deposito maior confiança no valor $h = 6,57 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, obtido a partir dos experimentos com sódio. Se, como estimado, esse valor estiver errado em não mais que 0,5%, ele é de longe o valor mais confiável de h disponível até o momento” (Millikan, 1916c, p. 377-378).

Millikan (1916c, p. 388) resumiu seus resultados experimentais da seguinte forma:

1. A equação fotoelétrica de Einstein [1905] foi submetida a testes muito rigorosos e, em todos os casos, parece prever exatamente os resultados observados.
2. A constante de Planck 'h' foi determinada fotoeletricamente com uma precisão de cerca de 0,5% e o valor obtido foi:

$$h = 6,57 \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

Antes de prosseguirmos com a discussão da última seção do artigo, é relevante fazer um breve comentário sobre a descrição dos resultados fornecidos por Millikan (1916c) nos livros didáticos modernos. Os dados coletados e sua representação gráfica, ilustrada na Figura 24, têm sido amplamente reproduzidos nesses livros (e.g., Halliday, Resnick e Walker, 2016, p. 400,

Figura 38-2). Muitas vezes, é afirmado que o prolongamento da linha reta e a localização do ponto de intersecção com o eixo do potencial, isto é, o coeficiente linear da reta, fornecem a medida da função trabalho da superfície metálica de sódio iluminada. No entanto, isso está conceitualmente equivocado! O valor atualmente aceito para a função trabalho do sódio é de 2,75 eV, enquanto o valor obtido para o coeficiente linear da reta construída por Millikan (1916c) é de 1,82 eV, ou seja, com uma diferença de quase 34% e com um valor menor que qualquer outro elemento metálico da tabela periódica. Dada a alta precisão obtida por Millikan (1916c) na ordem de 0,5% para o valor da constante de Planck (h), infere-se que tal discrepância não pode ser justificada como baixa precisão na abordagem metodológica e nos instrumentos de medida empregados (Lloyd, 2015).

De fato, observa-se que Millikan (1916c) não determina o valor da função trabalho do sódio com base no gráfico ilustrado na Figura 24, mas a partir do ponto de potencial de corte na curva potencial-fotocorrente da Figura 23. Conforme discutido nos trabalhos de James (1973), Rudnick e Tannhauser (1976), Strnad (1980) e Lloyd (2015), a localização do coeficiente linear da reta do gráfico da Figura 24 fornece, na verdade, o valor da função trabalho da placa coletora e não da placa do sólido iluminado. O autor ressalta que, embora essa diferença conceitual tenha sido enfatizada repetidamente por Robert Millikan em seus artigos sobre os experimentos do efeito fotoelétrico, especialmente em Millikan (1916a), ela é frequentemente ignorada ou desconhecida por parte dos autores de livros didáticos.

e) *Seção 6. Teorias da Fotoemissão e a Rejeição à Teoria Quântica da Luz*

Durante o período de realização de suas investigações experimentais sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, Millikan (1916c, p. 355) não era de forma alguma um adepto da “hipótese de *quantum* de luz”, pois, para ele, “[...] a ousada, para não dizer imprudente, hipótese de um corpúsculo de luz eletromagnética de energia $h\nu$, em que essa energia é transferida para os elétrons por meio da absorção [...] contraria completamente os fatos estabelecidos sobre a interferência da luz”.

Além disso, de acordo com sua visão sobre a gênese da ideia de “*quantum* de luz”, na época em que foi proposta, em 1905, não havia uma base empírica disponível que justificasse a inferência de que o potencial de corte (V), isto é, a diferença de potencial necessária para interromper completamente a emissão fotoelétrica sob a influência de uma luz monocromática,

variava linearmente com a frequência (ν) da luz; ou que a constante de Planck (h), para a qual seu autor já havia atribuído um valor numérico, constituía uma conexão direta entre os problemas da radiação de corpo negro e do efeito fotoelétrico (Millikan, 1916c, 1917). Em seu entendimento:

A hipótese aparentemente foi feita unicamente porque ela fornecia uma explicação imediata para uma das observações mais notáveis trazidas à tona pelas investigações recentes naquela época [Lenard, 1902], a saber, que a energia com a qual um elétron é ejetado de um metal pela luz ultravioleta ou pelos raios X é independente da intensidade da luz, mas dependente de sua frequência. Esse fato isolado, por si só, parece demandar alguma modificação na teoria clássica ou, pelos menos, ainda não foi interpretado de forma satisfatória dentro dos termos da teoria clássica (Millikan, 1916c, p. 355).

Contudo, apesar de todas as suas discordâncias pessoais, Millikan (1916c) reconheceu o valor preditivo da equação fotoelétrica de Einstein (1905) diante das recentes observações experimentais do efeito fotoelétrico. Logo no início de seu artigo, ele assevera: “No entanto, somos confrontados por uma situação surpreendente em que esses fatos foram corretamente e precisamente previstos há nove anos por uma forma de teoria quântica que agora foi amplamente abandonada”⁹⁸ (Millikan, 1916c, p. 355).

Em retrospecto, os resultados das investigações de Millikan e de seus colaboradores no Laboratório de Física Ryerson foram interpretados como evidências confiáveis da validade da teoria quântica da radiação. No entanto, ao menos inicialmente, ele próprio não os reconheceu dessa maneira. Na visão de Millikan, seus resultados significavam apenas a corroboração da “lei do efeito fotoelétrico”, e não dos fundamentos teóricos da natureza quântica da luz, dos quais essa lei foi derivada. Essa interpretação epistemológica é explícita no início da última seção do artigo, na qual ele propõe uma discussão sobre as diferentes teorias da radiação:

Talvez ainda seja muito cedo para afirmar com absoluta confiança a validade geral e exata da equação fotoelétrica de Einstein. No entanto, é preciso reconhecer que os experimentos atuais fornecem uma justificação muito melhor para tal afirmação do que foi encontrado anteriormente. Se essa equação se mostrar de validade geral, então, deve indubitavelmente ser considerada uma das equações mais fundamentais e abrangentes na física. [...] e uma que é destinada a ter, no futuro, um papel quase tão importante quanto ao desempenhado pelas equações de Maxwell no passado” (Millikan, 1917, p. 227)], governando a transformação de toda a energia eletromagnética de comprimento de onda curto em energia térmica. No entanto, a teoria semicorpuscular pela qual Einstein chegou à sua equação parece ser totalmente insustentável no momento (Millikan, 1916c, p. 383).

⁹⁸ Robert A. Millikan estava equivocado em sua percepção de um abandono geral da teoria quântica da radiação pela comunidade científica. No entanto, é historicamente adequado afirmar que a teoria quântica da radiação estava em seu estágio inicial de desenvolvimento e, portanto, naquele momento, sua aceitação ainda era limitada, com intensas e frequentes discussões sobre seus fundamentos.

Em outras palavras, Millikan (1916c) sustenta que o teste experimental é apenas capaz de corroborar ou refutar uma “lei científica”, mas não uma “teoria científica”. Do ponto de vista da epistemologia contemporânea da ciência, não há contradição nesse tipo pensamento, pois, entre 1902 e 1914, houve pelo menos seis tentativas mais ou menos clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico fundadas na teoria clássica do eletromagnetismo e em modelos específicos para a estrutura atômica, sendo que algumas foram exitosas em derivar equações idênticas à “lei do efeito fotoelétrico”.

Portanto, a interpretação epistemológica de Millikan (1916c) não era problemática ou inconsistente, uma vez que a sólida corroboração empírica de uma “lei” não implica necessariamente a validação da “teoria” subjacente da qual essa lei foi deduzida. No entanto, deve-se ressaltar que a refutação de uma “lei” necessariamente representa uma séria dificuldade para a validação e aceitação de sua “teoria” subjacente.

Para consolidar essa interpretação e rejeição à teoria quântica da radiação, na última parte de seu artigo, Millikan (1916c) apresenta uma breve discussão sobre a denominada “teoria das cordas-de-éter”. Essa teoria havia sido inicialmente proposta pelo físico britânico J. J. Thomson, por volta de 1904, como uma tentativa clássica de interpretação do efeito fotoelétrico.

Em sua “teoria das cordas de éter”, Thomson (1904b) tentou reconciliar as novas observações experimentais, aparentemente conflitantes com a teoria clássica do eletromagnetismo, postulando a existência de uma estrutura fibrosa para o campo eletromagnético, a qual está associada à “teoria de linhas de forças” de Michael Faraday (1791-1867). Nesse modelo, “[...] cada unidade de eletricidade positiva é considerada como a origem e cada unidade de eletricidade como a extremidade final de um tubo de Faraday” (Thomson, 1904b, p. 15). Por definição, a quantidade de carga elétrica contida dentro de um ‘tubo de Faraday’ é exatamente igual à carga elétrica elementar. No que diz respeito à transmissão das ondas eletromagnéticas, “[...] a energia se propaga ao longo das linhas de força de Faraday [tubos de força], concebidas como cordas reais, que se estendem infinitamente por todo o espaço” (Millikan, 1917, p. 222). Assim, o éter luminífero – o meio hipotético de suporte para propagação da luz e que preenche todo o universo – é analogamente concebido constituído por uma teia de aranha eletromagnética infinita, cujo fios nunca se emaranham ou se quebram⁹⁹.

⁹⁹ Nota-se, portanto, que diferentemente dos dois modelos científicos de Thomson (1910 e 1913) discutidos anteriormente, a “teoria das cordas de éter” não é um modelo particular estrutura da matéria, mas sim do campo eletromagnético e, conseqüentemente, do éter luminífero.

Em seu livro *The electron, its isolation and measurement and the determination of some of its properties*, publicado no ano seguinte, ao discutir, no capítulo X, a “Natureza da energia radiante”, Millikan (1917) afirma que, entre todas as observações conflitantes com a teoria clássica do eletromagnetismo, somente propriedades de interferência luminosa ainda são inexplicáveis em termos da “teoria das cordas de éter”. Ele escreveu: “Quanto à objeção (1), ninguém ainda demonstrou que a sugestão de Thomson é reconciliável com os fatos da interferência, embora, até onde eu saiba, sua irreconciliabilidade também não tenha sido absolutamente demonstrada” (Millikan, 1917, p. 222).

Millikan argumenta que, em última análise, a teoria quântica da radiação de Einstein (1905) é simplesmente uma ampliação e uma forma particular ainda mais radical da “teoria das cordas de éter” de Thomson (1904b). Ele destacou que em ambas a energia, depois de deixar o corpo emissor, permanece localizada no espaço e, quando absorvida, é absorvida como um todo. Além disso, argumentou que as duas teorias eram, em essência, uma teoria clássica do eletromagnetismo do éter luminífero, isso porque, também em ambas, a velocidade de propagação da radiação é determinada pelas propriedades do meio (o éter luminífero), independentemente da natureza ou condição da fonte emissora (Millikan, 1916c, 1917).

De acordo com a visão de Millikan (1916c, 1917), a diferença entre as duas teorias poderia ser resumida à adição de duas hipóteses por Einstein (1905), a saber: (i) os pacotes de energia (“*quanta* de luz”) – que se presume propagarem-se ao longo das cordas de éter no modelo de Thomson (1904b) – são proporcionais à frequência (ν) da fonte emissora; e (ii) cada pacote de energia (“*quantum* de luz”) é transferido integralmente para um elétron ao ser absorvido, isto é, apenas em unidades discretas, que são todas exatamente iguais a $h\nu$.

Millikan apontou a necessidade de analisar a teoria quântica da radiação de Einstein (1905) tendo em vista as dificuldades e contradições já identificadas para a “teoria das cordas de éter” de Thomson (1904b), uma vez que ambas possuíam similaridades. Ele discutiu duas objeções principais.

A primeira se referia ao fato de que, até aquele momento, ninguém jamais conseguiu mostrar, para todas as formas de teoria das cordas de éter, que tal teoria consegue prever e explicar satisfatoriamente qualquer uma das propriedades conhecidas de interferência luminosa. A segunda diz respeito ao fato de que há evidências empíricas confiáveis contra a visão de que o éter luminífero possui uma estrutura fibrosa. Millikan (1916c, 1917) recorda que em sua famosa experiência com a gota de óleo, por um lado, a estrutura granular da eletricidade – portanto, a estrutura fibrosa do campo elétrico – é evidenciada pelas variações descontínuas na velocidade da gota de óleo quando se mantém constante a intensidade do campo elétrico

entre as placas e altera-se a quantidade de carga elétrica na gota de óleo. Mas, por outro lado, na condição inversa, isto é, mantendo-se a carga fixa e variando a intensidade do campo, nota-se a ausência de uma mudança descontínua na velocidade da gota de óleo, o que sugere a refutação do postulado de uma estrutura fibrosa do campo elétrico. Além do mais, a constatação da proporção exata entre a intensidade do campo e a força exercida sobre o elétron, mensurada indiretamente pela velocidade com que a gota de óleo é arrastada, contradiz a previsão da teoria de Thomson (1904b) de que a força elétrica é independente da diferença de potencial entre as placas do capacitor.

Portanto, na perspectiva de Millikan (1916c, 1917), diante da insustentabilidade da “teoria das cordas de éter” de Thomson (1904b) e, conseqüentemente, da teoria quântica de Einstein (1905), a qual era considerada somente uma forma particular da primeira, o problema podia ser resumido da seguinte forma:

Apesar do aparente sucesso completo da equação [fotoelétrica] de Einstein, a teoria física para a qual ela foi projetada para ser a expressão simbólica é considerada tão insustentável que o próprio Einstein, acredito, já não a defende mais. Estamos na posição de ter construído uma estrutura muito perfeita para, em seguida, derrubar totalmente a base sem causar a queda de todo edifício. A equação está completa e aparentemente bem testada, mas sem nenhum meio visível de suporte. Obviamente, esses suportes devem existir, e o problema mais fascinante da física moderna é encontrá-los. A experiência superou a teoria ou, melhor, *a experiência guiada por teorias errôneas* descobriu relações que parecem ser do maior interesse e importância, mas as razões para essas relações ainda não são totalmente compreendidas (Millikan, 1917, p. 230, grifo nosso).

Mas de que outra forma essa equação poderia ser obtida? (Millikan, 1916c, p. 384).

Millikan (1916c) apontou que quaisquer tentativas de solução para o problema necessariamente deviam levar em consideração um fato científico em relação ao fenômeno da emissão fotoelétrica, independentemente da teoria adotada, a saber: os elétrons emitidos da superfície metálica irradiada devem absorver, em algum instante, pelo menos a quantidade de energia $h\nu$ da radiação eletromagnética incidente de frequência (ν); e essa relação energética é correta e precisamente descrita pela equação fotoelétrica de Einstein (1905).

Mas isso, por si só, constituía uma séria dificuldade para as teorias concorrentes fundadas na teoria clássica do eletromagnetismo, especialmente quanto à estimativa do tempo da emissão fotoelétrica, conforme exemplificado pelo seguinte raciocínio:

A energia total recebida (por segundo) de uma vela-padrão em 1 cm^2 a uma distância de 3 m é de 1 erg [100 nJ]. Portanto, a quantidade de energia recebida (por segundo) por um corpo do tamanho de um átomo [...] é aproximadamente $1,0 \cdot 10^{-15}\text{ ergs}$. Mas, a energia $h\nu$ com que o elétron é emitido por uma luz de comprimento de onda de 500

nm é igual a $4,0 \cdot 10^{-12} \text{ ergs}$, ou seja, 4000 vezes maior. Dado que menos de um terço dessa energia luminosa está disponível para comprimentos de ondas menores do que 500 nm, uma célula fotoelétrica sensível até 500 nm [superfície de sódio ou lítio] deveria requerer pelos 12.000 segundos, ou seja, cerca de quatro horas de iluminação por uma vela-padrão a 3 m de distância, antes que qualquer um de seus átomos pudesse absorver energia suficiente para liberar um elétron. No entanto, observa-se que o elétron é emitido instantaneamente quando a célula fotoelétrica é iluminada (Millikan, 1916c, p. 385).

Em outras palavras, se por um lado a teoria semi-corpuscular e de energia localizada de Thomson-Einstein enfrentava objeções, mas descrevia corretamente as relações energéticas para as emissões fotoelétricas, por outro, a teoria clássica do eletromagnetismo, amplamente aceita pela comunidade científica, não se mostrava bem-sucedida em suas previsões em relação aos fenômenos de emissão e absorção de luz.

Millikan (1916c, 1917) argumentou que, mesmo no caso de um abandono da teoria semi-corpuscular de Thomson-Einstein, uma vez que ela atribui todo o peso da contabilidade dos novos fatos à natureza desconhecida do éter luminífero e faz suposições radicais sobre uma suposta estrutura fibrosa do campo eletromagnético, ainda assim alguns postulados deveriam ser assumidos, tendo em vista os fatos experimentais das emissões fotoelétricas, a saber:

- (i) os elétrons emitidos já possuem, dentro do interior dos átomos, uma energia quase igual a $h\nu$, isto é, que em algum momento anterior, os elétrons absorveram e armazenaram energia suficiente, de alguma fonte de luz, fazendo com que precisasse apenas de um instante adicional no momento do experimento para ser ejetado do átomo com a energia $h\nu$;
- (ii) dentro dos átomos existe um mecanismo desconhecido que permite a um elétron absorver e armazenar continuamente em si mesmo a energia eletromagnética de uma dada luz de frequência (ν), até que um valor pelos menos tão grande quanto $h\nu$ seja alcançado;
- (iii) existem elétrons com todos os tipos de frequências naturais dentro do corpo absorvedor, e esses elétrons estão sempre em todos os estágios de armazenamento energético, até o valor $h\nu$;
- (iv) os elétrons absorvedores, exclusivamente durante o processo de absorção, nada irradiam até que certo valor crítico de energia armazenada seja atingido, quando ocorre uma emissão explosiva;

- (v) na maioria das substâncias existe uma grande parcela de elétrons que possui frequências naturais somente de um ou dois valores particulares, e as ondas características que essas substâncias emitem são exatamente dessas frequências.

Em síntese, Millikan (1916c, 1917) descreve uma interpretação para o fenômeno da emissão fotoelétrica, sob a influência de luz monocromática de frequência (ν), com base na suposição de uma propriedade peculiar e desconhecida do interior da estrutura atômica que permite aos elétrons absorverem continuamente energia luminosa até valor crítico $h\nu$. Ou seja, nessa perspectiva – em oposição à teoria semi-corpúscular de Thomson-Einstein –, os cinco postulados de armazenamento de energia mantêm o conceito de éter luminífero tal qual foi concebido na teoria clássica do eletromagnetismo, atribuindo o ônus de uma explicação às condições e leis desconhecidas que devem existir dentro da estrutura atômica, as quais estão relacionadas com as propriedades da emissão fotoelétrica, ou com a própria natureza do elétron.

Na visão de Millikan (1916c, 1917), tal suposição de uma emissão fotoelétrica explosiva era consistente com as características observadas nos experimentos do efeito fotoelétrico, que pareciam corroborar a hipótese de que a emissão de energia por um átomo é um processo descontínuo ou explosivo¹⁰⁰. Ele escreveu:

Essa segunda interpretação [de armazenamento de energia], embora muito incompleta, parece ser a única possível e já obteve alguns sucessos notáveis, como no caso do átomo de Bohr. No entanto, a teoria está lamentavelmente incompleta e nebulosa. Tudo o que podemos dizer agora é que parecemos ser impulsionados por relações recém-descobertas no campo da radiação, seja para a teoria semi-corpúscular de Thomson-Einstein, seja para uma teoria que é igualmente subversiva da ordem estabelecida das coisas na Física. Pois qualquer uma dessas alternativas nos leva a uma teoria quântica da radiação muito revolucionária (Millikan, 1917, p. 237-238).

Millikan (1916c, 1917) ainda menciona que as tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico propostas, respectivamente, por Planck (1912) e por Debye e Sommerfeld (1913) fracassaram em fornecer uma base física para “lei do efeito fotoelétrico”. Contudo, propôs uma modificação na teoria da radiação de corpo negro de Planck (1912) de tal forma que a problemática possibilidade de um elétron ser emitido com energia cinética maior que $h\nu$ é eliminada.

¹⁰⁰ Millikan (1916c, 1917) afirma que a teoria da radiação de corpo negro de Planck (1901) pressupõe um processo contínuo de absorção de energia, mas admite uma emissão de energia explosiva; enquanto a teoria corpúscular de Thomson-Einstein considera tanto a absorção quanto a emissão como repentinas ou explosivas.

Ele sugeriu que, embora seja um fato estabelecido que em dada substância a maioria dos elétrons possuem apenas uma ou duas frequências particulares, é plausível assumir que existam alguns poucos elétrons oscilando em qualquer frequência possível, o quais estão misturados com esse número enormemente maior de elétrons que oscilam naturalmente na frequência característica da substância em questão. Assim, quando a radiação de uma frequência particular (ν_I) incide sobre tal substância, os elétrons que naturalmente oscilam na frequência (ν_I) “podem ser assumidos como absorvedores das ondas incidentes até que o seu conteúdo energético atinja um valor crítico, momento em que ocorre uma explosão e um corpúsculo é disparado com uma energia $h\nu$ ” (Millikan, 1916c, p. 387).

Millikan (1916c) finaliza seu artigo afirmando que essa modificação visava reconciliar a teoria da radiação do corpo negro de Planck (1912) com os fatos experimentais apresentados sobre o efeito fotoelétrico e desejando que, em breve, tal teoria se mostrasse conciliável com os fatos experimentais conhecidos da radiação do corpo negro. Por fim, agradece ao Sr. Wilmer H. Souder pela assistência nas investigações.

Em 1931, em um evento no Instituto de Tecnologia da Califórnia (“*Caltech*”), Albert Einstein, em seu discurso, após alguns agradecimentos aos trabalhos dos cientistas presentes envolvidos com desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral”, declarou que os resultados das pesquisas de Millikan (e seus colaboradores) sobre o efeito fotoelétrico forneceram apoio robusto para a validação de sua teoria quântica da radiação:

Igualmente, no domínio da teoria quântica, sou grato a vocês pela importante assistência devido às suas investigações experimentais fundamentais. Reconheço com gratidão as pesquisas de Millikan sobre o efeito fotoelétrico, que primeiramente corroboraram, de forma conclusiva, que a emissão de elétrons de corpos sólidos sob a influência da luz está associada a um período definido de vibração [frequência] da própria luz, um resultado da teoria quântica especialmente característico para a estrutura corpuscular da radiação (Einstein, 1931, p. 378).

Como discutido anteriormente, a interpretação epistemológica e o valor atribuídos por Einstein (1931) às pesquisas sobre o efeito fotoelétrico realizadas no Laboratório de Física Ryerson diferem completamente da visão apresentada por Millikan (1916c).

Em maio de 1924, dez anos depois do início de seus testes experimentais sobre o efeito fotoelétrico no citado laboratório, ao proferir sua *Nobel Lecture* por ocasião do recebimento do Prêmio Nobel de Física, Millikan afirmou estar convencido da existência real dos “*quanta* de luz”, acrescentando que uma solução definitiva para a controvérsia científica em relação à validação da teoria quântica da radiação estava bem próxima a partir das pesquisas sobre o “efeito Compton”:

Diante de todos esses métodos e experimentos, a validade geral da equação de Einstein, creio eu, é agora universalmente reconhecida, e, nesse sentido, *a realidade dos quanta de luz de Einstein pode ser considerada como estabelecida experimentalmente* (Millikan, 1924, p. 63, grifo nosso).

No último ano, no entanto, um jovem físico americano, Arthur H. Compton, da Universidade de Chicago, utilizando a concepção de *quanta* de luz localizados, trouxe à tona outro novo fenômeno que, pelo menos, demonstra a fecundidade da hipótese de Einstein. Compton vai um passo além de Einstein ao assumir não apenas a existência de *quanta* de luz, mas também que no impacto entre um *quantum* de luz e um elétron livre, as leis da conservação de energia e da conservação do momento linear se aplicam. Essa suposição permite a ele calcular exatamente quanto a frequência das ondas do éter, que colidiram com elétrons livres, será reduzida devido à energia que elas cederam ao elétron no ato da colisão e, portanto, sua própria perda de energia $h\nu$ experimentada. Ele então verifica experimentalmente que a redução na frequência quando raios X monocromáticos de molibdênio são dispersos pelo carbono é aproximadamente igual ao valor calculado. Além disso, Ross, na Universidade Stanford, confirmou esse resultado pelo método fotográfico (Millikan, 1924, p. 64).

Além disso, a magnitude do deslocamento foi aqui mensurável com uma precisão de cerca de 1%, e concordou dentro desse limite estreito com o previsto pelas equações de Compton. [...] Pode-se afirmar, sem hesitação, que não é apenas a equação [fotoelétrica] de Einstein que está tendo um sucesso extraordinário no momento, mas também a concepção de Einstein [teoria quântica da luz] (Millikan, 1924, p. 65).

No entanto, ao mesmo tempo, de forma ambígua, Millikan ainda se mostrou relutante e cético em relação à aceitação da teoria quântica da radiação em alguns trechos de sua *Nobel Lecture*:

Se o mecanismo de interação entre as ondas do éter e os elétrons têm sua base nas condições e leis desconhecidas existentes dentro do átomo, ou se deve ser procurado principalmente na concepção essencialmente corpuscular de Thomson-Planck-Einstein quanto à natureza da energia radiante, é a incerteza absorvente nos limites da Física Moderna (Millikan, 1924, p. 63-64).

Mas até que possa dar conta dos fatos de interferência e dos outros efeitos que até agora pareceram ser irreconciliáveis com ele, devemos reter nosso pleno assentimento. Possivelmente, os recentes passos dados por Duane, Compton, Epstein e Ehrenfest podem, no final das contas, dar frutos ao trazer até mesmo a interferência sob o controle dos fótons de luz localizados. Mas, até o momento, o caminho está obscuro (Millikan, 1924, p. 65).

Millikan reiterou convicções sobre a importância e o significado epistemológico de seu trabalho experimental sobre o efeito fotoelétrico na segunda edição do seu livro *O elétron*: “Até este ponto, todo este capítulo [que incluiu a seção sobre a testagem da equação de Einstein], foi deixado praticamente como foi escrito para a primeira edição deste livro em 1916” (Millikan, 1924, p. 244). O mesmo capítulo X – “Natureza da energia radiante” – permaneceu amplamente inalterado em seu novo livro intitulado *Elétron (+ ou -), prótons, fótons, nêutrons e raios cósmicos*, publicado em 1935, considerado por ele próprio uma terceira edição de *O elétron*, publicado originalmente em 1917 (Millikan, 1935).

No final da década de 1930, mesmo após o estabelecimento das teorias de Mecânica Quântica de Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg, outros pesquisadores melhoraram ainda mais a precisão das medidas a respeito das emissões fotoelétricas, muito deles preservando o design básico do experimento de Robert A. Millikan (Lukirsky; Priležev, 1928; Olpin, 1930). Nenhum contradição com a “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein (1905) foi encontrada. Os demais eventos futuros mostraram que as objeções e o ceticismo de Millikan (e de muitos outros cientistas) em relação à validação e aceitação da teoria quântica da radiação não se confirmaram. Esses fatos, aparentemente, o fez tentar reescrever a própria história a seu favor.

Em 1950, Robert A. Millikan publicou sua “*Autobiografia*” e incluiu o capítulo 9, intitulado “A prova experimental da existência do fóton”. Nele, o cientista afirmou que foi em abril de 1915, no encontro da Sociedade Americana de Física, em Washington, em colaboração com seu assistente, dr. Wilmer H. Souder, que apresentou pela primeira vez a “[...] completa verificação da validade da equação [fotoelétrica] de Einstein” (Millikan, 1950, p. 101), acrescentando:

Isso me pareceu, como também a muitos outros, uma questão de grande importância, pois tornava, o que chamarei de abordagem explosiva ou de gatilho de Planck (1912) ao problema dos *quanta*, completamente insustentável e simplesmente provava de maneira simples e irrefutável, pensei eu, que o elétron emitido, que escapa com a energia $h\nu$, recebe essa energia pela transferência direta de unidades de energia $h\nu$ da luz e, portanto, *difícilmente permite qualquer outra interpretação além daquela que Einstein havia sugerido originalmente, ou seja, a teoria semicorpuscular ou de fóton da luz em si* (Millikan, 1950, p. 101-102, grifo nosso).

O trecho citado revela que Millikan (1950) intencionalmente havia “esquecido” seu longo período de rejeição em relação aos fundamentos da teoria quântica da radiação de Einstein, creditando a ele próprio uma realização que nem ele nem a comunidade de físicos reconheceram na época¹⁰¹. “No final, Millikan reimaginou a complexa história pessoal de seu magnífico experimento para se adequar à história simples contada em tantos de nossos livros didáticos de física” (Holton, 1999, p. 236).

Portanto, se os próprios cientistas, algumas vezes, aqui e ali, revisitam a história tentando mudar os fatos quando estes não se encaixam perfeitamente em sua narrativa

¹⁰¹ Stuewer (2000) afirma que, em 1950, Robert A. Millikan já acumulava certa experiência em revisar a história de acordo com seus próprios objetivos. O autor mostra que no livro didático de Millikan e Gale (1906, p. 482), intitulado *Um primeiro curso em Física (A first course in Physics)*, em inglês, a fotografia do físico britânico Joseph J. Thomson, datada de 1899, na qual ele está sentado em uma pose de estudo na cadeira anteriormente usada por James C. Maxwell, foi deliberadamente alterada em relação à original – o cigarro na mão esquerda foi apagado – com o objetivo de que os jovens estudantes americanos de física considerassem J. J. Thomson um modelo a ser seguido, tanto como um físico experimental quanto em outros aspectos da vida pessoal.

idealizada dos acontecimentos, não é de se admirar a constatação de narrativas pseudo-históricas em muitos livros de física moderna sobre o efeito fotoelétrico.

A importância das investigações de Robert Millikan para a História da Física é inegável. Os resultados obtidos em sua “*Determinação fotoelétrica da constante de Planck (h)*”, conduzida entre 1914 e 1916, não apenas concordavam com a “lei do efeito fotoelétrico” e a teoria quântica da radiação de Einstein (1905), mas, ao mesmo tempo, também representaram um desafio significativo tanto para a teoria clássica do eletromagnetismo quanto para outras propostas alternativas de interpretação do efeito fotoelétrico fundamentadas em modelos clássicos. O crescente insucesso dessas alternativas tornou a teoria quântica da radiação cada vez mais plausível, restando-a como única explicação satisfatória para os fatos experimentais estabelecidos disponíveis na época.

2.2.7 1917 – 1927: O Efeito Compton e a Aceitação da Teoria Quântica da Luz

A interpretação epistemológica de Millikan (1916c) foi compartilhada por vários outros cientistas, e as discussões sobre a natureza e a realidade dos “*quanta* de luz” ainda permaneceram por um certo tempo. Esses cientistas mantiveram o firme posicionamento de que os recentes resultados empíricos significavam um apoio exclusivamente à comprovação da “lei do efeito fotoelétrico” e não à teoria quântica da radiação. De fato, no início da década de 1920, somente alguns poucos físicos notáveis haviam aceitado a ideia revolucionária de “*quantum* de luz” de Albert Einstein, enquanto a maioria permanecia incerta ou oposta (Stuewer, 1975; Wheaton, 1983; Kragh, 1992; Friedman, 2022).

Com efeito, a rejeição às teorias de Albert Einstein não se restringia não apenas a avaliação do mérito científico de suas teorias – embora esse fosse o critério mais relevante – mas abrangiam questões associadas ao contexto histórico, sociocultural, político e ideológico da Europa no início do século XX.

De acordo com Friedman (2022), em seu trabalho intitulado “O 100º Aniversário do Prêmio Nobel de Einstein: fatos e mitos”, a alegação de que Einstein foi laureado com o Prêmio Nobel por sua **teoria** do efeito fotoelétrico (ou seja, a teoria quântica da radiação) e a atribuição da ausência em sua citação de uma referência explícita à Teoria da Relatividade a um erro infeliz na avaliação dos membros do Comitê Nobel de Física – em especial, do oftalmologista sueco Allvar Gullstrand (1862 – 1930) e do químico sueco Svante August Arrhenius (1859 –

1927) – constitui um exemplo de narrativa pseudo-histórica que transmite um entendimento incompatível com os registros históricos, com uma simplificação excessiva de um acontecimento muito mais complexo e problemático.

Friedman (2022) mostra que foi somente após o físico sueco Carl Wilhelm Ossen (1879 – 1944) integrar-se ao comitê em 1922 e formular precisamente a citação “por seus serviços à Física Teórica, e especialmente pela sua descoberta da **lei** do efeito fotoelétrico” (grifo nosso), mantendo-se um silêncio deliberado a respeito da teoria quântica da luz e da Teoria da Relatividade Geral, que o comitê começou a considerar seriamente a indicação e proposição do Prêmio Nobel de Física de 1921 (que estava pendente) a Albert Einstein. O autor afirma que o mesmo ocorreu para a indicação e proposição do Prêmio Nobel de Física de 1922 para Niels Bohr, com a cuidadosa citação “por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação emanando deles”.

Esses elementos históricos revelam, em primeiro lugar, a compreensão perspicaz de Carl W. Ossen dos desafios enfrentados por qualquer esforço naquela época para conceder um Prêmio Nobel tanto a Albert Einstein quanto a Niels Bohr. Além disso, em segundo lugar, reforçam o entendimento de que, no início da década de 1920, por um lado, a controvérsia científica sobre a validade da equação fotoelétrica de Einstein (1905) já havia sido encerrada por completo, mas, por outro lado, ainda persistiam debates e discussões no que diz respeito à aceitação da teoria quântica da radiação e da existência experimental dos “*quanta de luz*”, assim como uma rejeição mais enfática em relação às teorias da relatividade restrita e geral¹⁰².

Do ponto de vista estritamente científico, a rejeição da comunidade científica à teoria quântica da radiação se deve, sobretudo, às enormes dificuldades de qualquer teoria corpuscular da radiação em explicar as propriedades de interferência e difração luminosa. Segundo Wheaton (1983), por quase uma década após a teoria quântica do átomo de Niels Bohr em 1913, a maioria dos físicos e matemáticos mostrou pouco interesse nos paradoxos que complicavam uma interpretação eletromecânica consistente da radiação livre. Além desses fatores, deve-se levar

¹⁰² Friedman (2022) analisa diversos documentos oficiais do Comitê Nobel de Física e as trocas de cartas entre seus respectivos membros em relação às três avaliações e indicações de Prêmio Nobel a Albert Einstein, nos anos de 1920, 1921 e 1922. O estudo revela que os posicionamentos de Svante Arrhenius (em 1920) e de Allvar Gullstrand (em 1921 e 1922) são, em contraposição a uma avaliação objetiva e imparcial do valor dos trabalhos de Einstein para a ciência, na verdade, carregados de vieses preconceituosos antissemitas e aos físicos teóricos em geral. As justificativas apresentadas nos relatórios avaliativos dos dois membros do comitê indicam a incorporação de argumentos da oposição politicamente e racialmente motivada dos físicos experimentais ultranacionalistas alemães Ernst Gehrcke, Philipp Lenard e Johannes Stark (“Física Alemã”) às teorias de Einstein, especialmente sobre a Teoria da Relatividade Geral. O autor mostra que, após a votação na qual a proposição do prêmio a Einstein foi aprovada, “(...) a Academia deixou claro que a relatividade não deveria ser mencionada no diploma Nobel nem em qualquer outra documentação oficial” (Friedman, 2022, p. 7, cf. Ossen to Arrhenius, 20 nov 1922, Arrhenius Papers).

em consideração a difícil aceitação da possibilidade de voltar à velha e ultrapassada forma de teoria corpuscular da luz para encontrar uma explicação satisfatória para os novos fatos sobre a emissão fotoelétrica – uma teoria que foi defendida por Isaac Newton (1643 – 1727) no início do século XVIII e refutada ao longo do século XIX pela teoria clássica do eletromagnetismo.

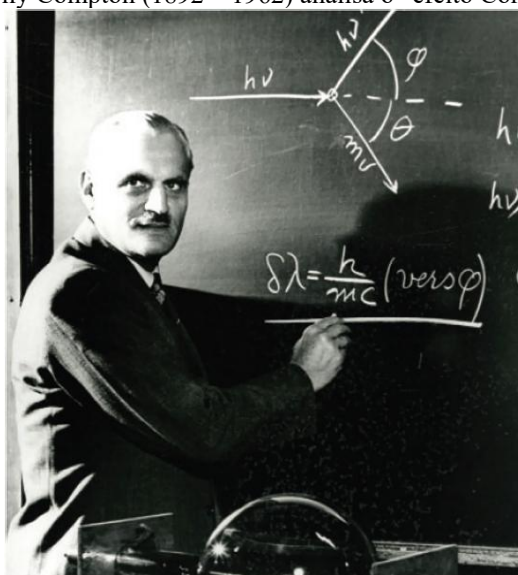
Conforme antecipado por Millikan (1924), em sua *Nobel Lecture*, o ponto de virada para aceitação geral da teoria quântica da radiação são os resultados das investigações experimentais do físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892 – 1962) a respeito do fenômeno designado nos dias de hoje de “efeito Compton”.

Nos experimentos foi investigado como a radiação de alta frequência interagem com a matéria, sendo o fenômeno interpretado com base em um modelo de colisão frontal entre um “quantum de luz” e um elétron. O “efeito Compton” consiste na diminuição da energia (aumento do comprimento de onda) de um feixe de raios X (ou raios γ) após incidir e ser espalhado por alvos de alumínio, cuja dependência em relação ao ângulo de espalhamento (θ) é dada pela seguinte expressão (Equação 29):

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) = \left(\frac{2h}{m_e c} \right) \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (29)$$

em que λ' é o comprimento de onda do feixe de radiação espalhado em um ângulo θ , λ_0 é o comprimento de onda do feixe de radiação incidente, m_e é a massa do elétron, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz.

Figura 25 - Arthur Holly Compton (1892 – 1962) analisa o “efeito Compton” em sala de aula.



Fonte: Courtesy of the Washington University Photographic Services Collection, Julian Edison Department of Special Collections, Washington University Libraries.

No entanto, a derivação da Equação 29 por Compton não foi um processo simples, linear ou trivial. Pelo contrário, resultou de um longo programa de pesquisa, marcado por muitos fracassos, idas e vindas, identificação de limitações, questionamento de suas suposições iniciais, passagem por diferentes fases e desenvolvimento de novas conjecturas até alcançar a bem-sucedida formulação quântica para o fenômeno estudado. Os principais problemas intrínsecos eram explicar por que os raios X e gama (γ) espalhados possuíam frequência menor do que os raios incidentes – o que implicava em um coeficiente de absorção acentuadamente menor do que o previsto pela teoria de espalhamento de J. J. Thomson prevalente na época – e entender a razão de a intensidade da radiação espalhada ser muito mais forte na direção para frente do que para trás (a chamada “assimetria frente-trás da intensidade”) (Stuewer, 1975; Studart; Moreira, 2024).

Stuewer (1975), Jenkin (2002), Silva (2009), Silva e Freire-Jr (2011, 2014) e Studart e Moreira (2024) mostram que, de 1916 a 1922, o foco e a confiança do físico norte-americano estava no emprego dos fundamentos da eletrodinâmica clássica para analisar e explicar o espalhamento da radiação de alta frequência pela matéria. Inicialmente, sugerindo que os elétrons espalhados eram grandes esferas (“modelo do grande elétron”), depois cascas esféricas flexíveis e, finalmente, anéis flexíveis, o que lhe permitiu explicar quantitativamente a absorção dos raios X e gama (γ), porém não completamente.

Em seguida, após alguns testes experimentais no Laboratório Cavendish sobre absorção e espalhamento de raios gama (γ), numa última tentativa clássica de interpretação do fenômeno, Compton sugeriu que a discrepância observada entre o comprimento de onda da radiação espalhada e o da incidente resultava da presença de uma nova forma de radiação “fluorescente”, que constituía a maior da parte da radiação secundária, a qual seria excitada à medida que o feixe incidente atravessasse a substância, fazendo com que os elétrons fossem ejetados para frente à velocidade da luz. Consequentemente, esse elétrons emitiriam radiação com um comprimento de onda maior do que o comprimento de onda da radiação incidente, devido ao efeito Doppler (Stuewer; 1975; Silva, 2009). Portanto, a linha inicial de investigação do programa de pesquisa liderado por Compton não era propriamente o desenvolvimento da teoria quântica da radiação, mas o estudo comparativo dos espectros dos raios X e γ primários e secundários, esses últimos resultantes das propriedades de espalhamento e reflexão interna em alvos de alumínio e grafite.

Por volta de 1921, Compton passou a adotar algumas abordagens semi-clássicas na tentativa de solucionar os desafios relacionados ao espalhamento da radiação de alta frequência pela matéria. Essa mudança de postura ocorreu após observar que a mesma “assimetria frente-

trás da intensidade” também estava presente nos elétrons ejetados durante o processo de espalhamento. Nessa abordagem semi-clássica, Compton reservou o tratamento quântico para a descrição da interação entre a os raios X e a matéria. Ele aplicou a hipótese dos “*quanta de luz*” – que antes havia rejeitado – para calcular a energia cinética desses elétrons, supondo que eles primeiro absorviam o momento linear do “*quantum de luz*” e então re-radiavam outro “*quantum de luz*” em uma direção definida (Stuart; Moreira, 2024).

Contudo, nessa abordagem semi-clássica, Compton tratou os raios X como um tipo de onda eletromagnética, conforme descrito pela teoria clássica do eletromagnetismo, seguindo os resultados estabelecidos por Max von Laue (1879 – 1960) e Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868 – 1951), que haviam demonstrado a natureza ondulatória-eletromagnética dos raios X por meio do estudo da difração desses raios em cristais. (Stuewer; 1975; Jenkin, 2002; Silva, 2009).

Entre outubro de 1922, Compton informou, no relatório apresentado ao Conselho Nacional de Pesquisa do EUA¹⁰³, que o elétron é espalhado com velocidade $v = hv/mc$ e irradia um raio X secundário com frequência deslocada devido ao Efeito Doppler. Entretanto, Compton reconheceu a incapacidade da teoria de espalhamento de J. J. Thomson de explicar satisfatoriamente os resultados recentes e finalmente abandonou a interpretação clássica em favor de uma interpretação puramente quântica. De acordo com o estudo historiográfico de John Jenkin (2002), essa mudança radical de postura, ocorreu muito em virtude da ajuda material e do esforço persuasivo de seu colega de departamento e professor-assistente George Eric Macdonnell Jauncey (1888-1947), na Universidade de Washington em St. Louis, Missouri.

Em sua interpretação quântica do fenômeno, Compton concebeu, por analogia, o espalhamento dos raios X pelo alvo de alumínio como uma colisão frontal entre duas bolas de bilhar, onde ocorreria uma colisão entre um “*quantum de luz*” e um elétron livre. Nessa situação, o momento linear (p) e a energia total (E) do sistema devem ser conservados. Usando expressões propostas por Einstein, um “*quantum de raios X*” incidente de comprimento de onda inicial (λ_0) deve transferir parte de seu momento linear ($p_0 = h/\lambda_0$) e de sua energia radiante ($E_0 = hv_0$) para o elétron durante a colisão, resultando em sua própria perda de energia radiante, de

¹⁰³ Em 1922, havia intensa controvérsia na comunidade de físicos dos Estados Unidos em torno dos resultados do experimento de Compton, relacionado ao espectro de raios-X espalhados e ao aumento do comprimento de onda desse raios. Essa polêmica ficou conhecida como controvérsia Duane-Compton. Isso porque, para investigar o tema, o Conselho Nacional de Pesquisa dos EUA formou um comitê liderado por William Duane, professor de Biofísica em Harvard, que discordou das conclusões de Compton, alegando falta de evidências conclusivas. Apesar dessa oposição, o relatório final, elaborado por Compton, foi publicado, marcando um ponto importante no debate sobre a natureza da radiação (Stuart; Moreira, 2024). (cf. COMPTON, Arthur Holly. **Scientific Papers of Arthur Holly Compton: X-Ray and Other Studies**, editado por R. S. Shankland. University of Chicago Press: Chicago, 1973).

magnitude $\Delta E = h\nu$, o que implica em um correspondente aumento no comprimento de onda da radiação incidente, obtendo-se um feixe de raios X secundário com um comprimento de onda secundário (λ'). Além disso, pela lei de conservação do momento linear, o momento de recuo do elétron será igual à diferença entre os momentos do “quantum de raios X” incidente e espalhado (cf.

Figura 26 [Fig. 1A e Fig. 1B]). Com base nessa análise Compton calculou a diferença entre os comprimentos de onda da radiação espalhada e da radiação incidente.

No entanto, essa explicação se tornou razoavelmente complicada, porque o elétron espalhado adquiriria uma velocidade extremamente alta após o impacto, levando Compton a considerar expressões relativísticas para o momento linear do elétron¹⁰⁴. Como resultado final, ele obteve a Equação 29, conhecida como a “lei do efeito Compton”, que prediz um acréscimo no comprimento de onda devido ao espalhamento da radiação incidente na matéria.

Figura 26 - Diagrama vetorial de Compton para a interação do “quantum de luz” com o elétron. Um “quantum de raio-X” é desviado por um ângulo θ por um elétron (quase em repouso), que por sua vez se recua em um ângulo β , levando uma parte da energia do fóton.

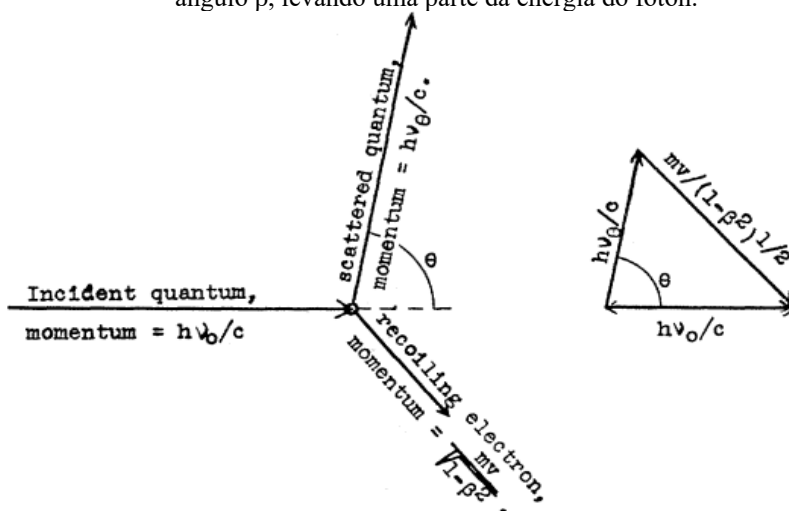


Fig. 1 A

Fig. 1 B

Fonte: Compton (1923, p. 486; 1928c, p. 83)

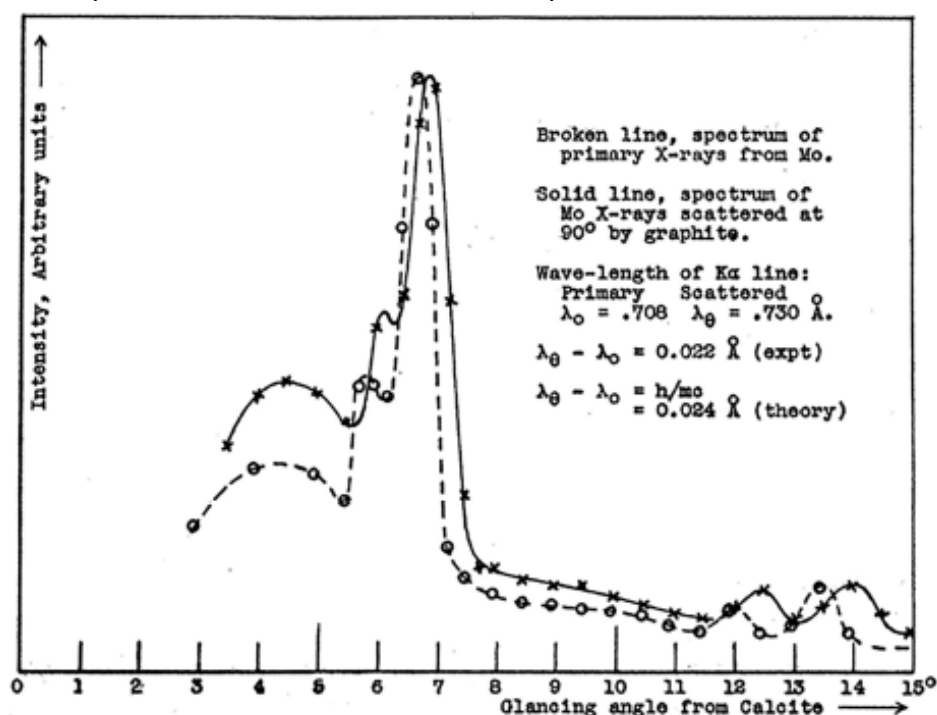
Compton, então, conduziu novos testes experimentais usando um espectrômetro de Bragg e reanalisou os diversos dados empíricos disponíveis coletados nos últimos cinco anos. Na comparação entre o espectro dos raios X espalhados por grafite em ângulos retos e o espectro dos raios X primários quando o grafite era atravessado pelos raios X provenientes de um alvo de molibdênio, observou-se que o aumento no comprimento de onda quando feixes de raios X

¹⁰⁴ A ideia de considerar o espalhamento de raios-X como bolas de bilhar relativísticas foi sugerida também, e independentemente, por Peter Debye (Studart; Moreira, 2024).

é aproximadamente igual ao valor teórico calculado, com um erro de cerca de 1,0% (Millikan, 1924). A Figura 27 mostra o espectro dos raios X espalhados em ângulos retos com o feixe primário. A linha contínua representa o espectro dos raios X espalhados, que pode ser comparado ao dos raios X primários (linha tracejada). Nota-se claramente que o comprimento de onda dos raios espalhados é maior do que o dos raios primários que os originaram.

Segundo Compton, o fenômeno de interferência dos raios X, como demonstrado por Max von Laue e Arnold Sommerfeld, ainda não era totalmente compreensível quando interpretado com base na teoria quântica da radiação. No entanto, ele tentou explicá-lo sugerindo que, nessa situação, os elétrons estariam fortemente ligados ao átomo e, portanto, não recuariam. Assim, o “*quantum* de luz” poderia se dispersar por um grande número de elétrons, distribuindo sua energia e momento entre eles. Entretanto, Compton afirmou que “o problema do espalhamento está tão interligado com aqueles da reflexão e da interferência que um estudo do problema poderia possivelmente lançar alguma luz sobre a difícil questão da relação entre a interferência e a teoria quântica” (Compton, 1923, p. 502).

Figura 27 - Espectro dos raios-X do molibdênio (Mo) após serem espalhados pelo grafite, em comparação ao espectro dos raios-X primários. Note o aumento no comprimento de onda, cujos valores obtidos experimentalmente são confrontados com os previstos teoricamente.



Fonte: Compton (1923, p. 495)

De fato, os trabalhos de Compton evidenciam o profundo dilema enfrentado pelos físicos da época sobre a natureza da radiação. Em dezembro de 1922, ele enviou ao *Philosophical Magazine* um artigo no qual analisava a reflexão interna total de raios X em

espelhos de vidro e prata, um fenômeno característico da natureza ondulatória da radiação. Notavelmente, em um intervalo de apenas uma semana, Compton apresentou evidências experimentais que corroboravam tanto a natureza ondulatória quanto a corpuscular dos raios X (Studart; Moreira, 2024).

O Prêmio Nobel de Física de 1927 foi dividido igualmente entre Arthur Holly Compton, “por sua descoberta do efeito que leva seu nome”¹⁰⁵ e Charles Thomson Rees Wilson (1869 – 1959) “por seu método de tornar visíveis as trajetórias das partículas eletricamente carregadas pela condensação de vapor” (um dispositivo engenhoso denominado “câmara de nuvens”, inventado em 1911).

As investigações experimentais de Compton e sua interpretação quântica do espalhamento de raios X pela matéria desempenharam um papel crucial na aceitação geral da teoria quântica da radiação pela comunidade científica da época. No início da década de 1920, alguns físicos já consideravam que os aspectos quânticos eram relevantes apenas nos processos de emissão e absorção de luz, como demonstrado no efeito fotoelétrico, enquanto a propagação livre da radiação seguia os princípios da teoria clássica do eletromagnetismo. No entanto, o sucesso da descrição quântica do “efeito Compton”, evidenciado pela concordância entre teoria e experimento, levou um número significativo de cientistas a reconhecer o “*quantum* de luz” proposto por Einstein em 1905 como uma realidade física concreta.

Embora a maior parte dos físicos de destaque inicialmente demonstrassem entusiasmo em relação à interpretação quântica de Arthur Compton, Niels Bohr foi um dos principais cientistas a discordar. Junto com seus colaboradores, Bohr apresentou a teoria BKS (Bohr-Kramers-Slater) como alternativa à concepção de “quantum de luz”. No entanto, em 1925, Walther Bothe e Hans Geiger realizaram um experimento utilizando o método de coincidência, que permitia a detecção simultânea do elétron e do “quantum de luz”. Os resultados obtidos refutaram de forma contundente a teoria BKS, contribuindo para a consolidação da teoria quântica da radiação (Studart; Moreira, 2024).

Por fim, uma última curiosidade! Usualmente, considera-se que a palavra “fóton”, em substituição ao termo “*quantum* de luz”, tornou-se bastante popular na comunidade científica a partir do seu uso geral durante a 5ª Conferência de Solvay, realizada em outubro de 1927, em

¹⁰⁵ Passon (2022) destaca que a não premiação de Compton explicitamente pela interpretação quântica do “efeito Compton” não foi um descuido, mas sim uma intenção deliberada, observando que se trata de um caso semelhante aos de Albert Einstein (em 1922) e Niels Bohr (em 1923). De acordo com o autor, a inclusão na citação do diploma de Compton somente a palavra “descoberta” – e não “por sua descoberta e explicação do efeito que leva seu nome” – evidencia que, mesmo ainda em 1927, havia algum ceticismo em relação à teoria quântica da radiação, em particular, pelo desenvolvimento inicial da mecânica quântica (mecânica matricial) de Werner Karl Heisenberg (1901-1979) e Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887 – 1961).

Bruxelas (Bélgica), cujo principal tema de discussão foi registrado nos anais do evento como “*Elétrons e Fótons*” (Bacciagaluppi; Valentini, 2009, p. 8-22). Durante sua apresentação, Compton chamou a atenção para origem e significado do termo “fóton” como unidade de radiação, apontando que a sugestão do novo nome remetia à carta do físico-químico norte-americano Gilbert Newton Lewis (1875 – 1946), publicada na revista *Nature* em 1926:

Ao referir-me a esta entidade de radiação, adotarei a denominação “fóton”, proposta recentemente por [Gilbert Newton] Lewis. Este termo evita qualquer conotação acerca da natureza da unidade, tal como expressa, por exemplo, no termo “raio de agulha”. Em comparação com a designação “quantum de radiação” ou “quantum de luz”, esta nomenclatura apresenta as vantagens da concisão e da evitação de qualquer dependência implícita na mecânica quântica, muito mais ampla, ou na teoria quântica da estrutura atômica (Compton, 1928a, p. 57; 1928b, p. 156).

Na referida carta citada por Compton, intitulada “A Conservação dos Fótons”, Gilbert Lewis escreveu:

Parece inadequado descrever uma dessas entidades hipotéticas como uma “partícula de luz”, “corpúsculo de luz”, “quantum de luz” ou “quanta de luz”, se considerarmos que ela passa apenas uma fração ínfima de sua existência como um transportador de energia radiante. Na maior parte do tempo, permanece como um elemento estrutural crucial dentro do átomo. Além disso, chamar essa entidade simplesmente de “quantum” pode gerar confusão, já que mais tarde será necessário distinguir entre o número dessas entidades presentes em um átomo e o conceito de “número quântico”. Portanto, sugiro propor o nome “fóton” para este novo átomo hipotético, que não é luz, mas desempenha um papel essencial em cada processo de radiação (Lewis, 1926, 874-875).

Ainda em 12 de dezembro de 1927, Compton novamente utilizou o termo “fóton” em sua *Nobel Lecture* – “Raios X como um ramo da óptica” – por ocasião da entrega do Prêmio Nobel de Física daquele ano: “Aqui não consideramos os raios-X como ondas, mas sim como corpúsculos de luz, quanta, ou, como podemos chamá-los, fótons” (Compton, 1928c, p. 186).

Entretanto, o historiador dinamarquês Helge Kragh observou que o termo “fóton” foi empregado independentemente por pelos menos quatro pesquisadores diferentes antes de sua popularização por Gilbert N. Lewis (a partir 1926) e Arthur H. Compton (a partir de 1927). Segundo Kragh (2014), três das quatro propostas iniciais estavam relacionadas à fisiologia ou percepção visual, e apenas uma à física quântica. De acordo com o autor, a prioridade pertence ao físico e psicólogo norte-americano Leonard Thompson Troland (1889-1932), que cunhou a palavra em 1917¹⁰⁶.

Embora esses primeiros usos do termo “fóton” diferissem do significado conceitual atribuído por Compton como “unidade de radiação” – assim como o significado de “fóton”

¹⁰⁶ Ver Troland (1917).

atribuído por Compton difere do próprio conceito de “*quantum* de luz” Einstein –, a rápida adoção generalizada do novo termo elevou seu status, colocando o “*fót-on*” em pé de igualdade com os conceitos de “*elétr-on*” e “*prót-on*”, refletindo seu reconhecimento e aceitação mais ampla (Kragh, 2014; Passon, 2022).

3 A PESQUISA EMPÍRICA

Neste capítulo, delineiam-se os procedimentos metodológicos adotados para a realização da segunda etapa deste estudo: a pesquisa empírica. Descreve-se a organização e implementação de uma unidade de ensino – uma disciplina semestral por completo – voltada à formação crítica do uso didático da História da Ciência, especificamente em relação à história não linear do fenômeno do efeito fotoelétrico, e à construção de uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a Natureza da Ciência (NdC). Serão abordadas as etapas de desenvolvimento da pesquisa, os objetivos específicos, o contexto educacional no qual ela se insere, os instrumentos empregados na coleta de dados, assim como as razões subjacentes à escolha dos procedimentos adotados para análise e interpretação das informações.

Em resumo, objetiva-se justificar a coerência e a consistência entre as hipóteses que alicerçam os problemas da pesquisa, as perguntas e objetivos estabelecidos, e os referenciais teóricos e metodológicos.

3.1 O DELINEAMENTO DA PESQUISA EMPÍRICA

A segunda fase deste estudo adotou um delineamento de pesquisa de natureza empírica, quase experimental, com intervenção (didática) e de análise qualitativa (Campbell; Stanley, 1979; Rosa, 2013).

A abordagem empírica resulta da intenção dos pesquisadores em extrair dados fundamentais dos elementos observáveis da realidade, que constituirão a base de análise. Quanto ao caráter quase experimental, essa característica deriva das limitações no controle das variáveis que impactam a validade interna da pesquisa e regem o fenômeno sob análise. Isso se soma à ausência de grupos de controle para fins comparativos. Ademais, é pertinente considerar a presença dos professores-pesquisadores como uma forma de intervenção na realidade que se quer estudar, isto é, os processos de ensino e de aprendizagem, uma vez que não pertencem ao universo investigado. A metodologia qualitativa caracteriza-se pelo emprego de técnicas dessa natureza, privilegiando o uso de instrumentos e técnicas analíticas baseadas na interpretação e na construção de inferências a partir das informações obtidas, em determinado contexto. Isso

visa conferir significado aos elementos subjetivos do ambiente dos indivíduos participantes, os quais não podem ser quantificados pelos professores-pesquisadores (Campbell; Stanley, 1979; Rosa, 2013).

O objetivo desta pesquisa empírica é avaliar em que medida uma abordagem contextual explícita sobre diferentes aspectos históricos, filosóficos e sociológicos da NdC, relacionados com a construção de conhecimentos sobre o efeito fotoelétrico, contribui para promover perspectivas mais bem informadas a respeito da atividade científica (cf. Capítulo 1).

A abordagem foi implementada ao longo de uma disciplina de História da Ciência em um curso de graduação em Física, cuja temática principal foi a história não linear da construção do conhecimento científico acerca do fenômeno do efeito fotoelétrico no início do século XX.

Procurou-se identificar os desafios, limitações e obstáculos decorrentes da organização e implementação de tal disciplina, assim como as tarefas essenciais para superá-los. Assim, buscamos compreender de que maneira as atividades propostas pelos professores-pesquisadores podem contribuir para enriquecer a formação crítica dos futuros professores de física quanto ao uso da História da Ciência enquanto ferramenta pedagógica.

Esta pesquisa empírica, nesse contexto, se insere na linha de pesquisa História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC) no ensino de ciências, abrangendo a problematização de aspectos de NdC por meio das abordagens contextuais e explícitas e de práticas pedagógicas implementadas em ambientes de ensino e de aprendizagem para formação inicial de professores. Além disso, essa pesquisa está em consonância com os desafios contemporâneos da educação científica, visando o exercício pleno da cidadania, os quais exigem não apenas um saber *em* ciências (saber conceitual e procedimental), mas também (um saber) *sobre* ciências, preferencialmente dotado de reflexões que contemplem valores epistemológicos e valores socioculturais.

3.1.1 O Contexto Educacional da Pesquisa Empírica

Essa pesquisa empírica tem como contexto educacional a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), *campus* Bauru/SP, em um Curso de Graduação em Física, no âmbito da disciplina de História da Ciência.

O *campus* na cidade de Bauru/SP foi incorporado a Unesp em 1988 (UNESP, 2023a). Atualmente, essa localidade acadêmica é composta por três Unidades Universitárias: a

Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação (FAAC), a Faculdade de Ciências (FC) e a Faculdade de Engenharia (FE). De acordo com os dados referentes ao ano de 2022, o número de estudantes matriculados, distribuídos em 20 Cursos de Graduação, é cerca de 5.643, além de outros 1.565 em 21 Programas de Pós-Graduação, totalizando aproximadamente 7.208 estudantes. O *campus* ocupa uma área com cerca de 190 alqueires, contando com mais de 35 000 m² em edificações, que incluem salas de aula, laboratórios, observatório astronômico, biblioteca, oficinas e áreas administrativas. Situado em uma vasta região verde, o local é uma reserva ecológica permanente da cidade (UNESP, 2023b).

O Curso de Graduação em Física ofertado pela UNESP (*campus* Bauru/SP) está disponível em duas modalidades: Licenciatura em Física (desde 1969) e Bacharelado em Física. A modalidade Bacharelado em Física possui tanto a habilitação em Física de Materiais (desde 2012) quanto em Física Computacional (desde 2023). Ambas as modalidades estão associadas à Faculdade de Ciências, no Departamento de Física e Meteorologia. As aulas para modalidade Licenciatura em Física, que exige um total de 3.555 horas, são ofertadas exclusivamente durante o período noturno, enquanto o Bacharelado em Física, que requer 2.700 horas na habilitação Física de Materiais, e 2.775 horas na habilitação Física Computacional, que possui aulas tanto no período vespertino quanto noturno. As duas modalidades operam de forma conjunta e ambas possuem a duração regular de quatro anos para conclusão. Um pouco mais da metade da carga horária das disciplinas (52%) é comum às duas modalidades (UNESP, 2023a).

O perfil esperado do egresso do Curso de Graduação em Física, tanto para Licenciatura quanto para o Bacharelado, estabelece que os futuros profissionais devem possuir habilidades e competências para discutir e refletir sobre problemas inovadores e tradicionais, fundamentando-se em conhecimentos científicos sólidos e atualizados em Física. O Projeto Pedagógico também enfatiza que é essencial que esse profissional esteja constantemente preocupado e motivado a buscar novas formas de saber e práticas científicas e tecnológicas. Além disso, em todas as suas atividades, o pensamento crítico e investigativo deve estar presente, embora associado a diferentes formas e objetivos de trabalho (UNESP, 2023a).

É imprescindível realçar que o Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Física busca integrar o ensino, a pesquisa e a extensão, mantendo a integridade entre essas dimensões. Isso ocorre porque se reconhece a importância da harmonia entre essas três dimensões como um elemento essencial na formação dos futuros professores e/ou pesquisadores em Física. Em relação à Licenciatura, busca-se formar professores qualificados para a educação básica e futuros pesquisadores na área do ensino de ciências. No que se refere ao Bacharelado em Física, o projeto tem como objetivo atender à demanda por profissionais na área de Física na região

centro-oeste do estado de São Paulo. Especial ênfase é dada à Física dos Materiais, aproveitando a especialização dos professores do Departamento de Física, a maioria dos quais realiza pesquisas nessa área com forte vinculação com o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais da UNESP, com sede em Bauru. A habilitação em Física Computacional visa atender às crescentes necessidades da ciência e da tecnologia, ampliando as oportunidades de carreira para os graduados do curso (UNESP, 2023a).

A disciplina de História da Ciência encontra-se integrada à estrutura curricular do Curso de Física em conjunto com as outras disciplinas de Formação Didático-Pedagógica, especificamente inserida no Eixo 3 – Ciência, Tecnologia, Sociedade, Ambiente e Desenvolvimento Humano. Configura-se como obrigatória para a modalidade de Licenciatura, enquanto se apresenta como optativa para a modalidade de Bacharelado, com disponibilidade no 5º semestre do curso. A carga horária total atribuída à disciplina perfaz um total de 60 horas (4 créditos) (UNESP, 2023a).

Os objetivos específicos da disciplina de História da Ciência são:

- compreender a Física como uma ciência em constante processo de construção, reconhecendo as influências tanto de fatores intrínsecos ao campo científico quanto de fatores de ordem social e econômica;
- analisar os diferentes discursos de validação do conhecimento ao longo do tempo;
- realizar a transposição didática dos conteúdos abordados, de modo a desenvolver nos futuros professores as competências e habilidades previstas para diversas etapas da educação básica;
- implementar práticas de leitura e escrita na língua portuguesa, englobando a produção, análise crítica e aplicação de variados gêneros discursivos;
- abordar os fundamentos que sustentam a compreensão da ciência, da sociedade, do ser humano, da educação escolar e da figura do professor, abrangendo aspectos filosóficos, históricos, políticos, econômicos, sociológicos e antropológicos, todos pertinentes à ciência e suas interconexões com o processo de ensino e de aprendizagem no contexto da sala de aula.

Tradicionalmente, os conteúdos contemplados na disciplina História da Ciência são subdivididos em sete módulos distintos: 1. Diferentes Abordagens Historiográficas da Ciência; 2. Movimento; 3. Óptica; 4. Eletricidade e Magnetismo; 5. Termodinâmica e 6. Física Moderna.

Em geral, as estratégias pedagógicas comumente empregadas para a condução desses módulos incluem a realização de aulas expositivas-dialogadas, leitura e análise crítica de textos

clássicos e de literatura secundária, bem como a apresentação de seminários e palestras. Essas estratégias foram mantidas em planejamento organizacional da unidade de ensino, que adota uma abordagem contextual explícita sobre aspectos da NdC e da história não linear da construção do conhecimento científico, com foco no fenômeno do efeito fotoelétrico.

Essa estrutura didático-organizacional é designada como uma “*abordagem diacrônica*” da História da Ciência, “[...] entendida como o estudo do desenvolvimento ao longo do tempo de um dado assunto [ou conteúdo] restrito; uma especialidade científica, uma área de problemas ou um tema intelectual [...]. [A história diacrônica] é tipicamente a história de uma disciplina ou a história de uma subdisciplina” (Kragh, 1987, p. 80-81)^{107,108}.

É importante destacar que a abordagem diacrônica oferece aos estudantes um panorama amplo e estruturado das principais realizações científicas ao longo do tempo, o que contribui significativamente para a construção de uma linha de raciocínio histórico. No entanto, alguns estudiosos da história da ciência apontam limitações que podem surgir em determinadas aplicações dessa abordagem. Devido à diversidade e à extensão dos conteúdos, há o risco de que a narrativa histórica seja apresentada de forma linear, com simplificações inevitáveis e, por vezes, anacronismos. Além disso, as restrições de tempo frequentemente enfrentadas no ensino tornam desafiadora uma análise mais aprofundada dos múltiplos aspectos contextuais, o que pode levar a uma compreensão mais técnica e menos problematizada da física.

Contudo, a avaliação da inclusão de uma disciplina sobre a História da Ciência/Física, destinada a proporcionar um panorama geral aos estudantes, em um curso de graduação geralmente ministrada em um semestre letivo, é complexa e abrange diferentes aspectos. Destarte os riscos de simplificação, tensões entre contextualização e objetivos da disciplina, e limitações para discussões e reflexões, os historiadores reconhecem que a abordagem diacrônica pode contribuir, em alguma medida, para o entendimento de que as ideias científicas não surgem isoladamente, mas são produtos de contextos históricos, socioculturais e científico-tecnológicos.

Além disso, é importante considerar que a rotina atribulada de muitos estudantes de física, especialmente em cursos noturnos, impacta tanto a disponibilidade de tempo quanto a predisposição ativa para aprofundar questões históricas de maneira significativa. Nesse sentido, propostas que vão além do enfoque diacrônico, podem exigir ajustes no planejamento didático-

¹⁰⁷ Outra alternativa para ensinar a História da Ciência é a adotar a abordagem sincrônica. Essa abordagem será detalhada um pouco mais adiante, quando será descrita a estrutura didático-organizacional adotada na disciplina História da Ciência 2023-1.

¹⁰⁸ Todas as citações em outros idiomas neste capítulo foram traduzidas pelos autores.

organizacional, especialmente para considerar o equilíbrio entre carga de trabalho e prazos, evitando que a disciplina seja percebida como secundária ou excessivamente sobrecarregada.

3.1.2 Os Sujeitos da Pesquisa

O grupo participante foi composto inicialmente por 32 estudantes das modalidades de Licenciatura e Bacharelado do Curso de Graduação em Física da UNESP, *campus* Bauru/SP, que estavam regularmente matriculados na disciplina de História da Ciência no primeiro semestre de 2023. Esses critérios de inclusão e exclusão, bem como o local da pesquisa, foram estabelecidos considerando que o pesquisador/orientador é docente dessa disciplina na referida instituição de ensino superior e também professor do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência.

No entanto, ao longo do semestre letivo, quatro estudantes da modalidade Bacharelado optaram por desistir da disciplina, por diferentes razões pessoais. Outros quatro estudantes, embora matriculados, nunca frequentaram as aulas. Portanto, considerando apenas os estudantes que tiveram frequência acima de 75% e concluíram a disciplina, o grupo participante é composto por 23 estudantes. Sendo 8 (oito) pessoas que se identificaram do sexo feminino e 15 do sexo masculino. Desse total, 18 estavam matriculados na modalidade Licenciatura, no qual a disciplina é obrigatória. As outras 5 (cinco) pertenciam à modalidade Bacharelado, no qual a matrícula é optativa.

É importante salientar que, devido à falta de distribuição aleatória dos participantes e à não utilização de grupos de controle para fins de comparação, foi decidido abordar a totalidade da população envolvida, em vez de se restringir a uma amostra específica de participantes.

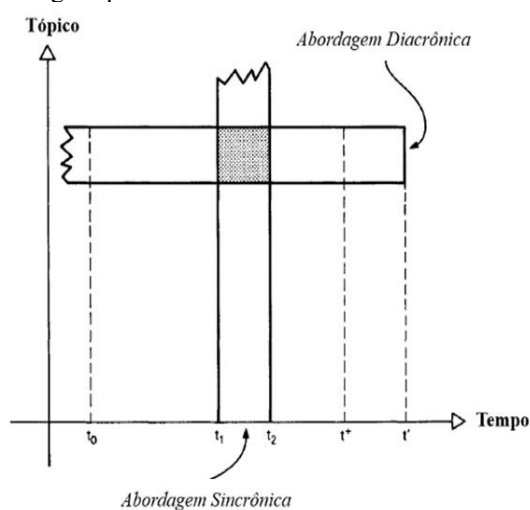
Por último, como considerações éticas, assegura-se que o projeto inicial desse estudo foi devidamente registrado na Plataforma Brasil em 26 de outubro de 2021, sob o CAAE nº 53079621.8.0000.5398, e aprovado pelo Comitê de Ética na Pesquisa (UNESP) em 5 de fevereiro de 2022. Os dados coletados serviram unicamente para fins de pesquisa empírica. Os riscos da pesquisa foram mínimos. Durante as etapas de coletas de dados, em nenhum momento a participação dos estudantes foi condicionada a qualquer tipo de benefício ou prejuízo acadêmico. A fim de evitar qualquer desconforto ou constrangimento, os participantes possuíam a prerrogativa de interromper sua participação na pesquisa a qualquer momento, sem qualquer implicação negativa em sua nota final na disciplina.

Os sujeitos participantes da pesquisa terão suas identidades preservadas ao longo deste relatório, sendo referenciados, quando necessário, pelos respectivos códigos de identificação ou por nomes fictícios.

3.1.3 A Disciplina de História da Ciência 2023-1

Seguindo a estrutura curricular do Curso de Graduação em Física, modalidade Licenciatura, a disciplina obrigatória de História da Ciência 2023-1 foi planejada e implementada em 18 encontros. A cada semana, em um único dia (terça-feira), no período noturno, quatro aulas sequenciais de 50 minutos foram ministradas, totalizando 60 horas. Contudo, essa disciplina possuía uma abordagem não convencional, uma vez que os conteúdos selecionados não foram aqueles tradicionalmente ministrados em anos anteriores. Nesse caso, optou-se por uma abordagem sincrônica da História da Ciência, “[...] entendida como uma perspectiva de natureza mais interdisciplinar, em que a ciência em foco é meramente encarada como um dos elementos na vida cultural e social do período delimitado” (Kragh, 1987, p. 81). Utilizando uma analogia, “[...] a história diacrônica é um filme de uma parte específica e estreita da ciência, enquanto a história sincrônica é um instantâneo da situação geral” (Kragh, 1987, p. 81). A Figura 28 apresenta um esquema dos dois modos de abordar a História da Ciência.

Figura 28 - Duas abordagens para ensinar a História da Ciência: diacrônica e sincrônica.



Fonte: Adaptado de Kragh (1987, p. 81).

No esquema visualizamos que a abordagem sincrônica delimita um recorte temporal para abordar uma sequência de tópicos que contribuiriam para o desenvolvimento da visão

atualmente difundida, destacada em cinza no esquema. A escolha pela abordagem sincrônica é justificada, em primeiro lugar, tendo em vista o objeto de estudo investigado na pesquisa historiográfica: a gênese e o desenvolvimento do conhecimento científico a respeito do fenômeno do efeito fotoelétrico, no período específico entre 1887 e 1927. As informações obtidas com base nesse estudo historiográfico (cf. Capítulo 2), forneceu subsídios teóricos, procedimentais e epistemológicos aos professores-pesquisadores, possibilitando um aprofundamento em discussões e reflexões explícitas sobre a influência do contexto histórico, social, político, econômico, científico e tecnológico nas investigações, as controvérsias científicas emergidas, as hipóteses rejeitadas, os problemas e obstáculos enfrentados, bem como as diferentes soluções encontradas.

Em segundo lugar, adota-se como hipótese que tal aprofundamento pode facilitar o processo de construção de uma imagem mais bem informada da atividade científica, auxiliando os estudantes a apreciarem a integração entre diferentes campos científico e a complexidade do processo de validação e aceitação de novos conhecimentos científicos, com ênfase para a influência dos diversos fatores envolvidos. Ao mesmo tempo, a abordagem sincrônica possibilita evidenciar, contrapondo-se fontes históricas primárias e livros-textos de ensino superior, diversas omissões, simplificações e distorções nas narrativas pseudo-históricas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico (Niaz *et al.* 2010; Klassen *et al.*, 2011; Soares, 2016; Lima *et al.*, 2017). Contudo, é importante destacar a preocupação dos professores-pesquisadores em oferecer um panorama geral da evolução dos conceitos físicos ao longo da história. Como preparação para discussões mais aprofundadas sobre o efeito fotoelétrico, foram organizados quatro encontros semanais, cada um dedicado ao desenvolvimento de uma das principais áreas da Física no século XIX: (a) óptica ondulatória; (b) eletromagnetismo; (c) termodinâmica; e (d) estrutura da matéria e novas radiações.

A estratégia didática predominante na disciplina consiste em promover argumentações, discussões e reflexões explícitas, a partir da leitura e análise de textos acadêmicos contemporâneos e clássicos, abrangendo tanto fontes primárias quanto secundárias, possibilitando o contato com documentos históricos diversificados.

O Quadro 5 apresenta o planejamento inicial e a estrutura didático-organizacional da disciplina de História da Ciência 2023-1, incluindo os conteúdos ministrados, os objetivos específicos, os recursos didáticos empregados e a avaliação em cada um dos 18 encontros semanais. Além disso, disponibiliza-se no **Apêndice A**, os planos de aula de cada encontro.

Quadro 5 - Planejamento inicial e organização didática da disciplina de História da Ciência 2023-1.

Semana	Conteúdo	Objetivos	Recursos Didáticos	Avaliação
1 (14/mar.)	- Programa da disciplina de História da Ciência 2023-1. - Discussões e reflexões quanto ao uso pedagógico da História da Ciência.	➤ Identificar as expectativas dos estudantes quanto à forma e ao conteúdo a serem abordados na disciplina de História da Ciência 2023-1. ➤ Identificar, de acordo com as concepções iniciais dos estudantes, as contribuições de uma disciplina de História da Ciência para sua formação (e atuação) de futuros professores de física. ➤ Apresentar o Programa da Disciplina de História da Ciência 2023-1.	❖ Aula expositiva dialogada ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 1¹⁰⁹ (Martins, 1990): “Sobre o papel da História da Ciência no ensino” (leitura em sala de aula).	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (1)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
2 (21/mar.)	Aplicação do questionário inicial sobre aspectos da Natureza da Ciência.	➤ Coletar dados acerca das concepções iniciais dos estudantes sobre diferentes aspectos da Natureza da Ciência no início da disciplina de História da Ciência 2023-1. ➤ Despertar a curiosidade e o interesse dos estudantes quanto às complexidades e peculiaridades da descrição da atividade científica. ➤ Estimular discussões e reflexões dos estudantes quanto à sete diferentes temas e	❖ Questionário inicial com 12 questões sobre diferentes aspectos da Natureza da Ciência.	❖ Respostas ao questionário inicial sobre aspectos da Natureza da Ciência. ❖ Memórias & Reflexões (2)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula. * Após a aula, o questionário inicial foi enviado para o e-mail dos estudantes.

¹⁰⁹ Os textos de leitura obrigatória, tanto os prévios (extraclasse) quanto os realizado em sala de aula, foram impressos e distribuídos aos estudantes para leitura individual.

		questões envolvendo do processo de construção do conhecimento científico.		
3 (28/mar.)	- Leitura de textos acadêmicos. <i>Metodologia dos Três Olhares</i> como estratégia para leitura de textos. - Construção de fluxogramas.	➤ Orientar os estudantes quanto aos fundamentos e a importância da leitura de textos acadêmicos e históricos ao longo da disciplina História da Ciência 2023-1. ➤ Discutir a <i>Metodologia dos Três Olhares</i> como estratégia para a leitura de textos e a construção de fluxogramas. ➤ Descrever quais atividades avaliativas serão solicitadas envolvendo a leitura de textos acadêmicos e históricos ao longo da disciplina, bem como a dinâmica das aulas pós-leituras desses textos.	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 2 (Serrano, 2021): “Os cientistas nazistas que tentaram desacreditar Einstein com argumentos racistas” (leitura em sala de aula). ❖ Texto 3 (Salas, 2020): “Cientistas nazistas deixam de dar nome a duas crateras na Lua” (leitura em sala de aula).	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Fluxogramas 1, 2 e 3. ❖ Memórias & Reflexões (3)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
4 (04/abr.)	- Narrativas pseudo-históricas nos livros didáticos. - Imagens distorcidas sobre a Natureza da Ciência.	➤ Problematizar a presença de narrativas pseudo-históricas com base em textos didáticos. ➤ Discutir os principais elementos que podem sinalizar a presença de uma narrativa pseudo-histórica em textos didáticos e acadêmicos. ➤ Discutir como as narrativas pseudo-históricas atuam intencionalmente na promoção de imagens distorcidas da Natureza da Ciência. ➤ Estimular a discussão e a autorreflexão acerca da responsabilidade do professor quanto às	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 4 (Martins, 2001): “Como não escrever sobre História da Física: um manifesto historiográfico” (leitura prévia). ❖ Texto 5 (Allchin, 2004): “Pseudohistory and Pseudoscience”. ❖ Texto 6 (Lawson, 2000):	❖ Fluxogramas 4. ❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (4)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

		concepções de Natureza da Ciência que são (in)conscientemente transmitidas e fomentadas em sua prática docente.	“The generality of hypothetico-deductive reasoning: making scientific thinking explicit”. (leitura em sala da aula do texto traduzido)	
5 (11/abr.)	• O efeito fotoelétrico • Narrativas pseudo-históricas nos livros didáticos de ensino superior. • Concepções de Natureza da Ciência nos livros didáticos de ensino superior.	➤ Avaliar as habilidades/competências dos estudantes em apresentações orais. ➤ Avaliar a compreensão conceitual dos estudantes acerca do fenômeno do efeito fotoelétrico. ➤ Analisar/Discutir a presença de elementos de pseudo-história no capítulo referente ao efeito fotoelétrico em livros didáticos do ensino superior. ➤ Analisar/Discutir imagens de senso comum sobre a Natureza da Ciência transmitidas no capítulo referente ao efeito fotoelétrico em livros didáticos do ensino superior. ➤ Estimular a autorreflexão acerca da responsabilidade do professor tanto às narrativas pseudo-históricas quanto às concepções de senso comum da Natureza da Ciência que são (in)conscientemente transmitidas pelos livros didáticos do ensino superior.	❖ Seminário Coletivo nº 1. ❖ Seis livros didáticos de ensino superior. 1. Halliday, Resnick, Walker (2016) 2. Young e Freedman (2016) 3. Nussenzveig (2014) 4. Tipler e Llewellyn (2017) 5. Eisberg e Resnick (1979) 6. Alonso e Finn (2000)	❖ Ficha Avaliativa de Seminários ❖ Lista de Exercícios (conceitos) ❖ Memórias & Reflexões (5)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

6 (18/abr.)	• O experimento do efeito fotoelétrico. • A influência da “intensidade” e “frequência” da luz incidente no experimento do efeito fotoelétrico. • A interpretação clássica de Philip Lenard para seus resultados experimentais. • A interpretação quântica de Albert Einstein para a natureza da luz.	➤ Observar empiricamente a influência da “intensidade” e “frequência” da luz incidente no experimento do efeito fotoelétrico. ➤ Avaliar o grau de correspondência entre as observações experimentais e as previsões da teoria clássica ondulatória-eletromagnética. ➤ Avaliar a coerência e a consistência entre as observações experimentais e a hipótese heurística de “<i>quantum</i> de luz” de Albert Einstein (1905). ➤ Avaliar a coerência e a consistência entre as observações experimentais e a “hipótese de gatilho” de Philipp Lenard (1902). ➤ Analisar e avaliar a compreensão conceitual do fenômeno do efeito fotoelétrico por meio da elaboração de um Relatório Científico-Experimental com base nos dados coletados na aula. ➤ Discutir e refletir sobre algumas concepções de senso comum da Natureza da Ciência apresentadas em modelos didáticos fechados de relatórios experimentais.	❖ Aula experimental (aula prática). ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Modelo de Relatório Científico-Experimental. ❖ Três conjuntos “Aparato Efeito Fotoelétrico” – Modelo nº AP-8208 (Pasco®, 2020).	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Roteiro experimental (efeito fotoelétrico)*. *Foi dado um prazo de 15 dias para entrega dessa atividade.
7 (25/abr.)	• Os conceitos de “observação”, “neutralidade” e	➤ Promover discussões e reflexões a respeito dos conceitos de “observação”,	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Apresentação em PowerPoint.	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo.

	“objetividade” na investigação científica experimental. • Narrativas pseudo-históricas em livros didáticos. • O papel do “método científico experimental hipotético-dedutivo” nas práticas científicas. • Concepções sobre a Natureza da Ciência.	“neutralidade” e “objetividade” em uma investigação científica experimental. ➤ Promover discussões e reflexões a respeito do papel e da importância da “metodologia científica experimental hipotético-dedutiva” nas práticas científicas, bem como suas limitações. ➤ Analisar e discutir algumas concepções prévias dos estudantes sobre a Natureza da Ciência apresentadas no questionário inicial sobre a NdC (Questão 8).	❖ Questionário inicial sobre a NdC (Questão 8). ❖ Texto 7 (Gil-Pérez <i>et al.</i>, 2001): “Para uma imagem não deformada do trabalho científico” (leitura prévia). ❖ Texto 8 (Moreira; Ostermann, 1993): “Sobre o ensino do método científico” (leitura complementar).	❖ Memórias & Reflexões (7)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
8 (02/mai.)	• A ótica e ondulatória no século XIX. • A controvérsia científica histórica sobre a Natureza da Luz na primeira metade do século XIX (ondulatória vs corpuscular).	➤ Descrever os contextos econômicos, sociopolíticos e científicos francês e britânico de fins do século XVIII e início do século XIX. ➤ Promover discussões e reflexões sobre a natureza da luz dentro dos contextos científicos francês e britânico do início do século XIX. ➤ Abordar temas e questões acerca da Natureza da Ciência envolvidos na narrativa histórica “Desvelando a natureza da luz” referentes ao contexto científico francês e britânico.	❖ Aula expositiva dialogada ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 9 (Oliveira, 2019): Capítulo 3: “Desvelando a natureza da luz”.	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (8)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

9 (09/mai.)	• O eletromagnetismo no século XIX. • O desenvolvimento e a consolidação da teoria clássica ondulatória-eletromagnética de James C. Maxwell ao longo do século XIX.	➤ Promover discussões e reflexões sobre o desenvolvimento e a consolidação da teoria clássica ondulatória-eletromagnética de James C. Maxwell ao longo do século XIX. ➤ Abordar temas e questões acerca da Natureza da Ciência envolvidos no desenvolvimento da teoria eletromagnética.	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 10 (Abrantes, 1988) “A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética”.	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (9)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
10 (16/mai.)	• A estrutura da matéria no século XIX. • As investigações científicas sobre a estrutura da matéria ao longo do século XIX. • As observações experimentais de novas radiações ao longo do século XIX (raios catódicos, raios canais, raios X).	➤ Promover discussões e reflexões a respeito das investigações científicas sobre a estrutura da matéria ao longo do século XIX. ➤ Descrever o contexto científico das observações experimentais de novas radiações ao longo do século XIX (raios catódicos, raios canais, raios X).	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 11A (Martins, 1998): “A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen”. ❖ Texto 11B (Martins; Rosa, 2014): “História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie”. [Introdução e capítulo 1].	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (10)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
11 (23/mai.)	Não houve aula	Não houve aula	Não houve aula	Não houve aula
12 (30/mai.)	• {1887}: Heinrich R. Hertz “tropeça” e	➤ Analisar e discutir as informações históricas apresentadas no trabalho de Mangili (2012).	❖ Aula expositiva dialogada.	❖ Respostas às “Questões Problematicadoras”

	investiga um novo fenômeno elétrico.	➤ Analisar e discutir diferentes aspectos sobre a Natureza da Ciência que se destacam no trabalho de Mangili (2012). ➤ Problematicar o uso de alguns termos (palavras) considerados “inapropriados” e “inadequados” na elaboração de um texto de história das ciências. ➤ Analisar e discutir o texto original “Sobre um efeito da luz ultravioleta em uma descarga elétrica” (Hertz, 1887). ➤ Analisar e discutir a presença de elementos de pseudo-história a respeito do “efeito fotoelétrico” nos livros didáticos do ensino superior, em particular, quanto à contribuição de Heinrich Hertz.	❖ Apresentação em PowerPoint. ❖ Texto 12 (Mangili, 2012): “Heinrich Rudolph Hertz e a ‘descoberta’ do efeito fotoelétrico: um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula”. ❖ Texto 13 (Hertz, 1887): “On an effect of ultraviolet light upon the electric discharge”.	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (12)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
13 (06/jun.)	● {1898-1902;} As investigações experimentais de Philipp Lenard sobre o efeito fotoelétrico. ● O Prêmio Nobel de Física de 1905.	➤ Analisar e discutir os saberes <i>conceituais, procedimentais e epistemológicos</i> apresentados no Texto 14: “Sobre os raios catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – tradução da <i>Nobel Lecture</i> de 1906. ➤ Analisar e discutir os possíveis elementos de pseudo-história do efeito fotoelétrico presentes nos livros-didáticos. ➤ Identificar, por meio da abordagem investigativa, quais aspectos sobre a Natureza	❖ Discussões e reflexões ❖ Leitura comentada ❖ Texto 14 (The Nobel Foundation, 1998 [Lenard (1906)]): “On cathode rays”, em <i>Nobel Lecture in Physics (1901-1921)</i>. ❖ Texto 15 (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2023a):	❖ Respostas às “Questões Problematicadoras” (Texto 14) ❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (13)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

		da Ciência que se destacam na <i>Nobel Lecture</i> de Philipp Lenard e são fecundos para problematização. ➤ Avaliar, até que ponto, a análise e leitura crítica do Texto 14 possibilita a promoção de discussões, reflexões e contra argumentações epistemológicas a respeito das principais imagens distorcidas do trabalho científico, conforme relatadas por Gil-Pérez <i>et al.</i> (2001).	“Uma problematização sobre a Natureza da Ciência: análise da <i>Nobel Lecture</i> de Philipp Lenard e do movimento nazista ‘<i>Deutsche Physik</i>’”. (Texto produzido pelos autores, utilizado durante a pesquisa e publicado posteriormente).	
14 (13/jun.)	● {1898-1902:} As investigações experimentais de Philipp Lenard sobre o efeito fotoelétrico. ● O contexto econômico, sociopolítico e científico alemão no início do século XX. ● As lideranças de Philipp Lenard e Johannes Stark na gênese e desenvolvimento do movimento nazista	➤ Compreender o contexto sociopolítico alemão que possibilitou a gênese e o desenvolvimento do movimento nazista “Física Alemã” entre os anos de 1920 e 1938. ➤ Compreender o contexto científico-filosófico de apropriação indevida por Philipp Lenard e Johannes Stark das discussões epistemológicas legítimas envolvendo o papel da matemática e das hipóteses especulativas no processo de construção de teorias científicas. ➤ Analisar e discutir as possíveis implicações de questões éticas, políticas e morais envolvendo a atividade científica.	❖ Discussões e reflexões ❖ Leitura comentada ❖ Texto 14 (The Nobel Foundation, 1998 [Lenard (1906)]): “On cathode rays”, em <i>Nobel Lecture in Physics (1901-1921)</i>. ❖ Texto 15 (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2023a): “Uma problematização sobre a Natureza da Ciência: análise da <i>Nobel Lecture</i> de Philipp Lenard e do movimento nazista ‘<i>Deutsche Physik</i>’”.	❖ Respostas às “Questões Problematizadoras” (Texto 14) ❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (14)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

	“Física Alemã” entre 1920 e 1938.			
15 (20/jun.)	{1905:} A interpretação heurística de “<i>quantum</i> de luz” por Albert Einstein.	➤ Analisar e discutir o artigo publicado por Albert Einstein em 1905, no qual ele apresenta sua hipótese heurística de “<i>quanta</i> de luz”. ➤ Abordar diferentes aspectos sobre a Natureza da Ciência que se destacam no artigo de Einstein (1905). ➤ Analisar e discutir diferentes elementos de pseudo-história da ciência que foram “criados” ao longo dos anos a partir do artigo de Einstein (1905).	❖ Aula expositiva dialogada. ❖ Texto 16 (Einstein, 2005 [1905]): “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” (leitura e discussão em sala de aula)	❖ Participação nas discussões. ❖ Posicionamento crítico-reflexivo. ❖ Memórias & Reflexões (15)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.
16 (27/jun.)	{1910-1913:} Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico.	➤ Reconhecer que durante o período de 1902 e 1913 foram propostos modelos científicos que, até certo ponto, foram bem-sucedidos na compreensão do efeito fotoelétrico, fundamentados na teoria clássica do eletromagnetismo. ➤ Reconhecer que a rejeição (de 1905 a 1921) à “hipótese de <i>quantum</i> de luz” estava embasada tanto em fundamentos teóricos quanto empíricos, e não somente em crenças pessoais dogmáticas na teoria clássica do eletromagnetismo.	❖ Seminário Coletivo nº 2. ❖ Texto 17 (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2024): “Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard, Arthur Haas e J. J. Thomson”. (Texto produzido pelos autores, utilizado durante a pesquisa e publicado posteriormente).	❖ Ficha Avaliativa de Seminários ❖ Lista de Exercícios (conceitos) ❖ Memórias & Reflexões (16)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

		➤ Reconhecer que as limitações do conhecimento científico, em uma certa época, possibilitam diferentes interpretações, igualmente válidas, para mesma base empírica disponível, resultando em um ambiente de intensos debates e controvérsia científica. ➤ Entender conceitualmente a “hipótese de gatilho” proposta por Philipp Lenard em 1902. ➤ Entender conceitualmente a tentativa clássica de interpretação eletrodinâmica do “<i>quantum</i> de ação elementar” de Max Planck, realizada por Arthur Haas em 1910. ➤ Entender conceitualmente as duas hipóteses clássicas (modelos atômicos) propostas por J. J. Thomson em 1911 e 1913.		
17 (04/jul.)	● {1914-1917:} As investigações experimentais de Robert Millikan sobre o efeito fotoelétrico.	➤ Reconhecer a importância do desenvolvimento histórico dos testes experimentais sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no período de 1898-1917. ➤ Entender o funcionamento do aparato experimental construído por Millikan e colaboradores para testar a equação fotoelétrica de Einstein.	❖ Seminário Coletivo nº 3. ❖ Texto 18 (Millikan, 1916c) “A direct photoelectric determination of Planck’s ‘h’”. 1. Introdução 2. Aparato experimental 3. Fontes de erros e suas eliminações	❖ Ficha Avaliativa de Seminários ❖ Lista de Exercícios (conceitos) ❖ Memórias & Reflexões (17)* *A entrega da atividade deverá ser feita até a véspera da próxima aula.

		➤ Entender como Millikan identificou as fontes de erros experimentais nos trabalhos predecessores e realizou suas respectivas eliminações. ➤ Reconhecer que Millikan aceitou a validade empírica da equação fotoelétrica de Einstein, porém, rejeitou o seu modelo quântico para natureza da luz, optando por defender uma teoria da fotoemissão clássica, fundamentada nos trabalhos de J. J. Thomson. ➤ Analisar e discutir, por meio da abordagem investigativa, quais aspectos sobre a Natureza da Ciência que se destacam no artigo publicado por Millikan (1916c). ➤ Avaliar, até que ponto, a leitura crítica do artigo publicado por Millikan (1916c) possibilita discussões, reflexões e contra argumentações a respeito das imagens distorcidas do trabalho científico, conforme relatadas por Gil-Pérez <i>et al.</i> (2001).	4. Teoria da Fotoemissão	
18 (11/jul.)	● Aplicação do questionário final sobre aspectos da Natureza da Ciência.	➤ Coletar dados acerca das concepções posteriores dos estudantes sobre diferentes aspectos da Natureza da Ciência ao término da disciplina de História da Ciência 2023-1.	❖ Questionário final com nove perguntas sobre diferentes aspectos da Natureza da Ciência.	❖ Respostas ao questionário final sobre a Natureza da Ciência ❖ Respostas ao “Questionário Avaliativo da Disciplina História da Ciência 2023-1”.

	● Avaliação geral da organização didática da disciplina História da Ciência 2023-1.	➤ Coletar informações acerca das percepções dos sujeitos da pesquisa em relação à organização didática, ao planejamento e qualidade dos materiais didáticos utilizados na História da Ciência 2023-1.	❖ Questionário sobre a disciplina de História da Ciência 2023-1.	

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

3.1.3.1 O Uso dos Princípios Organizacionais Ausubelianos

De maneira consistente com os fundamentos da TAS (Ausubel, 2003) – especialmente os princípios de *diferenciação progressiva e reconciliação integrativa* –, a disciplina História da Ciência 2023-1 (unidade de ensino) foi estruturada de modo a ser considerada *potencialmente significativa*.

Para isso, é essencial que a matéria de ensino possua significado lógico, com uma estrutura interna bem definida e coerente. Essa estrutura deve seguir uma organização lógica e conceitual em que os conteúdos sejam abordados progressivamente, partindo de conceitos mais gerais, inclusivos e abrangentes em direção aos mais específicos, detalhados e complexos.

Ademais, as novas informações precisam ser apresentadas em linguagens, terminologias e vocabulários compatíveis com os conhecimentos prévios específicos e relevantes pré-existentes na *estrutura cognitiva* dos estudantes – os chamados *subsunçores*. Isso possibilita que os novos conceitos sejam integrados e assimilados de forma substantiva, e apenas de forma literal ou mecânica.

Por fim, as atividades propostas pelos professores-pesquisadores devem estimular e exigir a construção e atribuição de significados próprios dos novos conhecimentos por parte dos estudantes, encorajando a *predisposição ativa* em aprender significativamente, em contraposição à simples memorização de informações.

(a) *Diferenciação Progressiva: Estruturação Lógica e Sequencial do Conteúdo.*

O Quadro 5 mostra que a apresentação e discussão da “História Não Linear do Efeito Fotoelétrico” foi planejada para ter início efetivo na Semana 12. Os sete subtópicos que compõem essa narrativa história estão organizados cronologicamente¹¹⁰ (cf. Capítulo 2). Embora essa estrutura respeite a coerência temporal dos acontecimentos, ela não segue, por si só, uma lógica conceitual de *diferenciação progressiva*, conforme proposta na TAS (Ausubel,

¹¹⁰ **I.** {1887}: H. R. Hertz “Tropeça” e Investiga a Interação entre Faíscas Elétricas. **II.** {1888-1898}: As Primeiras Investigações sobre o Efeito Fotoelétrico. **III.** {1898-1902}: As Investigações de Phillip Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico. **IV.** {1905}: Albert Einstein e sua Hipótese Heurística de “Quantum de Luz”. **V.** {1910-1913}: Tentativas Clássicas de Interpretação do Efeito Fotoelétrico. **VI.** {1914-1917}: As Investigações de R. A. Millikan sobre o Efeito Fotoelétrico. **VII.** {1917 -1927}: O Efeito Compton e a Aceitação da Teoria Quântica da Luz”.

2003). Para alinhar o percurso didático a esse princípio, optou-se por anteceder a discussão histórica com uma discussão geral e mais inclusiva sobre os principais desenvolvimentos da Física ao longo do século XIX – particularmente nas áreas da óptica, ondulatória, eletromagnetismo e estrutura da matéria – de modo a consolidar os subsunçores mais abrangentes para os conteúdos subsequentes. Assim, entre as semanas 8 e 11, foram planejadas aulas expositivas dialogadas sobre: (i) a controvérsia científica sobre a natureza da luz (teoria ondulatória vs corpuscular); (ii) a consolidação da teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell; (iii) as investigações sobre a estrutura atômica e a emergente teoria do elétron; (iv) a controvérsia científica sobre a natureza dos raios catódicos (teoria ondulatória vs corpuscular); e, por último, (v) a descoberta das novas radiações (raios canais, raios X e raios γ). Essa sequência foi organizada para criar uma base conceitual significativa que facilite, posteriormente, a compreensão dos episódios centrais da história do efeito fotoelétrico.

As leituras, discussões e reflexões explícitas sobre os principais avanços na Física durante o século XIX tiveram como objetivo estabelecer uma base teórico-conceitual ampla, articulada aos subsunçores pré-existent na estrutura cognitiva dos estudantes. Essa estratégia favorece a aprendizagem significativa de fenômenos mais específicos, como o efeito fotoelétrico. A abordagem histórica das controvérsias científicas – especialmente comparações entre as teorias ondulatória e corpuscular, tanto para a natureza da luz quanto dos raios catódicos – foi planejada para promover a *reconciliação integrativa*, conectando novos conhecimentos a conceitos anteriormente abordados. A compreensão dessas controvérsias é fundamental para que os estudantes organizem as novas informações de forma hierárquica e significativa, evitando que as próximas discussões sobre o efeito fotoelétrico se deem de forma isolada e fragmentada, mas como parte de uma rede conceitual mais extensa. A ênfase didática recai sobre a modificação, diferenciação e ampliação de subsunçores prévios por meio da introdução de novos significados relacionados às teorias da luz, estrutura da matéria e fenômenos físicos do século XIX – caracterizando um processo de *aprendizagem subordinada [subsunção] correlativa* (Ausubel, 2003). Por fim, a contextualização histórico-científica e tecnológica ajuda a desenvolver uma compreensão não apenas dos fatos científicos, mas também sobre como as influências epistemológicas e socioculturais moldam as teorias científicas de uma certa época.

O Quadro 5 também indica que a unidade de ensino foi estruturada para abordar, de maneira progressiva, os princípios heurísticos representativos da NdC e seus aspectos históricos, epistemológicos e sociológicos (cf. Capítulo 1, Subseção 1.3.2). No primeiro encontro (Semana 1), foi proposta a questão problematizadora ““Como você responderia à pergunta: *Afinal de contas, o que é essa coisa chamada Ciência?*”” como forma de explorar

“Problema da Demarcação” entre ciência e não-ciência. Essa questão, seguindo os princípios de Ausubel (2003), é considerada de elevado grau de generalidade e inclusividade, pois engloba vários outros aspectos da NdC, como “verificabilidade”, “falsificabilidade”, “metodologia científica”, “leis”, “teorias”, “modelos científicos” e a “natureza do conhecimento científico”. O objetivo pedagógico, nesse momento, não é fazer uma discussão aprofundada ou oferecer uma resposta definitiva, mas trazer à tona os conhecimentos prévios dos estudantes sobre a NdC e, ao mesmo tempo, estimular a autorreflexão e discussões iniciais sobre a matéria de ensino.

Reconhecendo que o princípio organizacional ausubeliano da *diferenciação progressiva* postula que a aprendizagem, a retenção e a organização do conhecimento é hierárquica, procedendo de cima para baixo quanto aos níveis de abstração, generalidade e inclusão, planejou-se para a Semana 7 a promoção de discussões e reflexões sobre as “Influências Histórico-Sociais-Culturais na Pesquisa Científica” – *A ciência é influenciada pelo contexto histórico, filosófico, político, econômico, social, cultural e científico-tecnológico no qual é construída* – e sobre a pluralidade de “Metodologias Científicas de Investigação” – *Existe uma diversidade de métodos que são empregados nas investigações científicas, igualmente válidos, em vez de um método único, rígido, fechado, algoritmo e infalível*.

Entendemos que esses dois aspectos da NdC, além de estarem estreitamente articulados entre si, são mais gerais e abrangentes do que os demais, pois se relacionam com várias noções metacientíficas – especialmente com ideias de senso comum amplamente difundida por meio da tese da “neutralidade científica”; segundo a qual “*a ciência é livre de valores socioculturais*”. Essa tese se desdobra em três subteses: a neutralidade temática (associada à *autonomia* da ciência); a neutralidade metodológica (associada à *imparcialidade* dos procedimentos científicos) e a neutralidade factual (associada à *neutralidade* conceitual dos dados). A compreensão desses dois aspectos da NdC é fundamental para a problematização de outros temas, como “o processo de validação do conhecimento científico”, “o uso da criatividade, imaginação e analogias”, “a natureza das observações experimentais”, os conceitos metacientíficos de “objetividade” e “subjetividade”, bem como o papel, a importância e as limitações da “metodologia científica experimental hipotético-dedutiva”.

Ao selecionar aspectos da NdC mais abrangentes e inclusivos como ponto de partida, asseguramos que tópicos mais específicos e complexos sejam introduzidos de maneira gradual e lógica, formando a estrutura de conhecimento hierárquica. Entre esses tópicos mais específicos e complexos destaca-se as sete principais imagens deformadas do trabalho científico, conforme apontado por Gil-Pérez *et al.* (2001). Esse texto acadêmico foi escolhido

como leitura prévia obrigatória para o encontro da Semana 7¹¹¹. Contudo, seu conteúdo foi retomado ao longo das Semanas 12 a 17 por meio de questões orientadoras sobre os textos históricos entregues aos estudantes para leitura prévia obrigatória. Especificamente para esses encontros, foram planejadas discussões e debates coletivos com o propósito de avaliar até que ponto as novas informações possibilitam analisar de forma crítica e problematizar as sete imagens distorcidas sobre o trabalho científico, promovendo a *diferenciação progressiva*, a *reconciliação integrativa* e a *consolidação* dos conhecimentos adquiridos.

(b) *Seleção de Materiais Instrucionais*

A seleção de materiais instrucionais foi planejada para fomentar a reflexão crítica, a argumentação e a análise histórica, epistemológica e sociológica das novas informações, facilitando a construção de significados próprios e aprofundados sobre a NdC, contribuindo para uma compreensão mais bem informada das práticas científicas. A escolha dos textos de leitura obrigatória e complementar, provenientes de fontes primárias e secundárias, considerou a relevância da narrativa histórica e adequação da linguagem no nível de compreensão dos estudantes universitários.

Nesse sentido, vale apenas destacar atividade experimental sobre o efeito fotoelétrico realizada na Semana 6, constituindo um momento relevante da disciplina, tanto por sua relevância conceitual quanto por seu potencial formativo no desenvolvimento de uma compreensão crítica da Natureza da Ciência. Embora o planejamento geral da disciplina tenha destacado a elaboração e análise de materiais historiográficos, a inclusão dessa experiência prática teve como propósito articular a dimensão empírica da Física com sua dimensão histórica e epistemológica, permitindo aos estudantes vivenciar, de forma investigativa, o processo de confronto entre interpretações clássicas e quânticas da luz. O uso do aparato experimental AP-8208 (Pasco®, 2020), aliado à produção de um Relatório Científico-Experimental, favoreceu a discussão sobre como os dados observacionais podem ser interpretados sob diferentes paradigmas teóricos (Lenard, Einstein e a tradição ondulatória).

¹¹¹ No planejamento didático-organizacional da unidade de ensino, consideramos que a transposição didática deste texto não era necessária, uma vez que ele já havia sido analisado no semestre anterior, na disciplina de “Metodologia e Prática de Ensino IV”.

Outro exemplo foi a decisão de selecionar, para leitura, análise e discussão na Semana 14 – no contexto das investigações experimentais de Lenard sobre o efeito fotoelétrico – sua *Nobel Lecture* proferida em 1906, intitulada “*Sobre os Raios Catódicos*” (Lenard, 1906), por ocasião do recebimento do Prêmio Nobel de Física¹¹², e não o seu artigo mais conhecido, publicado em 1902¹¹³. Essa escolha justifica-se pela maior acessibilidade da linguagem, do vocabulário e da terminologia utilizados nas *Nobel Lectures*, que são destinadas a um público mais amplo que assiste ao evento, incluindo professores e estudantes das áreas científicas. Embora exista a possibilidade de o cientista palestrante exagerar na reivindicação de suas próprias realizações, exigindo que os professores-pesquisadores estejam atentos a eventuais distorções e narrativas egocêntricas, as *Nobel Lectures* contêm informações importantes e pouco exploradas em textos didáticos.

O mesmo critério de acessibilidade em relação à linguagem, vocabulário e terminologia orientou a escolha das seções analisadas no artigo de Millikan (1916c): 1. Introdução; 2. Aparato experimental; 3. Fontes de erros e suas eliminações e 4. Teoria da Fotoemissão. Essas seções foram traduzidas pelos professores-pesquisadores, impressas e distribuídas aos estudantes para leitura e preparação do “Seminário Coletivo 3”, realizado na Semana 17.

A leitura da *Nobel Lecture* de Lenard (1906) e do artigo de Robert Millikan (1916c) foi considerada essencial para uma compreensão mais precisa e bem informada do processo de construção do conhecimento científico sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico. Esses textos de fontes primárias abordam questões epistemológicas fundamentais, incluindo a gênese do conhecimento científico, os métodos, procedimentos e os processos da ciência, bem como a própria natureza do conhecimento produzido pelos cientistas e a influência do contexto histórico-social e tecnológico nas investigações científicas.

Para outros textos de fontes primárias essenciais para a narrativa histórica, cuja complexidade linguística e conceitual representa um desafio para estudantes de graduação, como o artigo de Einstein de 1905, adotou-se a estratégia de leitura orientada seguida de aula expositiva dialogada (Semana 15). Nessa abordagem, os professores-pesquisadores desempenham um papel fundamental ao guiar os estudantes na interpretação de trechos mais complexos, oferecendo explicações e contextualizações que facilitam a compreensão. Ao realizar essas mediações, os professores-pesquisadores auxiliam os estudantes na construção de

¹¹² Os autores realizaram a tradução do discurso de apresentação e da *Nobel Lecture* de Física de 1906. Esse trabalho foi publicado na forma de “material suplementar” em Suttini, Caluzi e Errobidart (2023b).

¹¹³ LENARD, Philipp Eduard Anton von. Über die Lichtelektrische Wirkung [Sobre o efeito fotoelétrico]. *Annalen der Physik*, Leipzig, v. 313, n. 5, p. 149-198, 1902. <https://doi.org/10.1002/andp.19023130510>.

significados próprios, potencializando a aprendizagem significativa. Além disso, a utilização de subsunçores adequados possibilita que os estudantes integrem esses novos conhecimentos a outros existentes em sua estrutura cognitiva, favorecendo a assimilação e retenção da matéria de ensino de maneira hierárquica e coerente. Com isso, a leitura conjunta, as discussões orientadas e as reflexões explícitas contribuem para uma compreensão mais profunda, relacionando o material diretamente com os conceitos científicos e históricos já assimilados.

Finalmente, é importante destacar que, como suporte às aulas expositivas-dialogadas, o texto histórico apresentado na tese (cf. Capítulo 2) foi utilizado como fonte secundária de referência. Além disso, em três encontros (Semanas 13, 14 e 16), partes desse material foram escolhidas como leitura prévia obrigatória para análise e discussão em sala de aula (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2023), bem como para preparação do “Seminário Coletivo 2” (Suttini; Caluzi; Errobidart, 2024).

(c) Estratégias Didáticas, Avaliação e Reflexão: Promovendo a Metacognição

As abordagens contextuais, explícitas e reflexivas também incentivam os estudantes a refletirem sobre seu próprio processo de aprendizagem, desenvolvendo a metacognição. Essa prática os torna mais conscientes de suas estratégias de aprendizado e das conexões formadas, aumentando o engajamento em uma aprendizagem significativa e favorecendo a integração duradoura do novo conteúdo. Com base nessa perspectiva de processo ausubeliano de ensino e de aprendizagem, foi planejada como atividade avaliativa obrigatória, subsequente às aulas ministradas, a elaboração de registros semanais intitulados *Memórias & Reflexões*. Nesses registros, os estudantes compartilham suas percepções, reflexões sobre os temas abordados e as estratégias didáticas adotadas.

O uso das *Memórias & Reflexões* está alinhado com a TAS (Ausubel, 2003), pois estimula a ativação e organização do conhecimento prévio dos estudantes, fundamental para a construção de novos conceitos de forma substancial. Ao expressarem suas percepções e reflexões individuais, os estudantes revisitam e reorganizam suas estruturas cognitivas, confrontando e integrando novos subsunçores, o que favorece a assimilação significativa do conteúdo. Esse processo reflexivo viabiliza a identificação de conhecimentos prévios incorretos ou mal compreendidos, possibilitando, por meio da metacognição, que o estudante reflita sobre

seu próprio aprendizado e realize ajustes necessários, promovendo uma integração mais profunda e duradoura do conhecimento científico. Ademais, ao proporcionar um espaço de livre expressão, as *Memórias & Reflexões* objetivam estimular uma aprendizagem ativa, na qual o estudante se envolve diretamente com o conteúdo e com suas próprias estratégias de aprendizado. Por fim, esses registros fornecem uma visão detalhada das interações entre os estudantes e o conteúdo abordado, bem como suas reações às diferentes abordagens pedagógicas empregadas ao longo da disciplina. Assim, os registros de *Memórias & Reflexões* configuram-se como uma ferramenta para a análise qualitativa da experiência educacional, possibilitando a identificação de limitações, potencialidades e oportunidades de aprimoramento no desenvolvimento da disciplina.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA EMPÍRICA

3.2.1 Os Instrumentos de Coleta de Dados

No decorrer do desenvolvimento da disciplina História da Ciência 2023-1, foram empregados diversos instrumentos para a coleta informações, tanto sobre a organização didático-pedagógica e sua implementação quanto sobre a aprendizagem epistemológica dos estudantes. Entre esses instrumentos, destacam-se: questionários, planos de aula, registro semanal das *Memórias & Reflexões* dos estudantes, além de diversas outras atividades escrita, como relatório científico-experimental, lista de exercícios, respostas a questões problematizadoras, análises críticas e elaboração de fluxogramas de textos.

Todos esses instrumentos desempenham um papel na avaliação do processo de planejamento organizacional da unidade de ensino como um todo. No entanto, no contexto deste relatório de tese de doutorado, a análise e interpretação dos dados concentrar-se-ão nos dados obtidos a partir dos seguintes instrumentos: (i) dois questionários fechados, no formato respostas de itens tipo-Likert, destinados à coleta de informações sobre as concepções prévias e posteriores dos estudantes em relação a diferentes aspectos da NdC; (ii) um *Questionário de Avaliação Geral*, com questões abertas e fechadas, volta à apreciação de diversos elementos relacionados à organização e implementação da unidade de ensino; e, por fim, (iii) os registros

semanais das *Memórias & Reflexões*, nos quais os estudantes expressaram livremente suas percepções sobre a matéria de ensino abordada, a dinâmica das aulas, as dificuldades encontradas, críticas e frustrações e sugestões de aprimoramento.

3.2.1.1 Concepções Prévias e Posteriores¹¹⁴ sobre a Natureza da Ciência

Com o propósito de avaliar as concepções prévias dos estudantes a respeito de aspectos sobre a NdC, na segunda semana de aula, foi aplicado um questionário inicial. Esse instrumento foi construído a partir de um longo período de discussões e reflexões epistemológicas sobre as perguntas e itens declarativos apresentados no questionário VOSE (sigla em inglês de *Views on Science and Education*), no formato respostas itens tipo-Likert, elaborado por Sufen Chen (2006)¹¹⁵.

Com efeito, foi em meados de 2021, durante um estudo de nossa autoria (cf. Suttini; Errobidart; Caluzi, 2022), no qual objetivou-se realizar um levantamento de concepções de NdC, com a participação de 162 estudantes da educação profissional integrada de nível médio, que se constatou a necessidade de efetuar reformulações e contextualizações no questionário original VOSE. Foram identificados problemas abrangendo a linguagem empregada (semântica), vieses de respostas em algumas questões e a ausência de definições precisas. Em resumo, identificou-se a presença de alguns termos ou expressões científicas que facilmente possuíam múltiplas interpretações e até mesmo contraditórias.

Desse modo, entre meados de 2021 e início de 2023, as questões originais do instrumento de coleta de dados – o questionário VOSE (Chen, 2006) – passaram por diversas reformulações, incluindo retradução e adaptação contextual (localização). Ao final desse processo, foram inseridas em um contexto científico específico, com a finalidade de reduzir ambiguidades e minimizar as possibilidades de interpretações indesejadas.

¹¹⁴ Embora o termo “concepções prévias” e “concepções posteriores” não façam parte da terminologia original de Ausubel (2003), são aqui utilizados para se referir a ideias ou noções manifestadas pelos estudantes antes (ou seja, ideias pré-existentes) e depois da intervenção didática. Cabe destacar, contudo, que tais concepções – quando errôneas, fragmentadas ou inconsistentes — não correspondem a “*subsunções*” no sentido estrito da TAS, uma vez que estes requerem certo grau de estabilidade, clareza e inclusividade para possibilitar a ancoragem de novos significados por meio da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa.

¹¹⁵ No levantamento histórico das pesquisas sobre NdC, empreendido por Moura (2014), observou-se que o questionário VOSE proposto por Chen (2006), bem como o questionário VNOS-C formulado por Lederman *et al.* (2002), são instrumentos amplamente empregados no âmbito internacional para realizar o levantamento de concepções da NdC de estudantes e professores, incluindo a pesquisa acadêmica no Brasil.

É importante enfatizar que ao longo desse processo, por meio de diálogos frequentes entre orientando e orientadores, ajustes na linguagem foram continuamente implementados. Além disso, outros pesquisadores, incluindo docentes, mestrandos e doutorandos do Programa de Pós-Graduação “Educação para a Ciência” (UNESP, Campus Bauru-SP), no qual esta pesquisa está vinculada, também contribuíram com revisões e sugestões.

Para evitar qualquer dubiedade, o instrumento de coleta de dados foi utilizado no início desta pesquisa empírica para coletar informações a respeito das concepções prévias dos estudantes sobre a NdC será identificado como questionário VOSE-RCN (em referência às iniciais dos nomes dos autores), o qual se encontra disponível no **Apêndice B**.

O questionário VOSE-RCN é constituído por 12 perguntas subtemáticas, as quais incluem entre 4 e 13 itens declarativos¹¹⁶, os quais representam diferentes concepções epistemológicas sobre o processo de construção do conhecimento científico. As respostas solicitadas são de múltiplas escolhas, fechadas, no formato respostas itens tipo-Likert de concordância e discordância. Elas abordam os seguintes aspectos sobre a NdC: Sobre o Uso da Imaginação e Criatividade (Questão 1); Sobre as “Verdades Científicas” [teorias e leis] (Questões 2 e 3); Sobre Leis e Teorias Científicas (Questões 4, 5 e 6); Sobre o Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas (Questão 7); Sobre o Processo de Investigação Científica (Questão 8); Sobre a Natureza das Observações Experimentais (Questão 9); Sobre a Presença (ou Ausência) de Valores Socioculturais nas Investigações Científicas (Questões 10 e 11); Sobre a NdC (geral) (Questão 12).

O Quadro 6 mostra uma síntese da estrutura organizacional do questionário VOSE-RCN. Na primeira coluna são listados os diversos aspectos ou temas de NdC investigados. Na segunda, as diferentes posições epistemológicas sobre o tema e, na terceira, as respectivas questões e itens declarativos nos quais ideias centrais sobre o tema e a posição são abordadas.

Quadro 6 - Estrutura organizacional do questionário VOSE-RCN.
Temas sobre a NdC. Posição Epistemológica. Questões/Itens Declarativos. Questões/Itens Declarativos.
Neste quadro, temos 1A, 1B, ..., 12X significando: questão 1, item declarativo A, e assim por diante.

Temas	Posição Epistemológica	Questão/Itens Declarativos
Natureza do Conhecimento Científico (teorias e leis)	Revolucionária	1A (teorias); 2A (leis)
	Acumulativa	1B (teorias); 2B (leis)
	Evolucionária	1C (teorias); 2C (leis)
	Absoluta	1D (teorias); 2D (leis)
Uso da Imaginação e Criatividade	Sim	3A, 3B, 3D
	Não	3C, 3E
Leis e Teorias (comparação)	Teorias são suposições hipotéticas	4A
	Relação hierárquica	4B, 4C (evidências empíricas)
	Diferentes tipos de ideias	4A, 4D, 4F, 4G

¹¹⁶ Exceto a última questão (Questão 12), formulada originalmente por Azevedo e Scarpa (2017b), que contém 26 itens.

	Ideias idênticas	4E (provisoriamente e predições)
Leis e Teorias (epistemologia)	Descoberta	5A, 5B (teorias); 6A e 6B (leis)
	Construída	5D, 5E, 5F (teorias); 6D, 6E, 6F (leis)
	Ambas	5C (teorias); 6C (leis)
Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas	Evidência empírica	7A (nenhuma), 7B (ambas)
	Paradigma	7C, 7F
	Simplicidade (parcimônia)	7D
	Status acadêmico (autoridade)	7E
	Intuição	7G
	Fecundidade (fertilidade)	7H
Metodologia Científica (investigação científica)	Método Científico (universal)	8E, 8F, 8G
	Diversidade de métodos	8A, 8B, 8C, 8D
Natureza das Observações Experimentais	Carregadas de teorias e valores	9A, 9B, 9E, 9F
	Desprovidas de teorias e valores	9C, 9D
Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais) na Pesquisa Científica	Objetividade (neutralidade)	10A (neutralidade/educação) 10B, 10E, 10J (neutralidade metodológica) 10F, 10M (neutralidade conceitual) 10C, 10D (neutralidade temática) 11E, 11F, 11G, 11I (neutralidade científica)
	Subjetividade (não neutralidade)	10G (não neutralidade temática) 10I, 10K (não neutralidade do contexto) 10H, 10L (não neutralidade metodológica) 11A, 11D, 11H (crenças pessoais) 11B, 11C (valores socioculturais)
Aspectos sobre a Natureza da Ciência		
Natureza da Ciência (geral) (Azevedo; Scarpa, 2017b)	Métodos de Investigação	12L, 12Y
	História e Criatividade	12B, 12D, 12E, 12J, 12T, 12U, 12Z
	Contexto Humano	12P
	Cultura	12O
	Interações Sociais	12A, 12C, 12D, 12E, 12F, 12G, 12H, 12I, 12K, 12X
	Financiamento e Economia	12D, 12I, 12M, 12N, 12V, 12W

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Ao término da disciplina de História da Ciência 2023-1, na décima oitava semana, foi aplicado o segundo questionário abordando diferentes aspectos sobre a NdC. Neste segundo instrumento de coleta de dados, todas as questões (e, quando necessário, também os itens declarativos) foram reformuladas de tal forma a estarem contextualizadas com situações referentes às investigações e controvérsias científicas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico e ao desenvolvimento inicial da teoria quântica da radiação.

Novamente, com o objetivo de prevenir possíveis dubiedades em relação à nomenclatura dos questionários, o instrumento de coleta de dados utilizado no final da disciplina será referido como questionário VOSE-EF (em referência ao contexto histórico-científico do “efeito fotoelétrico”), que se encontra disponibilizado no **Apêndice C**.

O questionário VOSE-EF é composto por nove perguntas subtemáticas, de múltiplas escolhas, fechadas, também no formato respostas itens tipo-Likert de concordância e discordância. Cada pergunta engloba de 4 a 10 itens declarativos. As questões exploram os seguintes aspectos da NdC: Sobre os Modelos Científicos (Questão 1); Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro)/(leis e teorias) (Questões 2 e 3); Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias no Trabalho Científico (Questão 4); Sobre as Teorias e Leis Científicas (Questões 5); Sobre o Processo de Validação do Conhecimento Científico (Questões 6); Sobre a Natureza das Observações Experimentais (Questões 7); Sobre a Metodologia Científica (Questões 8); Sobre as Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica (Questões 9).

O Quadro 7 apresenta uma representação da organização da estrutura do questionário VOSE-RCN final. Na coluna inicial estão enumerados os nove temas ou aspectos sobre a NdC que são explorados. Na coluna do meio, são delineadas as diversas abordagens epistemológicas relativas a esses temas. Na coluna final, são indicadas as questões e afirmações correspondentes que abordam conceitos-chave sobre o tópico e a abordagem epistemológica.

Quadro 7 - Estrutura organizacional do questionário VOSE-EF.

Temas sobre a NdC. Posição Epistemológica. Questões/Itens Declarativos.

Neste quadro, temos 1A, 1B, ..., 9 L significando: questão 1, item declarativo A, e assim por diante.

Temas	Posição Epistemológica	Questões/Itens Declarativos
Modelagem Científica	Cópia exata da realidade	1B, 1E
	Abstrações da realidade	1A, 1C, 1D, 1F, 1G
Natureza do Conhecimento Científico (teorias e leis)	Revolucionária	2A (teorias); 3A (leis)
	Acumulativa	2B (teorias); 3B (leis)
	Evolucionária	2C (teorias); 3C (leis)
	Absoluta	2D (teorias); 3D (leis)
	Falsificacionista ingênua	2E (teorias); 3E (leis)
Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias	Sim	4A, 4B, 4D, 4F
	Não	4C, 4E, 4G, 4H
Leis e Teorias (comparação)	Teorias são suposições hipotéticas	5A
	Relação hierárquica	5B, 5C (evidências empíricas)
	Diferentes tipos de ideias	5A, 5D, 5F, 5G, 5H
	Ideias idênticas	5E
Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas	Evidência empírica	6A (nenhuma), 6B (todas)
	Paradigma	6C, 6F
	Simplicidade (parcimônia)	6D
	Status acadêmico (autoridade)	6E
	Intuição	6G
	Fecundidade (fertilidade)	6H
Natureza das Observações Experimentais	Carregadas de teorias e valores	7A, 7B, 7E, 7F, 7G
	Desprovidas de teorias e valores	7C, 7D, 7H
Metodologia Científica (investigação científica)	Método Científico (universal)	8aA, 8bA, 8bC, 8cE, 8cG
	Diversidade de métodos	8aB, 8aC, 8bB, 8bD, 8cA, 8cB, 8cC, 8cD, 8cF
Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais) na Pesquisa Científica	Objetividade (neutralidade)	9A (neutralidade/educação) 9B, 9E, 9J (neutralidade metodológica)

		9F, 9M (neutralidade conceitual) 9C, 9D (neutralidade temática)
	Subjetividade (não neutralidade)	9G (não neutralidade temática) 9I, 9K, (não neutralidade do contexto) 9H, 9L (não neutralidade metodológica)

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Comparativamente, pode-se notar que o questionário VOSE-EF apresenta uma versão mais concisa em relação ao VOSE-RCN. Isso decorre, em grande medida, da avaliação realizada pelos professores-pesquisadores que consideraram que, no final da disciplina, em virtude de uma maior familiaridade com os conceitos e significados adequados das expressões epistemológicas, uma maior objetividade nas perguntas não acarretaria prejuízos.

É importante realçar que, no questionário VOSE-EF, com exceção da Questão 1 (“Sobre os modelos científicos”), as demais oito questões são comuns ao questionário VOSE-RCN, embora, como já afirmado, as contextualizações das perguntas subtemáticas sejam distintas. Isso possibilita a realização de uma análise comparativa entre as concepções prévias e posteriores dos estudantes sobre a NdC, isto é, antes e depois da intervenção didática. Além disso, em algumas questões, optou-se por enriquecer o questionário VOSE-EF, apresentando de 1 a 3 itens adicionais. Essa escolha foi feita com o propósito de avaliar as concepções epistemológicas dos estudantes em diferentes e inéditas sentenças declarativas, reduzindo a possível influência de respostas eventualmente memorizadas e, ao mesmo tempo, aumentando a confiabilidade acerca da coerência e consistência dos respectivos posicionamentos. Como resultado, questionário VOSE-EF, apresenta um número de itens aproximadamente 26% maior em comparação às oito questões equivalentes do VOSE-RCN.

Durante essas duas etapas de coleta de dados, os estudantes que participaram como sujeitos da pesquisa) foram instruídos a escolher uma única alternativa de resposta, correspondendo àquela que melhor refletisse seu nível de concordância (ou discordância) em relação a cada um dos itens declarativos. No questionário VOSE-RCN, empregou-se o formato resposta itens tipo-Likert de cinco pontos: “discordo fortemente”; “discordo”; “indeciso”; “concorda”; “concorda fortemente”. No entanto, para o questionário VOSE-EF, optou-se pelo formato resposta itens tipo-Likert somente de quatro pontos, o que significa que a opção central “indeciso” foi excluída. Essa decisão foi tomada com a intenção de estimular e conduzir os estudantes a adotarem uma posição epistemológica específica sobre os aspectos de NdC investigados, uma vez que “[...] existe uma tendência por parte dos participantes de optar pelo

ponto médio nas escalas de 5 ou 7 pontos (viés da tendência central)” (Cohen; Manion; Morrison, 2000, p. 327).

A ampla maioria dos estudos encontrados na literatura de pesquisa em ensino de ciências que aplicaram o questionário original VOSE, com formato respostas itens tipo-Likert de cinco pontos, realizaram a análise e interpretação dos dados com base no cálculo do *ranking* médio (*RM*) para cada um dos itens declarativos (Chen, 2006; Liang *et al.*, 2008; Durbano, 2012; Burton, 2013; Biancolin, 2014; Cortez, 2019; Suttini; Errobidart; Caluzi, 2022)¹¹⁷. Isso implica calcular a média aritmética ponderada das frequências das respostas obtidas em cada item, atribuindo o valor mínimo de 1 para a opção “discorda fortemente” e o valor máximo de 5 à opção “concorda fortemente”.

Entretanto, alguns autores argumentam que a média (e o desvio padrão) não são parâmetros estatísticos adequados para esse tipo de instrumento de coleta de dados (formato respostas itens tipo-Likert) (Cohen; Manion; Morrison, 2000; Blaikie, 2003; Jamieson, 2004; Pimentel, 2010).

Isso se deve por algumas razões particulares. Em primeiro lugar, sabe-se que a média é bastante sensível a valores extremos, tornando-se não precisamente representativa quando a distribuição dos dados é assimétrica ou quando há valores extremos. Além disso, analisar apenas o valor da média, em apenas um item particular, pode-se facilmente cometer equívocos grosseiros ao elaborar inferências sobre as atitudes e/ou opiniões do grupo participante.

Tabela 1 - Exemplo fictício ilustrando os riscos metodológicos ao observar somente os valores da média (*ranking* médio) em uma afirmação particular em um questionário com formato respostas itens tipo-Likert.

Item: As notas nas provas escritas dos estudantes são um excelente indicador do desempenho dos professores de física em sala de aula.	Discorda Fortemente (1)	Discorda (2)	Indeciso (3)	Concorda (4)	Concorda Fortemente (5)	Ranking Médio
Grupo (A)	20	20	20	20	20	3
Grupo (B)	50	0	0	0	50	3
Grupo (C)	22	16	29	7	26	3
Grupo (D)	0	25	50	25	0	3

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Tabela 1 apresenta um caso extremo, utilizado como exemplo fictício. Quatro grupos distintos, cada um composto por 100 participantes, responderam a um item declarativo de um questionário sobre o tema Didática no Ensino de Ciências. Em todos os grupos, observou-se o mesmo valor médio de $RM = 3$ (“indeciso”). No entanto, ao considerar apenas esse valor médio

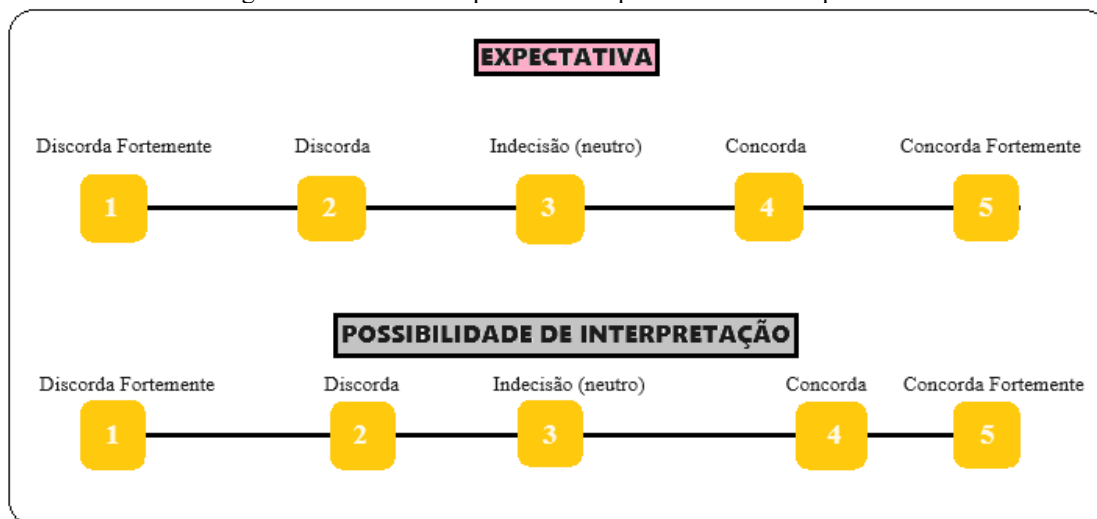
¹¹⁷ Como exceção, identificamos somente o trabalho realizado por Jayadinata, Hakam e Munandar (2019). Os autores optaram por descrever os resultados obtidos por meio do percentual de frequência em cada item.

— ignorando tanto a natureza discreta das respostas quanto a distribuição percentual das frequências — o pesquisador poderia inferir, de forma equivocada, que as quatro populações são idênticas. Tal interpretação não corresponderia aos posicionamentos efetivamente expressos pelos participantes.

Em segundo lugar, e mais significativo, os autores argumentam que não se pode assegurar que os respondentes perceberão todos os pares de níveis de concordância adjacentes como rigorosamente equidistantes quanto à intensidade do sentimento psicológico. Jamieson (2004) e Cohen, Manion e Morrison (2000) afirmam que é ilegítimo inferir que a intensidade do sentimento no formato respostas itens tipo-Likert entre as categorias “discorda fortemente” e “discorda” seja, de alguma forma, equivalente à intensidade do sentimento entre “concorda” e “concorda fortemente”.

Com efeito, os autores argumentam que os valores atribuídos a cada alternativa de respostas (*e.g.*, $RM=1$ a $RM=5$) indicam apenas a “ordem” das opções de respostas, e não a “força” do argumento. Logo, nessa perspectiva, deve-se levar em consideração que, para os sujeitos de pesquisa, “os intervalos podem não estar necessariamente espaçados uniformemente ao longo deste nível de continuum de concordância, embora os pesquisadores frequentemente assumam o contrário” (Blaikie, 2003, p. 24). A Figura 29 ilustra esse segundo argumento sobre o uso de questionário no formato respostas itens tipo-Likert.

Figura 29 - Formato respostas itens tipo-Likert de cinco pontos.



Nota: Contradição entre expectativa “equidistante” entre as categorias de respostas (dados intervalares) por diversos pesquisadores e a possibilidade de interpretação “não equidistante do grupo participante (dados ordinais).

Fonte: Adaptado de TwordsDataScience.com¹¹⁸.

¹¹⁸ Okan Bulut. **Likert Scales: friend or foe?** Disponível em: <https://towardsdatascience.com/likert-scales-friend-or-foe-76f865786fb7>. Acesso em: 23 out. 2023.

Esses autores sustentam que os manuais de metodologia estatística enfatizam que, quando se trata de dados ordinais – como é o caso em formato respostas itens tipo-Likert –, é mais apropriado utilizar a mediana (Md) ou a moda (M_o) como medida de tendência central, ou simplesmente a percentagem de frequência das respostas em cada categoria (Cohen; Manion; Morrison, 2000; Blaikie, 2003; Jamieson, 2004; Pimentel, 2010).

Com base no exposto, nesta pesquisa empírica, para cada item declarativo investigado, em ambos os questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, será considerado o valor da Md como objeto de análise para o tratamento dos dados. Contudo, visto que uma análise focada exclusivamente no valor da Md pode levar a inferências equivocadas, tal qual exemplificado anteriormente para o RM , também será necessário observar constantemente a distribuição percentual de frequência das respostas.

Além disso, com base na literatura de pesquisa em ensino e aprendizagem de aspectos da NdC, especialmente os estudos de Lederman *et al.* (2002), Lederman (2007), Lederman, N., Bartos e Lederman, J. (2014), Gil-Pérez *et al.* (2001) e Cachapuz *et al.* (2005), abordando a “visão consensual sobre a NdC” (cf. Capítulo 1), os professores-pesquisadores avaliaram as afirmações em cada item declarativo e atribuíram um “índice de referência especialista” (S), conforme a seguinte classificação, em consonância com os valores atribuídos ao formato resposta itens tipo-Likert de cinco pontos:

- $S=5,0$: item contém uma sentença “*bem informada*” sobre a NdC.
- $S=4,0$: item contém uma sentença “*parcialmente informada*” sobre a NdC.
- $S=2,0$: item contém uma sentença “*parcialmente distorcida*” sobre a NdC.
- $S=1,0$: item contém uma sentença “*distorcida*” sobre a NdC.

Uma sentença é considerada “*bem informada*” quando contém um ou mais conceitos metacientíficos “corretos”¹¹⁹ e, quando aplicável, a relação entre eles é também considerada precisa do ponto de vista da “visão consensual sobre a NdC”. Em contrapartida, uma sentença “*distorcida*” apresenta conceitos epistemológicos considerados “incorretos” e a ausência de qualquer relação entre eles. No caso das afirmações que foram classificadas como “*parcialmente informadas*” elas apresentam conceitos “corretos”, mas sem estabelecer uma relação entre eles ou estabelecendo uma relação equivocada. E, por fim, nas afirmações

¹¹⁹ A expressão “conceitos corretos” não dever ser interpretada em seu sentido literal, uma vez que é reconhecida a validade e a aceitação de distintas perspectivas epistemológicas. Portanto, para deixar explícito, objetiva-se com essa expressão indicar os conceitos que são compatíveis com os princípios heurísticos defendidos por autores que compartilham que a “visão consensual sobre a NdC” como pedagogicamente viável.

consideradas “*parcialmente distorcidas*” observa-se a presença de conceitos considerados “corretos” e “incorretos”.

Assim, para um item declarativo específico, com base no valor obtido para Md , derivado dos dados coletados, e com base no valor de S , atribuído pelos professores-pesquisadores com base na literatura, é possível inferir se as concepções epistemológicas do grupo de estudantes em relação ao aspecto de NdC investigado estão mais próximas ou mais distantes de uma compreensão mais bem informada de uma compreensão compatível com os estudos contemporâneos acerca da HFSC.

Com base nesses procedimentos metodológicos adotados para análise e interpretação de dados, as concepções epistemológicas dos estudantes foram categorizadas da seguinte maneira:

- **bem informada:** quando os valores de Md e S forem iguais ($Md=S$);
- **parcialmente informada:** quando a diferença (Δ) entre os valores Md e S for de no máximo um ($\Delta \leq 1$);
- **distorcida:** quando a diferença (Δ) entre Md e S for igual ou maior que dois ($\Delta \geq 2$);
- **divergência equilibrada:** exclusivamente nos casos em que o valor de Md for igual a três ($Md=3$), observando, nesse caso, obrigatoriamente, a congruência com os “percentuais de frequência” em cada alternativa.

Por fim, vale a pena mencionar que não se fez necessária a utilização de ferramentas destinadas a avaliar a confiabilidade das medidas por meio da “Análise de Consistência Interna” (independência da observação, homogeneidade da variância e distribuição normal – Harpe, 2015, p. 842), uma vez que o propósito do instrumento de coleta de dados não é comparar o desempenho dos estudantes em cada questão com o desempenho global do grupo participante. Em outras palavras, não se objetiva somar os índices individuais da Md dos diferentes itens declarativos que compõem os respectivos questionários, com o intuito de construir uma nota final para fins de comparação entre grupos¹²⁰. Em vez disso, a finalidade consiste exclusivamente na análise individual de cada questão e de seus respectivos itens, empregando abordagens qualitativas para interpretação e categorização das concepções dos participantes a respeito dos diversos aspectos inerentes à NdC.

¹²⁰ Isso seria obrigatório e apropriado somente no caso do uso de uma “Escala Likert” (somatória dos *scores* de múltiplos itens), em vez de um questionário no “formato respostas itens tipo-Likert” (*score* dos itens individuais). Para uma leitura e discussão mais aprofundada sobre a diferença entre essas duas metodologias de análise de dados, recomendamos as leituras de Clason e Dormody (1994), Carifio e Perla (2007, 2008), Brown (2011) e Harper (2015).

3.2.1.2 Avaliação da Organização Didático-Estrutural e Implementação da Disciplina

Apresenta-se nesta subseção os procedimentos metodológicos utilizados para analisar a organização didático-estrutural e a implementação da disciplina História da Ciência 2023-1 (unidade de ensino) com base nas percepções de estudantes.

As questões de pesquisa que pretendemos responder são: Quais os limites e as potencialidades de nossa proposta de ensino para a formação de futuros professores de física? De outro modo: Quais inferências podem ser produzidas a partir dos resultados da avaliação da organização didático-estrutural e da implementação da disciplina História da Ciência 2023-1, tanto na perspectiva dos professores-pesquisadores quanto dos estudantes?

Nesse sentido, foi conduzida uma análise abrangente e aprofundada sobre a organização e o desenvolvimento da disciplina. Foram empregados dois instrumentos de coleta de dados: (1) o *Questionário de Avaliação Geral*; e (2) os registros semanais de *Memórias & Reflexões* dos estudantes.

O primeiro instrumento, o “*Questionário de Avaliação Geral*”, é composto por dez questões fechadas, no formato respostas de itens tipo-Likert, além de 5 questões abertas. O objetivo foi contemplar uma variedade de aspectos da experiência formativa, permitindo simultaneamente uma leitura quantitativa e qualitativa dos resultados. As questões fechadas abordaram: a participação dos estudantes durante a disciplina (Questão 1), a qualidade dos textos históricos (Questão 2), os prazos estipulados para entrega das atividades (Questão 3), a condução das discussões e reflexões pelos professores-pesquisadores (Questão 4), a organização estrutural e sequência lógica da matéria de ensino abordada (Questão 5), a influência da disciplina para uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC (Questão 6) e em sua formação crítica enquanto futuros professores de física (Questão 7), além da avaliação geral da qualidade geral da disciplina como um todo (Questão 8). Ademais, foram incluídas questões sobre o tipo oferta (optativa ou obrigatória) da disciplina na matriz curricular de ambas as modalidades licenciatura (Questão 9) e bacharelado (Questão 10).

As cinco questões abertas foram incluídas para investigar as perspectivas dos estudantes quanto às modificações ou não de suas próprias concepções sobre NdC após cursar a disciplina (Questão 11), quanto o uso didático da História da Ciência (Questão 12) e implicações para sua futura prática docente (Questão 13), bem como para identificar as principais dificuldades e obstáculos encontrados ao longo da disciplina (Questão 14), e para permitir comentários livres

sobre outros aspectos considerados relevantes nessa experiência educacional (Questão 15). O questionário completo pode ser consultado no **Apêndice D**.

Esse questionário foi respondido de forma anônima no último encontro da disciplina por 22 estudantes (identificados por **E1**, **E2**, ..., **E22**).

O segundo instrumento consistiu nos registros semanais de *Memórias & Reflexões*, elaborados de forma livre pelos estudantes. Esses textos ofereceram um espaço para que expressassem percepções, interpretações e pontos de vista sobre os encontros semanais da disciplina. Trata-se de uma fonte de dados para a análise qualitativa, permitindo o acesso a experiências individuais, reações às abordagens pedagógicas empregadas, e manifestações espontâneas sobre a dinâmica do curso. Assim, os registros se configuram como ferramenta fundamental para a identificação de potencialidades, limitações e sugestões de aprimoramento da disciplina.

A análise dos registros concentrou-se em aspectos estreitamente relacionados às dimensões investigadas pelo “*Questionário de Avaliação Geral*”. Procuraram-se, em especial, manifestações que abordassem: (a) a participação e o comprometimento dos estudantes — incluindo frequência, realização de seminários, entrega de atividades e envolvimento nas discussões; (b) a qualidade dos textos utilizados — com atenção à linguagem, clareza, extensão e relevância; (c) o volume e prazos das atividades propostas; (d) a condução das discussões e reflexões pelos professores-pesquisadores; (e) a estrutura e a sequência lógica das aulas; (f) o impacto da disciplina na construção de uma imagem mais bem informada sobre a NdC; e (g) as possíveis contribuições da disciplina para a formação crítica e para a futura prática docente dos licenciandos.

As manifestações textuais foram classificadas como **menções explícitas** quando incluíam referências diretas e claras aos aspectos analisados, especialmente quando articuladas com termos-chave próprios da disciplina. Em situações nas quais o volume e a complexidade das menções justificaram, os dados foram organizados em **categorias interpretativas**, estruturadas indutivamente com base na frequência, consistência e riqueza de sentido das ideias centrais apresentadas pelos estudantes. Em alguns casos, essas categorias foram agrupadas por **eixos temáticos**, a fim de promover maior coerência analítica.

Foram analisadas, ao todo, 111 produções da atividade *Memórias & Reflexões*, elaboradas por 20 estudantes ao longo de oito encontros semanais (S1, S3, S4, S7 a S10 e S12). Para fins de identificação nos registros analisados, foram atribuídos nomes fictícios aos estudantes. A notação **Pedro – S12** ou **Pedro (S12)**, por exemplo, indica que o estudante identificado como Pedro fez referência explícita ao tema investigado durante a atividade

correspondente à Semana 12. Nas demais semanas, a atividade *Memórias & Reflexões* não foi solicitada, devido à realização de outras tarefas acadêmicas ou sobrecarga de atividades da própria disciplina de História da Ciência 2023-1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados empíricos a respeito das concepções prévias e posteriores dos estudantes sobre a Natureza da Ciência (NdC). Foi realizada uma análise qualitativa dos dados coletados, com o objetivo de avaliar se houve ou não uma evolução na compreensão epistemológica do grupo de participantes e se essa evolução foi significativa. Esses resultados possibilitaram aos professores-pesquisadores a construção de inferências relacionadas às possíveis influências das estratégias didáticas implementadas ao longo da unidade de ensino empregada na disciplina de História da Ciência 2023-1.

4.1 CONCEPÇÕES PRÉVIAS SOBRE A NDC – PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES

O questionário VOSE-RCN foi aplicado no segundo encontro (21 de março de 2023). Foram reservadas as quatro aulas para a realização dessa atividade (no total de 3h20min). Como objetivos específicos, estipulou-se: (i) coletar dados a respeito das concepções prévias dos estudantes acerca da NdC; (ii) estimular a autorreflexão dos estudantes sobre o processo de construção do conhecimento científico e (iii) despertar a curiosidade dos estudantes quanto às dificuldades e complexidades na compreensão da atividade científica. Nesse dia, 21 estudantes estavam presentes, e todos completaram a atividade.

Já o questionário VOSE-EF foi aplicado no último encontro (11 de julho de 2023). Ele foi respondido em aproximadamente 60 minutos. O objetivo da aplicação do VOSE-EF foi coletar informações acerca das concepções posteriores dos estudantes para os mesmos aspectos da NdC apresentados no VOSE-RCN. Nesse dia, 22 estudantes estiveram presentes, e todos realizaram a atividade. Verificou-se que, entre os 32 estudantes regularmente matriculados inicialmente, apenas 19 responderam a ambos os questionários, fornecendo dados completos para a análise. Dessa forma, foram excluídas as respostas de dois estudantes na etapa inicial de coleta de dados e de outros três estudantes na etapa final. Na Tabela 2 são apresentados os dados referentes à estrutura organizacional e a distribuição percentual de frequência de respostas para cada um dos itens declarativos no questionário VOSE-RCN.

Tabela 2 - Estrutura do questionário VOSE-RCN e a distribuição percentual das respostas em cada item.

Temas	Posição Epistemológica	Questões (Itens)	Concorda (C+ [CF]) (% [n])	Discorda (D+[DF]) (% [n])	Indecisão (I) (% [n])
Natureza do Conhecimento Científico (teorias e leis)	Revolucionária	1A	78,9 [15]	21,1 [4]	0
		2A*	42,1 [8]	52,6 [10]	5,3 [1]
	Acumulativa	1B	10,5 [2]	89,5 [17]	0
		2B*	36,8 [7]	52,6 [10]	10,5 [2]
	Evolucionária	1C	78,9 [15]	15,8 [3]	5,3 [1]
		2C	78,9 [15]	15,8 [3]	5,3 [1]
Uso da Imaginação e Criatividade	Sim	1D	5,3 [1]	94,7 [18]	0
		2D	15,8 [3]	73,7 [14]	10,5 [2]
		3A	84,2 [16]	10,5 [2]	5,3 [1]
	Não	3B	84,2 [16]	10,5 [2]	5,3 [1]
		3D*	31,6 [6]	63,2 [12]	5,3 [1]
		3C	31,6 [6]	0	68,4 [13]
Leis e Teorias (“comparação”)	Teorias são suposições hipotéticas	3E*	31,6 [6]	10,5 [2]	57,9 [11]
		4A	10,5 [2]	89,5 [17]	0
	Relação hierárquica	4B*	57,8 [11]	36,8 [7]	5,3 [1]
		4C *	36,8 [7]	31,6 [6]	31,6 [6]
	Diferentes tipos de ideias	4D*	42,1 [8]	15,8 [3]	42,1 [8]
		4F	73,7 [14]	15,8 [3]	10,5 [2]
Leis e Teorias (“epistemologia”)	Ideias idênticas	4G*	47,4 [9]	47,4 [9]	5,3 [1]
		4E*	42,1 [8]	52,6 [10]	5,3 [1]
	Descoberta	5A*	31,6 [6]	63,2 [12]	5,3 [1]
		5B*	15,8 [3]	47,4 [9]	36,8 [7]
	Construída	6A	26,3 [5]	73,4 [14]	0
		6B*	47,4 [9]	47,4 [9]	5,3 [1]
Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas	Ambas	5D	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		5E	73,7 [14]	15,8 [3]	10,5 [2]
		5F	84,2 [16]	5,3 [1]	10,5 [2]
		6D	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		6E	78,9 [15]	10,5 [2]	10,5 [2]
		6F	78,9 [15]	10,5 [2]	10,5 [2]
Metodologia Científica (“investigação científica”)	Evidência empírica (relativismo)	5C*	52,6 [10]	26,3 [5]	21,1 [4]
		6C*	36,8 [7]	36,8 [7]	26,3 [5]
	Paradigma	7A	73,7 [14]	21,1 [4]	5,3 [1]
		7B*	31,6 [6]	57,9 [11]	10,5 [2]
	Simplicidade (parcimônia)	7C*	26,3 [5]	63,2 [12]	10,5 [2]
		7F*	21,1 [4]	21,1 [4]	57,9 [11]
Natureza das Observações Experimentais	Status acadêmico (autoridade)	7D*	57,9 [11]	42,1 [8]	0
		7E*	57,9 [11]	31,6 [6]	10,5 [2]
	Intuição	7G	21,1 [4]	78,9 [15]	0
		7H*	57,9 [11]	31,6 [6]	10,5 [2]
	Fecundidade (fertilidade)	8E*	36,8 [7]	63,2 [12]	0
		8G	84,2 [16]	5,3 [1]	10,5 [2]
Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais)	“Método Científico” (Universal)	8A	73,7 [14]	15,8 [3]	10,5 [2]
		8B*	57,9 [11]	36,8 [7]	5,3 [1]
	Diversidade de métodos	8C*	57,9 [11]	36,8 [7]	5,3 [1]
		8D*	52,6 [10]	36,8 [7]	10,5 [2]
		8F	84,2 [16]	5,3 [1]	10,5 [2]
		9A	78,9 [15]	10,5 [2]	10,5 [2]
Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais)	Carregadas de teorias e valores	9B	15,8 [3]	78,9 [15]	5,3 [1]
		9E	78,9 [15]	0	21,1 [4]
	Desprovidas de teorias e valores	9F	84,2 [16]	10,5 [2]	5,3 [1]
		9C	10,5 [2]	89,5 [17]	0
	Objetividade (neutralidade)	9D*	21,1 [4]	47,4 [9]	31,6 [6]
		10A	15,8 [3]	84,2 [16]	0
Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais)		10B	0	0	100 [19]
		10C*	36,8 [7]	57,9 [11]	5,3 [1]
		10D	15,8 [3]	78,9 [15]	5,3 [1]
		10E	5,3 [1]	73,7 [14]	21,1 [4]

na Pesquisa Científica		10F*	26,3 [5]	68,4 [13]	5,3 [1]
		10J*	10,5 [2]	68,4 [13]	21,1 [4]
		10M	78,9 [15]	10,5 [2]	10,5 [2]
		11E*	68,4 [13]	21,1 [2]	10,5 [2]
		11F*	42,1 [8]	47,3 [9]	5,3 [1]
		11G*	52,6 [10]	42,1 [8]	5,3 [1]
		11I*	26,3 [5]	63,2 [12]	10,5 [2]
	Subjetividade (não neutralidade)	10G	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		10H	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		10I	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		10K	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		10L*	68,4 [13]	10,5 [2]	21,1 [4]
		11A	100 [19]	0	0
		11B*	68,4 [13]	26,3 [5]	5,3 [1]
		11C*	57,9 [11]	42,1 [8]	0
		11D*	52,6 [10]	5,3 [1]	42,1 [8]
		11H	73,4 [14]	15,8 [3]	10,5 [2]
Aspectos sobre a Natureza da Ciência					
Natureza da Ciência (geral) (Azevedo; Scarpa, 2017b)	Métodos de Investigação	12L	78,9 [15]	21,1 [4]	0
		12Y	5,3 [1]	78,9 [15]	15,8 [3]
	História e Criatividade	12B	15,8 [3]	84,2 [16]	0
		12D	100 [19]	0	0
		12E	10,5 [2]	89,5 [17]	0
		12J	0	100 [19]	0
		12T	10,5 [2]	78,9 [15]	10,5 [2]
		12U	5,3 [1]	89,5 [17]	5,3 [1]
		12Z	10,5 [2]	89,5 [17]	0
	Contexto Humano Cultura Interações Sociais	12P	84,2 [16]	15,8 [3]	0
		12O	26,3 [5]	73,7 [14]	0
		12A	89,5 [17]	10,5 [2]	0
		12C	0	100 [19]	0
		12D	100 [19]	0	0
		12E	10,5 [2]	89,5 [17]	0
		12F	100 [19]	0	0
		12G*	63,2 [12]	10,5 [2]	26,3 [5]
		12H	94,7 [18]	5,3 [1]	0
		12I	89,5 [17]	5,3 [1]	5,3 [1]
		12K*	36,8 [7]	47,4 [9]	15,8 [3]
		12X	5,3 [1]	94,7 [18]	0
	Financiamento e Economia	12D	100 [19]	0	0
		12I	89,5 [17]	5,3 [1]	5,3 [1]
		12M	10,5 [2]	73,7 [14]	15,8 [3]
		12N*	68,4 [13]	21,1 [4]	10,5 [2]
		12V*	63,2 [12]	36,8 [7]	0
	Comunicação e Transmissão	12W	10,5 [2]	89,5 [17]	0
		12Q*	15,8 [3]	68,4 [13]	15,8 [3]
		12R*	42,1 [8]	47,4 [9]	10,5 [2]
		12S	73,7 [14]	21,1 [4]	5,3 [1]
		12V*	63,2 [12]	36,8 [7]	0
		12X	5,3 [1]	94,7 [18]	0

C: concorda; CF: concorda fortemente; D: discorda; DF: discorda fortemente; I: indecisão; n: número.

* Itens declarativos nos quais percentuais majoritários de frequência das respostas do grupo de estudantes não ultrapassou 70%, sinalizando uma parcela considerável dos estudantes que podem apresentar opiniões contrárias.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Na Tabela 3 são apresentados os dados referentes à estrutura organizacional e à distribuição percentual de frequência de respostas para cada um dos itens declarativos no questionário VOSE-EF.

Tabela 3 - Estrutura do questionário VOSE-EF e a distribuição percentual das respostas em cada item.

Temas	Posição Epistemológica	Questões (Itens)	Concordância (C + [CF]) (% [n])	Discordância (D + [DF]) (% [n])
Modelagem Científica	Cópia exata da realidade	1B	0	100 [19]
		1E	10,5 [2]	89,5 [17]
	Abstrações da realidade	1A	100 [19]	0 [0]
		1C	89,5 [17]	10,5 [2]
		1D	84,2 [16]	15,8 [3]
		1F*	68,4 [13]	31,6 [6]
		1G	78,9 [15]	21,1 [4]
Natureza do Conhecimento Científico (teorias e leis)	Revolucionária	2A	94,7 [18]	5,3 [1]
		3A	84,2 [16]	15,8 [3]
	Acumulativa	2B	5,3 [1]	94,7 [18]
		3B	10,5 [2]	89,5 [17]
	Evolucionária	2C	73,7 [14]	26,3 [5]
		3C	84,2 [16]	15,8 [3]
	Absoluta	2D	0 [0]	100 [19]
		3D	5,3 [1]	94,7 [18]
	Falsificacionista ingênua	2E*	63,8 [12]	36,8 [7]
		3E*	52,6 [10]	47,4 [9]
Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias	Sim	4A	94,7 [18]	5,3 [1]
		4B	94,7 [18]	5,3 [1]
		4D*	42,1 [8]	57,9 [11]
		4F	94,7 [18]	5,3 [1]
	Não	4C	5,3 [1]	94,7 [18]
		4E	5,3 [1]	94,7 [18]
		4G	5,3 [1]	94,7 [18]
		4H	15,8 [3]	84,2 [19]
Leis e Teorias (comparação)	Teorias são suposições hipotéticas	5A	0	100 [19]
	Relação hierárquica	5B	15,8 [3]	84,2 [16]
		5C*	52,6 [10]	47,4 [9]
	Diferentes tipos de ideias	5D*	68,4 [13]	31,6 [6]
		5F	84,2 [16]	15,8 [3]
		5G***		
		5H	94,7 [18]	5,3 [1]
	Ideias idênticas	5E*	36,8 [7]	63,2 [12]
Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas	Evidência empírica (relativismo)	6A*	36,8 [7]	63,2 [12]
		6B	15,8 [3]	84,2 [16]
	Paradigma	6C	94,7 [18]	5,3 [1]
		6F*	63,2 [12]	36,8 [7]
	Simplicidade (parcimônia)	6D	94,7 [18]	5,3 [1]
	Status acadêmico (autoridade)	6E	100 [19]	0
	Intuição	6G*	47,4 [9]	52,6 [10]
	Fecundidade (fertilidade)	6H	84,2 [16]	15,8 [3]
Natureza das Observações Experimentais	Carregadas de teorias e valores	7A	89,5 [17]	10,5 [2]
		7B	5,3 [1]	94,7 [18]
		7E*	57,9 [11]	42,1 [9]
		7F	89,5 [17]	10,5 [2]
		7G	89,5 [17]	10,5 [2]
	Desprovidas de teorias e valores	7C	5,3 [1]	94,7 [18]
		7D	15,8 [3]	84,2 [16]
		7H	5,3 [3]	94,7 [18]
Metodologia Científica (investigação científica)	“Método Científico” (Universal)	8aA	26,3 [5]	73,7 [14]
		8bA	15,8 [3]	84,2 [16]
		8bC*	47,4 [9]	52,6 [10]
		8cE	15,8 [3]	84,2 [16]
		8cG	89,5 [17]	10,5 [2]

Influências Histórico-Sociais (valores socioculturais) na Pesquisa Científica	Diversidade de métodos	8aB	89,5 [17]	10,5 [2]
		8aC	94,7 [18]	5,3 [1]
		8bB	84,2 [16]	15,8 [3]
		8bD*	68,4 [13]	31,6 [6]
		8cA	84,2 [16]	15,8 [3]
		8cB	89,5 [17]	10,5 [2]
		8cC*	47,4 [9]	52,6 [10]
		8cD	84,2 [16]	15,8 [3]
		8cF	78,9 [15]	21,1 [4]
	Objetividade (neutralidade)	9A	5,3 [1]	94,7 [18]
		9B	0	100 [19]
		9C	10,5 [2]	89,5 [17]
		9D	0	100 [19]
		9E	5,3 [1]	94,7 [18]
		9F	5,3 [1]	94,7 [18]
		9J	21,1 [4]	78,9 [15]
		9M*	47,4 [9]	52,6 [10]
	Subjetividade (não neutralidade)	9G	100 [19]	0
		9H	100 [19]	0
		9I	100 [19]	0
		9K	94,7 [18]	5,3 [1]
		9L	73,7 [15]	21,1 [4]

C: concorda; CF: concorda fortemente; D: discorda; DF: discorda fortemente; n: número.

* Itens declarativos nos quais percentual majoritário de frequência das respostas do grupo de estudantes não ultrapassou 70%, sinalizando uma parcela considerável dos estudantes que podem apresentar opiniões contrárias.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Antes de abordar os resultados concernentes às concepções prévias e posteriores dos estudantes sobre a NdC, obtidos por meio da análise comparativa das respostas fornecidas pelos sujeitos da pesquisa às perguntas e itens declarativos virtualmente idênticos nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, será realizada uma análise e discussão das respostas a uma questão exclusiva do questionário VOSE-RCN (Questão 12). Essa questão abrange, simultaneamente, diversos aspectos históricos, sociológicos e epistemológicos sobre a NdC (cf. Tabela 2), fornecendo, assim, informações gerais e preliminares acerca das concepções prévias dos estudantes sobre a atividade científica.

A Questão 12 é uma das cinco questões originalmente propostas no estudo de Azevedo e Scarpa (2017b) – situação-problema (S3). Como pressuposto metodológico, julgou-se que a inserção de uma pergunta, cujos itens declarativos foram submetidos à análise crítica de outros especialistas em ensino de ciências, poderia contribuir para reforçar a confiabilidade das inferências produzidas.

A contextualização da Questão 12 envolve a controvérsia científica contemporânea sobre as causas do aumento do aquecimento global e das mudanças climáticas associadas. Embora o trabalho das autoras seja direcionado a professores de Ciências Biológicas em formação inicial, a escolha por essa questão baseou-se na hipótese de que o objeto de

conhecimento abordado é geral para estudantes universitários de cursos de ciências, contemplando também graduação em Biologia, Química e Física, caso do Curso de Graduação em que desenvolvemos a pesquisa. Para as demais questões propostas no estudo de Azevedo e Scarpa (2017b), considerou-se que poderia haver um risco de dificuldade no entendimento conceitual ou de desinteresse em fornecer respostas fidedignas por parte dos estudantes.

Diante desse contexto, no questionário VOSE-RCN, foi apresentado:

[Questão 12] Em um congresso, um grupo de cientistas debateu a questão do aquecimento global, tendo como base trabalhos científicos publicados anteriormente. Ao final do debate, um grupo considerou que o aquecimento dos últimos anos foi intensificado pelas ações do ser humano em decorrência do aumento de emissões de gases estufa. Para outro grupo, esta conclusão poderia estar equivocada, pois o aquecimento terrestre é decorrente de um fenômeno atmosférico natural (efeito estufa) e independe das ações humanas. Houve ainda um terceiro grupo, que considerou que o impacto humano em escala global é nulo e que a Terra pode, na verdade, esfriar.

Diante desse contexto, como você se posiciona em relação aos itens afirmativos abaixo?

O Quadro 8 mostra os diferentes aspectos da NdC investigados, com o enunciado dos 26 itens correspondentes. Na terceira coluna, as siglas I, P e B indicam se o item contém uma afirmação “*pouco informada*” (I), “*parcialmente informada*” (P) ou “*bem informada*” (B) sobre o processo de construção do conhecimento científico, de acordo com a nomenclatura e perspectiva epistemológica adotada por Azevedo e Scarpa (2017b). Na quarta coluna, são fornecidos os valores da mediana inicial [$Md(i)$], calculados a partir das respostas dos estudantes, e os valores do “índice de referência especialista” (S), definido com base no posicionamento das autoras e na literatura em ensino de ciências. Na última coluna é indicada a categorização das concepções prévias dos estudantes para cada um dos itens analisados, seguindo os critérios pré-estabelecidos por meio da comparação entre os valores de $Md(i)$ e S : “*bem informada*” (se $Md(i) = S$); “*parcialmente informada*” (se a diferença [Δ] for menor ou igual a 1, $\Delta \leq 1$); “*distorcida*” (se a diferença [Δ] for maior ou igual 2, $\Delta \geq 2$); ou “*divergência equilibrada*” (se $Md(i) = 3$) (cf. Capítulo 3, 3.2: Procedimento Metodológicos da Pesquisa Empírica).

Quadro 8 - Itens declarativos e resultados empíricos obtidos para a Questão 12 no Questionário VOSE-RCN.

Tema	Item Declarativo	Ideia	Resultados	Classificação
Métodos de Investigação	L. O impasse só poderá ser resolvido com experimentação.	I	$Md(i) = 4$ $S = 1$	“ <i>distorcida</i> ”

	Y. A ciência busca formular hipóteses testáveis, mas não precisa confrontá-las com o mundo real.	P	$Md(i) = 2$ $S = 2$	“bem informada”
História e Criatividade	T. O uso de uma analogia, como a contida no termo “efeito estufa”, descaracteriza um termo como científico.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	U. O uso da interdisciplinaridade descaracteriza o aumento do aquecimento global como um tema de interesse científico.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	**D. O uso de argumentos para defender uma posição deve fazer parte da prática científica.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	B. Neste caso, assim como na ciência em geral, apenas um dos grupos deve estar correto.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	*E. Reduz a credibilidade e a confiança na ciência, uma vez que não fornece uma verdade única para a população.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	*J. Apenas um dos grupos está correto, pois na ciência não há mais de uma perspectiva teórica vigente sobre um determinado assunto.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	Z. Dois dos posicionamentos não podem ser considerados científicos, pois o erro não é uma possibilidade na ciência.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
Contexto Humano	P. Impasses acontecem porque existe uma grande variação de personalidades humanas e, portanto, não há um único perfil de cientista.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
Interações Sociais entre Cientistas	O. O impasse deverá ser resolvido, pois a ciência é neutra.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	H. Abre a possibilidade de colaboração entre cientistas com pontos de vista semelhantes para fortalecer um dos posicionamentos.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	*I. Um dos grupos poderia convencer o outro, caso suas evidências fossem mais consistentes.	P	$Md(i) = 4$ $S = 4$	“bem informada”
	F. Revela a necessidade da revisão de pontos de vista pelos cientistas.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“bem informada”
	C. Não se caracteriza como uma prática científica, pois há pontos discordantes entre os cientistas.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	G. Os grupos podem estar corretos, dependendo da escala temporal de estudo.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	K. Os grupos só poderiam chegar a um consenso se utilizassem o mesmo contexto teórico para resolver o impasse.	I	$Md(i) = 3$ $S = 1$	“divergência equilibrada”
	A. Caracteriza uma discussão, que é um evento comum na prática científica.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	*X. Os posicionamentos publicados em revistas de alta credibilidade não são contestados.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”

Economia e Financiamento	M. O impasse poderá ser resolvido independente do contexto político e econômico.	B	$Md(i) = 2$ $S = 2$	“bem informada”
	N. O impasse poderá permanecer sem solução, pois a ciência está sujeita a interesses políticos e econômicos.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	W. Os temas de pesquisa de um cientista independem das fontes externas de financiamento.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
	V. Um cientista pode invalidar um posicionamento ao manipular os dados que favoreçam um posicionamento.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
Comunicação e Transmissão do Conhecimento	S. Os posicionamentos científicos publicados em revistas de maior credibilidade tendem a ser os mais aceitos e mais confiáveis.	B	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
	R. Para ser aceito na comunidade científica, um posicionamento precisa ser divulgado em meios de comunicação acessíveis para a sociedade.	I	$Md(i) = 3$ $S = 1$	“divergência equilibrada”
	Q. Para ser aceito na comunidade científica, um posicionamento não precisa ser publicado em uma revista científica.	I	$Md(i) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”

B: “bem informada”; I: “pouco informada”; P: “parcialmente informada”; $Md(i)$: mediana inicial; S : índice de referência especialista.

* Indica que o item também pode ser incluído em outro tema de Natureza da Ciência.

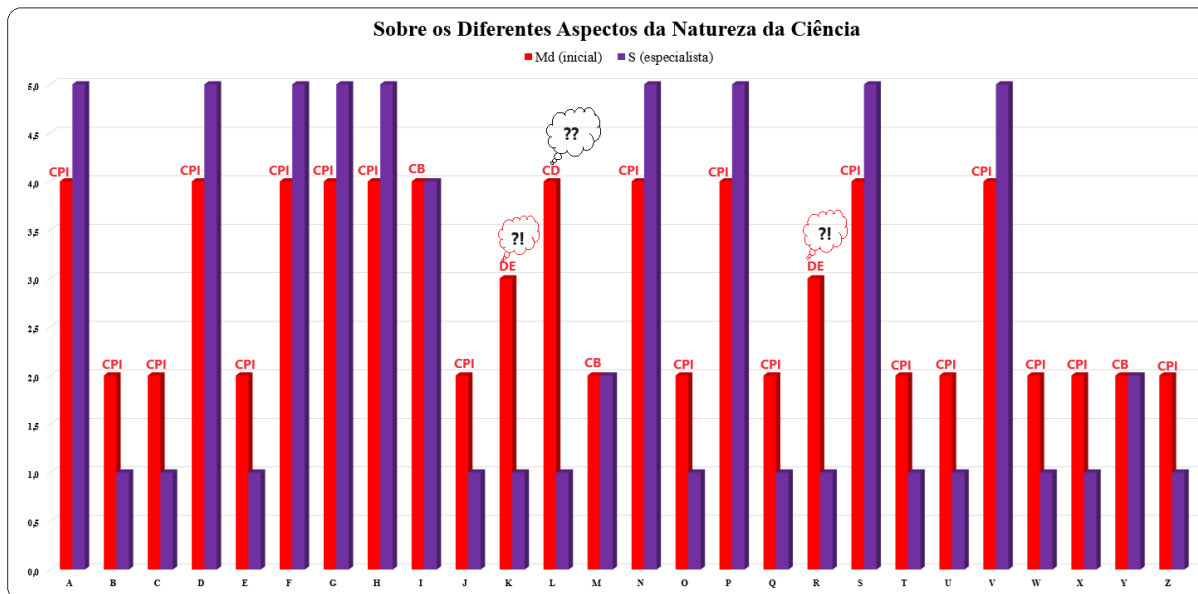
** Indica que o item também pode ser incluído em outros dois ou mais temas de Natureza da Ciência.

Fonte: Azevedo e Scarpa (2017b) e Banco de dados da pesquisa.

Observa-se que os itens apresentados abrangem seis aspectos relacionados à NdC: “métodos de investigação”; “história e criatividade”; “contexto humano”; “interações sociais entre cientistas”; “economia e financiamento”; e “comunicação e transmissão do conhecimento”. Nota-se, contudo, uma distribuição não equitativa, uma vez que mais da metade dos itens contém sentenças associadas a aspectos de caráter histórico e sociológico (“história e criatividade” [sete itens] e “interações sociais entre cientistas” [nove itens]), enquanto apenas dois itens se relacionam a aspectos de natureza epistemológica (“método de investigação”). Além disso, observa-se que dez itens são classificados como “bem informados” (B), 2 como “parcialmente informados” (P) e 14 “pouco informados” (I).

A Figura 30 ilustra, em formato de gráfico de barras, os valores da mediana inicial $Md(i)$ (barra vermelha) e do índice referência especialista S (barra roxa) para cada um dos 26 itens analisados. No topo de cada barra vermelha, estão indicadas as siglas que classificam as concepções prévias dos estudantes. Esse modelo de gráfico, amplamente utilizado ao longo deste capítulo, foi escolhido por oferecer uma visualização clara da categorização das respostas, assim como de sua maior ou menor proximidade em relação aos posicionamentos compatíveis com os estudos contemporâneos da HFSC, representados pelo índice S .

Figura 30 - Valores da mediana (Md) e do “índice de referência especialista” (S) para os vinte e seis itens declarativos da Questão 12 no questionário VOSE-RCN, abordando diferentes aspectos sobre a Natureza da Ciência.



CPI: “compreensão parcialmente informada”; CD: “compreensão distorcida”; CB: “compreensão bem informada”; DE: “divergência equilibrada”; Md: mediana; S: “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

De imediato, é perceptível que a ampla maioria das respostas (em 20 itens) foi categorizada como “parcialmente informada”. Em outros 3 itens (I, M e Y), as respostas foram classificadas como “bem informada”. Em 2 itens (K e R) o valor da $Md(i) = 3$ indicando “divergência equilibrada”¹²¹, corroborada pela seguinte distribuição percentual: $C+CF = 36,8\%$, $I = 15,8\%$ e $D+DF = 47,4\%$ para o item K; e $C+CF = 42,1\%$, $I = 10,5\%$ e $D+DF = 47,4\%$ para o item R. Somente em relação ao item L que a diferença (Δ) entre o valor de $Md(i)$ e S foi significativa ($\Delta \geq 2$), sendo as respostas dos estudantes categorizadas como compreensão “distorcida”.

Em virtude da diferença em relação às classificações dos demais itens, é pertinente uma discussão mais detalhada sobre o conteúdo investigado no item L. Neste item, foi apresentada a seguinte sentença: “L. O impasse só poderá ser resolvido com experimentação”. Essa declaração foi considerada “pouco informada” (I) por Azevedo e Scarpa (2017b) – conforme mostrado pelo $S = 1$. A afirmação L possui uma correlação epistemológica com a “visão empírico-indutivista e a-teórica” e a “visão rígida, algorítmica e infalível” do trabalho científico. A sentença sugere que uma controvérsia científica é resolvida exclusivamente por

¹²¹ Para os itens K e R, não foi observado um posicionamento majoritário, isto é, acima de 50%. Portanto, para esses dois itens, considera-se que a compreensão epistemológica da NdC do grupo de estudantes, como um todo, não pode ser classificada como “parcialmente bem informada” nem “parcialmente distorcida”, mas como “divergência equilibrada”.

meio da experimentação, transmitindo a ideia simplista de que essa é a única solução válida e, sobretudo, autossuficiente. Essa perspectiva desconsidera a relevância de outros fatores, incluindo a própria natureza da controvérsia científica, a análise da consistência interna e externa dos modelos teóricos. Não contempla a capacidade de predição e exploração de novos fenômenos, bem como as discussões entre especialistas, particularmente aquelas em relação às possibilidades de interpretações distintas e incompatíveis, igualmente válidas, para as mesmas evidências empíricas disponíveis.

No item L, a distribuição percentual das respostas foi: $C+CF = 78,9\%$ e $D+DF = 21,1\%$. O valor obtido de $Md(i) = 4$ representa numericamente o posicionamento dos estudantes. Dada a discrepância significativa entre os valores de $Md(i)$ e S , esse resultado sinaliza uma compreensão “distorcida” sobre o papel da experimentação no contexto das metodologias de investigação. Com efeito, esse resultado aponta para uma imprecisão em relação ao entendimento de que “o conhecimento científico é empiricamente fundamentado, isto é, que a ciência se baseia, pelo menos parcialmente, em observações do mundo natural” (Lederman *et al.*, 2002, p. 499)¹²². Assim, infere-se que os estudantes compreendiam esse aspecto da NdC de forma ingênua, com indícios de uma “visão experimentalista crédula”, acreditando que o consenso científico depende exclusivamente de observações empíricas conclusivas e irrefutáveis, as quais, por si só, mostrariam que uma das teorias concorrentes é verdadeira.

O resultado encontrado para o item L está em consonância com as conclusões de outros estudos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. Teixeira (2003), Massoni (2005), Gatti (2005), Cavalcante (2017) e Oliveira (2019) apontam que algumas concepções de NdC, em especial as ideias associadas à “visão empírico-indutivista e a-teórica” e à “visão rígida, algorítmica e infalível”, podem permanecer profundamente arraigadas na estrutura cognitiva de professores e estudantes. Esses autores constataram que, mesmo quando tais ideias pareciam ter sido superadas, tendiam a ressurgir persistentemente em outras situações não familiares. Eles concluíram que, mesmo em uma intervenção didática que tenha incorporado uma abordagem contextual explícita sobre aspectos da HFSC, é desafiador romper completamente com certas visões que são amplamente difundidas na sociedade por meios de divulgação científica e/ou reforçadas (in)conscientemente pelo próprio ensino de ciências.

Diante desses resultados preliminares, pode-se inferir que a ampla maioria das concepções prévias estava em consonância com aquilo que é pedagogicamente defendido para ser ensinado e aprendido sobre atividade científica. Esse cenário não era esperado pelos

¹²² Todas as citações em outros idiomas neste capítulo foram traduzidas pelos autores.

professores-pesquisadores. Em geral, a literatura de pesquisa em ensino de ciências tem relatado que professores de disciplinas de Ciências da Natureza e suas Tecnologias (Física, Química e Biologia), seja em formação inicial ou em efetivo exercício, apresentam imagens distorcidas, estereotipadas e de senso comum sobre o trabalho científico (Gil-Pérez *et al.*, 2001; Lederman *et al.* 2002; Cachapuz *et al.*, 2005; Lederman, 2007; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

Ao final do encontro da Semana 2 – quando foi aplicado o questionário VOSE-RCN -, os estudantes (da licenciatura), ao serem questionados sobre as dificuldades da atividade, mencionaram com entusiasmo a influência da disciplina de “*Metodologia e Prática de Ensino IV*”, cursada no semestre anterior à coleta de dados. Em suas falas, destacaram o papel formativo da professora – pesquisadora atuante na linha de HFSC – na construção de suas perspectivas epistemológicas sobre a NdC. Ressaltaram, ainda, a importância das leituras e análises críticas realizadas nessa disciplina, com destaque para quatro textos: (i) “Variações da História da Ciência no Ensino de Ciência” (Baldinato; Porto, 2008); (ii) “A Natureza da Ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz” (Forato, 2009); (iii) “Para uma imagem não deformada do trabalho científico” (Gil-Pérez *et al.*, 2001); (iv) “A Teoria das Cores de Newton: um exemplo do uso da História da Ciência em sala de aula” (Silva; Martins, 2003). Com base nessas manifestações, é razoável inferir que o resultado inicial observado deve ser creditado a essas discussões e reflexões desenvolvidas ao longo dessa experiência formativa anterior.

Ainda que a análise sistemática das *Memórias & Reflexões* seja desenvolvida somente no final deste capítulo, cabe aqui uma antecipação analítica ilustrativa. Após o primeiro encontro, em suas *Memórias & Reflexões*, quando questionado sobre mudanças ou reforços em suas convicções prévias, o estudante Jorge respondeu:

Durante a disciplina de Metodologia e Prática de Ensino de Física IV aprendemos diversos temas de História da Ciência que foram discutidos durante a aula do 14 de março, uma vez que um dos focos da disciplina (...) era explicar a relevância que História da Ciência possui na ciência como um todo. Tendo isso em vista, posso concluir que a primeira aula ministrada pelos docentes Prof. Dr. João Caluzi e Prof. Me. Ronivan reforçou conceitos que foram aprendidos anteriormente. Posso destacar a contribuição para o entendimento da relação entre aspectos de História, Filosofia e Sociologia das Ciências (**Jorge – S1**).

A fala de Jorge (S1) pode ser entendida como uma manifestação de reconhecimento e valorização de conteúdos já abordados em sua formação anterior. Ao afirmar que a aula “*reforçou conceitos que foram aprendidos anteriormente*”, infere-se uma possível ativação de

subsunções já presentes em sua estrutura cognitiva, especialmente no que diz respeito à articulação entre aspectos da HFSC. Embora não seja possível afirmar que houve um processo de aprendizagem significativa nos termos estritos da TAS (Ausubel, 2003) — dado o caráter introdutório dessa primeira aula em questão —, essa manifestação indica, ao menos, uma predisposição favorável à assimilação progressiva de novos significados ao longo da disciplina.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESPOSTAS AO VOSE-RCN E VOSE-EF

A seguir, será apresentada análise comparativa das respostas às demais questões comuns aos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, abordando cada aspecto da NdC de maneira individual, com maior profundidade e variedade de argumentos nos itens declarativos.

4.2.1 Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas

Em ambos os questionários, os estudantes foram solicitados a examinar 13 itens declarativos idênticos sobre esse aspecto da NdC. No questionário VOSE-RCN, perguntou-se:

[Questão 10] “Valores Socioculturais” são valores relacionados à cultura, à educação dos indivíduos e às normas de socialização. São exemplos: valores éticos, morais, humanos, religiosos, sociais, culturais, ambientais, ideológicos, entre outros. Os valores socioculturais podem variar de cultura para cultura, de época para época e, quase sempre, se modificam ao longo da história de cada sociedade. Dessa forma, em geral, não é raro que diferentes pessoas, instituições ou países defendam valores socioculturais totalmente antagônicos, tais como: “solidariedade vs individualismo”; “bem-estar social e humano vs propriedade privada e lucro”; “sustentabilidade ambiental vs dominação e exploração da natureza”; “igualdade e diversidade vs supremacia (racial, étnica, religiosa ou de gênero)”.

Nesse contexto, como você se posiciona quanto às afirmativas abaixo a respeito da influência ou não de elementos histórico-sociais na pesquisa científica?

Já no questionário VOSE-EF, indagou-se sucintamente:

[Questão 9] Diante das informações compartilhadas nesse curso de História da Ciência, tomando como recorte principal as investigações científicas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no início do século XX, como você se posiciona

quanto às afirmativas abaixo a respeito da influência ou não de elementos histórico-sociais na pesquisa científica?

Por meio dessas duas questões, objetivou-se verificar se os estudantes apresentavam o que Cachapuz *et al.* (2005) definiram como “visões descontextualizadas” do trabalho científico. Além disso, almejou-se identificar as possíveis razões que justificariam essa visão descontextualizada da NdC, entre elas: o treinamento e a formação científica (item A), a metodologia científica (itens B, E, J e L), a alegada autonomia científica quanto à escolha dos objetos de investigação (itens C, D e G), a suposta ausência de valores socioculturais nos enunciados científicos (itens F e M) e, de uma forma geral, a imagem de senso comum de isolamento do trabalho científico em relação ao contexto histórico-social, político e econômico (itens I e K).

No Quadro 9 apresentamos os enunciados dos itens declarativos investigados, bem como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes.

Quadro 9 - Itens declarativos a respeito das “influências histórico-sociais na pesquisa científica” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 10) e VOSE-EF (Questão 9). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
A. Com excelente treinamento e formação acadêmica, os cientistas são capazes de dedicar-se de forma imparcial, autônoma e livre da influência de valores socioculturais na realização de suas investigações científicas.	$Md(i) = 1$	“bem informada”
	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
B. O conhecimento científico é neutro, ou seja, não político, não ideológico e autônomo. Além disso, requer e possui um elevado grau de imparcialidade e objetividade; portanto, é livre da influência e da interferência de valores socioculturais.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
C. Os valores socioculturais não influenciam nem a direção e nem a escolha dos temas das investigações científicas, mas as aplicações tecnológicas da ciência podem ser julgadas como “boas” ou “más” de acordo com os valores socioculturais.	$Md(i) = 2$	“bem informada”
	$Md(f) = 2$	“bem informada”
	$S = 2$	
D. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque o direcionamento das pesquisas, isto é, a escolha dos temas, fenômenos e problemas a serem investigados, responde apenas ao interesse em desenvolver cada vez mais o conhecimento científico por si só.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
E. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque ela trabalha de acordo com os princípios do “método científico universal”, ou seja, a escolha racional entre hipóteses e teorias não envolve questões relacionadas a valores.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”

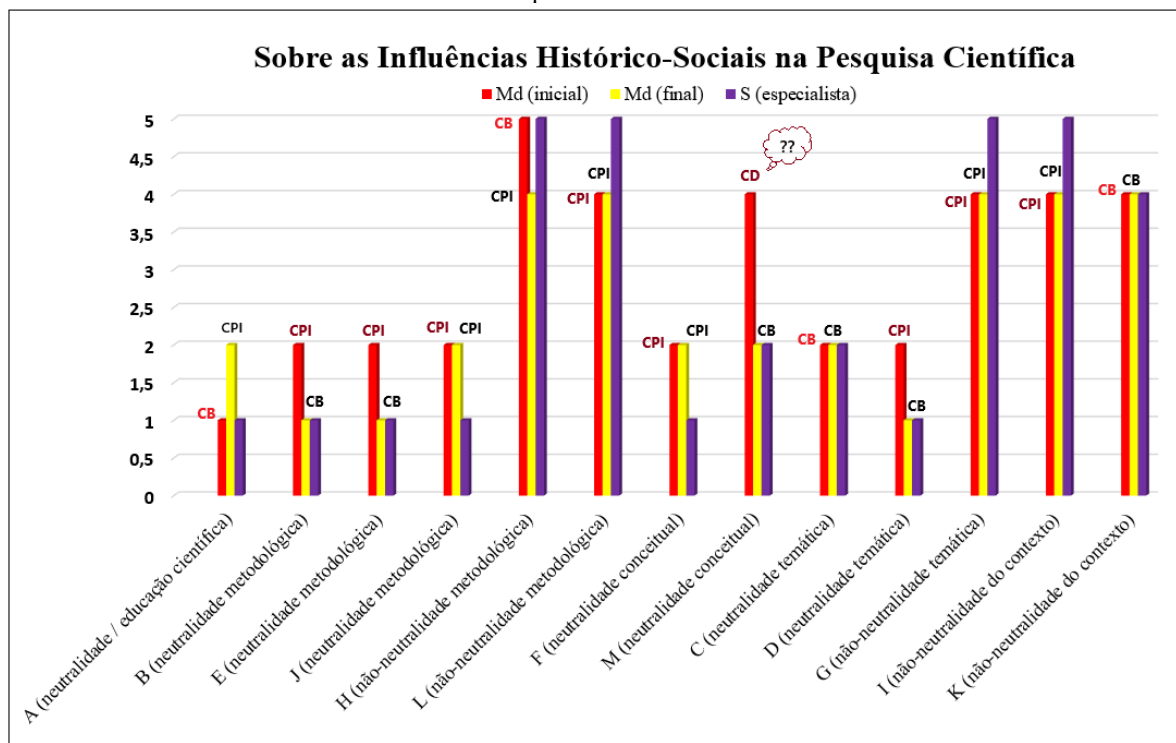
F. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque suas implicações lógicas não envolvem juízos de valor. Suas afirmações baseiam-se somente em evidências empíricas disponíveis, predições teóricas e na argumentação.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
G. Os valores socioculturais podem influenciar o direcionamento e a escolha dos temas e fenômenos nas pesquisas científicas, exercendo um papel muito relevante, por exemplo, na avaliação de possíveis impactos negativos de futuras aplicações tecnológicas.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
H. A ciência não é neutra, isto é, não está livre da influência de valores socioculturais, pois os próprios cientistas são inevitavelmente influenciados pelos valores de sua sociedade, os quais podem refletir em suas observações experimentais e interpretações.	$Md(i) = 5$	“bem informada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
I. A ciência não é neutra porque os fatores subjetivos não podem ser completamente eliminados, pois como atividade humana, a ciência é inevitavelmente influenciada por valores, crenças pessoais, vieses ideológicos, contextos políticos, econômicos e sociais.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
J. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais), porque as hipóteses e teorias científicas são aceitas ou rejeitadas com base no critério da adequação empírica entre experimentos e teorias; e esse processo certamente não inclui nenhum valor sociocultural.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
K. Embora a escolha de hipóteses e teorias científicas se baseie na confiabilidade das evidências empíricas disponíveis, ainda assim, a neutralidade científica é um mito, pois valores socioculturais e outros fatores subjetivos certamente estão presentes na ciência.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
L. A sociedade, por meio da defesa dos valores socioculturais de sua época, ao menos em alguns momentos, é capaz julgar e interferir nos métodos e nas normas de trabalho da ciência, bem como até mesmo influenciar na escolha de uma teoria científica.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
M. Valores socioculturais e outros aspectos subjetivos não têm relação com os fatos científicos em si, no entanto, juízos de valor têm implicações e influências sobre o interesse, sobre a relevância e sobre a aceitação ou rejeição de certas afirmações científicas.	$Md(i) = 4$	“distorcida”
	$Md(f) = 2$	“bem informada”
	$S = 2$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : índice de referência especialista.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Figura 31 ilustra o gráfico construído com os valores da Md obtidos para cada um dos itens avaliados nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF: $Md(i)$ em cor vermelha e $Md(f)$ em cor amarela. Também são mostrados os valores de S em cor roxa, estabelecidos com base nas informações fornecidas pela literatura relacionadas com resultados de pesquisa em HFSC e em ensino de ciências (cf. Capítulo 2). No topo ou lateral de cada barra vermelha e amarela, são identificadas as siglas correspondentes à classificação das concepções dos estudantes sobre esse aspecto da NdC e, abaixo, são mostrados os elementos centrais investigados em cada item.

Figura 31 - Valores da mediana e do “índice de referência especialista” para os questionários VOSE-RCN (Questão 10) e VOSE-EF (Questão 9) para o aspecto de Natureza da Ciência “Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica”.



Md: mediana; S: “índice de referência especialista”; CPI: “*compreensão parcialmente informada*”; CD: “*compreensão distorcida*”; CB: “*compreensão bem informada*”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

No que diz respeito às concepções prévias dos estudantes sobre as “Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica” (barras vermelhas), observa-se que em oito itens os valores de $Md(i)$ estão relativamente próximos aos valores de S ($\Delta \leq 1$), sinalizando que os estudantes apresentam uma compreensão “*parcialmente informada*” da NdC. Ao mesmo tempo, nota-se em outros quatro itens que os valores $Md(i)$ e S são iguais, indicando uma compreensão “*bem informada*” da NdC. No entanto, para o item M, observa-se uma discrepância significativa entre o valor de $Md(i) = 4$ e de $S = 2$, sinalizando uma compreensão “*distorcida*” da NdC.

Ao expressarem uma nítida concordância com a sentença do item M [$Md(i) = 4$ com percentual $C+CF = 78,9\%$ (15 estudantes)], pode-se inferir que, naquele momento, o grupo admitia certas influências de valores socioculturais na atividade científica, até mesmo no processo de escolha e validação do conhecimento científico, porém, rejeitavam a possibilidade de que os conteúdos em si, representados na forma de conceitos, observações empíricas, leis, teorias e modelos científicos, pudessem carregar e transmitir tais valores. Logo, pode-se afirmar que os estudantes reconheciam a existência da não neutralidade temática e metodológica na atividade científica, porém concordavam com uma suposta neutralidade conceitual em relação

ao conhecimento científico produzido. Contudo, observa-se que essa mesma justificativa de uma visão neutra ou descontextualizada da atividade científica foi investigada no item F, e o resultado obtido foi o oposto. Nesse caso, o valor de $Md(i) = 2$ com o percentual $D+DF = 68,4\%$ (12 estudantes), representa uma discordância do grupo em relação à sentença que sugere tanto uma neutralidade conceitual quanto metodológica, indicando, por sua vez, uma compreensão “*bem informada*” para esse item.

A contradição observada entre as respostas nos itens F e M pode ser explicada se for assumido que a atenção dos estudantes se concentrou muito mais na segunda parte de ambas as sentenças, nas quais eram avaliadas uma suposta neutralidade temática e metodológica no trabalho científico, em vez da primeira, na qual era enfatizada uma suposta neutralidade conceitual.

A Figura 31 também mostra os valores de $Md(f)$ (barras amarelas) obtidos a partir das respostas no questionário VOSE-EF (Questão 9). Pode-se observar que em todos os itens, com exceção para os itens A e H, as barras amarelas são idênticas às barras vermelhas ou se deslocam em direção às roxas, afastando-se em relação às barras vermelhas. Isso possibilita inferir que as diversas discussões e reflexões, realizadas de forma explícitas ao longo da disciplina, podem ter contribuído para o desenvolvimento de uma compreensão ainda mais bem informada da atividade científica quanto às “Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica”.

As reduções nos valores de Md para os itens A e H não são significativas, embora a categorização tenha mudado para “*parcialmente informada*”. Ocorre que, em ambos os questionários, as concepções dos estudantes acerca da não neutralidade metodológica foram investigadas em cinco itens distintos (itens B, E, J, H e L). Em conjunto, observa-se que em suas respostas finais, em três itens declarativos, os estudantes manifestam nítidas discordâncias em relação à ideia de neutralidade metodológica (itens B, E, J) e, ao mesmo tempo, exibindo coerência e consistência no posicionamento epistemológico, manifestam concordância nítida (item H e L) em relação à ideia de não neutralidade metodológica.

No que se refere ao item M, cuja concepção prévia havia sido classificada como “*distorcida*” da NdC, notou-se uma mudança de $Md(i) = 4$ (“*concordância*”), que representava cerca de 78,9% das escolhas dos estudantes, para $Md(f) = 2$ (“*discordância*”), o que corresponde a 47,4% de concordância ($C = 8$ e $CF = 1$) e 52,6% de discordância ($DF = 3$ e $D = 7$). Em outras palavras, o percentual de concordância reduziu e, ao mesmo tempo, o de discordância aumentou, ambos em aproximadamente 31,6%.

Esses dados são consistentes com as respostas posteriores encontradas para o item F, que investigou a mesma justificativa. O valor de $S = 1$ indica a transmissão de uma sentença

“*distorcida*” sobre a NdC. Nesse caso, observou-se valores de $Md(f) = Md(i) = 2$, dado que representa um posicionamento de discordância parcial em relação a uma suposta neutralidade conceitual e, conseqüentemente, resultando na categorização das concepções dos estudantes, em ambos os questionários, como compreensão “*parcialmente informada*” da NdC. Portanto, a partir da análise das respostas aos itens F e M, pode-se inferir que, após a intervenção didática, ocorreu uma mudança em relação à compreensão epistemológica a respeito da não neutralidade conceitual do conhecimento científico decorrente das influências histórico-sociais na atividade científica.

A literatura de pesquisa em ensino de ciências aponta resultados semelhantes em outras propostas de ensino sobre esse aspecto da NdC. As pesquisas de Teixeira (2003), Durbano (2012), Biancolin (2014), Cortez (2019) e Bertogna (2020) afirmam que professores e estudantes enfrentam poucas dificuldades em relação à compreensão sobre o papel dos contextos histórico-sociais, políticos, econômicos e científico-tecnológicos na construção do conhecimento científico. Além disso, indicam que os participantes reconhecem a influência mútua entre a ciência e a vida cotidiana das pessoas, e que, assim como outras atividades humanas, o trabalho científico também está sob a influência dos valores socioculturais compartilhados pela sociedade e das relações de poder ali presentes.

Durante a implementação da unidade de ensino na disciplina História da Ciência 2023-1, o aspecto da NdC “Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica” foi abordado em diversos momentos. Em particular, vale a pena mencionar a ênfase dada nas semanas 13 e 14, nas quais foi realizada a análise crítica da obra e da vida política do físico alemão Philipp Eduard von Lenard (1862-1947). Para isso, foram utilizados dois textos de caráter histórico, ambos produzidos neste estudo na etapa de pesquisa historiográfica (cf. Suttini, Caluzi e Errobidart, 2023b).

O primeiro texto foi a tradução do discurso de apresentação e da *Nobel Lecture* de Física de 1906, na qual Lenard apresentou um levantamento histórico das publicações que, em sua opinião, até aquele momento, trouxeram importantes realizações para a pesquisa sobre as propriedades e a natureza dos raios catódicos. Essas informações contribuíram para realçar o papel dos indivíduos/sujeitos e da comunidade científica, bem como para entender, de maneira profunda, as múltiplas complexidades envolvidas em uma controvérsia científica.

Esse texto possibilitou realizar discussões avaliando, em que medida, essa *Nobel Lecture* permitia uma problematização das sete imagens distorcidas sobre o trabalho científico, transmitidas pelo ensino de ciências, identificadas no estudo de Gil-Pérez *et al.* (2001). Constatou-se que somente a exploração e problematização da “visão descontextualizada e

socialmente neutra” era inviável, uma vez que as informações históricas privilegiavam os aspectos epistemológicos (problemas, métodos e conteúdo) e influências histórico-sociais relacionadas apenas ao contexto interno da atividade científica, negligenciando o contexto cultural externo.

Essa lacuna foi preenchida com a leitura e análise do segundo texto – (cf. Sutini, Caluzi, Errobidart, 2023b, Seção 4.2 (a): “A ‘*Deutsche Physik*’ sob a Liderança de Philipp Lenard e Johannes Stark” e Seção 4.2 (b): “Philipp Lenard: Raízes Sombrias ou Visões de Mundo Transformadas?”). Nesse texto, os autores exploram e problematizam a liderança dos físicos alemães Lenard e Stark, ambos laureados com o Prêmio Nobel, no movimento nazista “Física Alemã”, por meio de uma análise histórica, sociológica e epistemológica, incluindo questões éticas, morais e político-ideológicas relacionadas à atividade científica no contexto social na Alemanha, entre os anos de 1920 e 1938.

Nesse segundo texto, ao narrar historicamente os efeitos negativos da ideologia nazista sobre a ciência alemã – como a perda irreparável de talentos científicos e a supressão da livre troca de ideias e do pensamento crítico – foi possível argumentar de forma contextual e explícita que a atividade científica não está livre da influência dos valores socioculturais defendidos e compartilhados pela parcela dominante da sociedade em que é produzida. Consequentemente, o conhecimento científico não pode ser considerado neutro, autônomo ou imparcial.

4.2.2 Sobre a Natureza do Conhecimento Científico

Para cada questionário, foram elaboradas duas questões sobre o aspecto “A Natureza do Conhecimento Científico”, uma sobre teorias e outra sobre leis científicas. No questionário VOSE-RCN, foi indagado:

[Questão 1] Considere a existência de uma dada teoria científica bem estabelecida, consolidada e amplamente aceita pela comunidade científica, com apoio de inúmeras pesquisas relevantes e variadas observações experimentais disponíveis, as quais foram realizadas de forma diligente (isto é, de forma extremamente cuidadosa, com muito rigor e com total respeito às normas e preceitos da ciência), tendo sido até hoje confirmadas todas as predições dessa teoria científica. Um exemplo desse tipo de teoria pode ser a “**Teoria Microbiana da Doença**”. Essa teoria científica afirma que microscópicas entidades biológicas, como os micróbios, vírus, bactérias e os protozoários, presentes no ar, na água, na terra e até mesmo em outros seres vivos, são causadores de diversas doenças, tais como: tuberculose, cólera, sífilis; gonorreia, hanseníase, gripe, disenteria, covid-19, entre outras.

Essa teoria científica, amplamente aceita, adotada e defendida pela comunidade científica atual, ainda pode ser refutada e invalidada no futuro?

[Questão 2] Considere agora a existência de uma dada lei científica bem estabelecida, bastante consolidada e amplamente aceita pelos cientistas, com apoio de inúmeras pesquisas relevantes e variadas observações experimentais disponíveis, as quais foram realizadas de forma diligente (isto é, de forma extremamente cuidadosa, com muito rigor e com total respeito às normas e preceitos da comunidade científica), tendo sido, até hoje, confirmadas todas as predições desta lei científica. Um exemplo desse tipo de lei poderia ser a “**Lei da Inércia**” (1ª Lei de Newton), a qual estabelece que “todos os corpos tendem a permanecer em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, exceto na medida em que são obrigados a mudar esse estado por forças aplicadas sobre eles” (Newton, 1687, p. 12).

Essa lei científica, amplamente aceita, adotada e defendida pela comunidade científica atual, ainda pode ser refutada e invalidada no futuro?

Já no questionário VOSE-EF, perguntou-se objetivamente:

[Questão 2] A teoria quântica da luz de Albert Einstein, cujo desenvolvimento teve início em 1905, embora tenha sido rejeitada por muitos anos, foi modificada ao longo dos anos, é atualmente aceita pela comunidade científicas e possui muitas corroborações experimentais de seus enunciados.

O que se pode afirmar acerca da validade dessa teoria nos próximos 100, 200, 300 e até 1000 anos?

[Questão 3] A lei do efeito fotoelétrico ($K_{\text{máx}} = h \cdot f - W_0$), derivada por Albert Einstein em 1905, enfatizada na descrição e justificativa de seu prêmio Nobel de Física de 1921, é atualmente aceita pela comunidade científica e possui muitas corroborações experimentais acerca de sua validade.

O que se pode afirmar acerca da validade dessa lei científica nos próximos 100, 200, 300 e até 1000 anos?

O objetivo implícito nas quatro questões foi identificar se os estudantes compreendiam o caráter provisório – embora confiável – das teorias e leis científicas, materializado pelo processo de tentativa e erro, revisão e autocrítica permanente. Nesse caso, eles poderiam concordar com duas perspectivas epistemológicas: revolucionária ou evolucionária. Na primeira, admite-se a possibilidade futura de uma crise científica e, caso necessário, a substituição total de uma teoria (ou lei) bem-sucedida (item A). Na segunda, considera-se que as teorias (ou leis) naturalmente evoluem em rigor, precisão e abrangência, sofrendo diversas modificações ao longo do tempo, mas preservando seus conceitos estruturantes (item C).

Concomitantemente, por outro lado, buscou-se verificar se os estudantes exibiam uma “visão acumulativa e de crescimento linear” e uma “visão rígida, algorítmica e infalível” da NdC (item B), neste trabalho assumida conforme a descrição de Cachapuz *et al.* (2005); ou até mesmo uma concepção ainda mais dogmática e fechada de “verdade absoluta e definitiva” da

NdC (item D). Em ambos os casos, são descartadas modificações em teorias e leis já consolidadas e aceitas pela comunidade científica.

O Quadro 10 mostra os enunciados dos itens declarativos investigados, bem como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes.

Quadro 10 - Itens declarativos a respeito da “Natureza do Conhecimento Científico (Teorias)” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 1) e VOSE-EF (Questão 2). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.

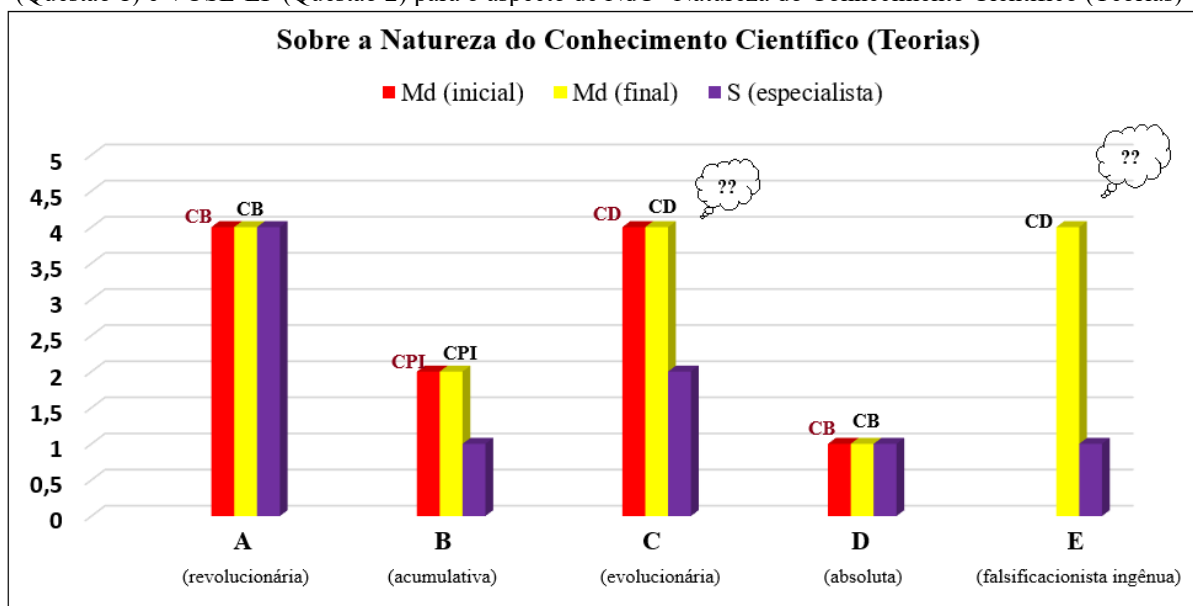
Itens Declarativos	Resultados	Classificação
A (VOSE-RCN). Não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica em microbiologia no futuro, portanto, pode ser necessário que um dia essa teoria tenha que ser substituída completamente por outra.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
A (VOSE-EF). Embora seja considerada bastante difícil, não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica sobre a natureza da luz no futuro. Dessa forma, diante de novas evidências (anomalias), pode ser necessário que a teoria quântica da luz tenha que ser substituída completamente por outra teoria.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
B (VOSE-RCN). Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, uma vez amplamente aceita, a teoria científica permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá no futuro.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
B (VOSE-EF). Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, sendo uma teoria amplamente aceita e corroborada nos dias de hoje, a teoria quântica da luz permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá ainda mais no futuro.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
C (VOSE-RCN). Com a continuidade das pesquisas, com novos dados e informações, essa teoria poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.	$Md(i) = 4$	“distorcida”
	$S = 2$	
C (VOSE-EF). Com a continuidade das pesquisas sobre a natureza da luz, com novos dados e informações, a teoria quântica da luz poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 2$	
D (VOSE-RCN). Essa teoria já foi cientificamente comprovada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita pelos cientistas. Ela alcançou o status de verdade absoluta. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.	$Md(i) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
D (VOSE-EF). A teoria quântica da luz já foi corroborada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita pelos cientistas nos dias de hoje. Ela alcançou o status de verdade absoluta e está incorporada definitivamente ao “corpus” de conhecimento científico da humanidade. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.	$Md(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
E (VOSE-RCN). Não se aplica.		
E (VOSE-EF). A “verdade científica” é uma flor muito frágil. Se no futuro os cientistas evidenciarem, sem sombra de dúvida, uma única nova observação empírica inconsistente e contraditória (anomalia) com a atual teoria quântica da luz, ela necessariamente terá de ser substituída por outra teoria científica.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Figura 32 ilustra os valores da Md obtidos para cada um dos itens investigados, bem como as siglas correspondentes à classificação das concepções dos estudantes sobre NdC. Abaixo, são mostradas as perspectivas de desenvolvimento científico investigadas. Pode-se notar também a inclusão do item E, pertencente de maneira exclusiva ao questionário VOSE-EF, exibindo uma perspectiva epistemológica do tipo “falsificacionista ingênua”. Por certo, o que se deseja é uma aprendizagem significativa e não uma aprendizagem memorística (de fácil esquecimento e, portanto, mecânica). Com esse item objetivou-se investigar o nível de concordância (ou discordância) dos estudantes em relação ao entendimento de que uma única evidência inconsciente e contraditória à teoria atualmente aceita, necessariamente levaria a uma substituição dela por outra teoria. Com a inclusão desse item não familiar no VOSE – EF (assim como ocorreu em outras questões), há melhor subsídios conceituais para a corroboração (ou não) de certas conclusões.

Figura 32 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 1) e VOSE-EF (Questão 2) para o aspecto de NdC “Natureza do Conhecimento Científico (Teorias)”.



Md : mediana; S : “índice de referência especialista”; CD: “*compreensão distorcida*”; CB: “*compreensão bem informada*”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A partir dos dados coletados, observa-se que apenas nos itens A e D os valores de $Md(i)$ coincidem com os valores do S . No item B, há uma diferença de uma unidade; no item C, de duas; e no item E, de três unidades. Desse modo, de maneira geral, as concepções prévias dos estudantes, em relação ao aspecto de NdC “Natureza do Conhecimento Científico (Teorias)”, podem ser interpretadas como “*parcialmente informada*”. As respostas dos estudantes indicam

uma nítida concordância tanto com a perspectiva revolucionária (item A) quanto com a perspectiva evolucionária (item C) [$Md(i) = 4$], embora, nesse último caso, tal concepção seja questionável a partir do nosso referencial epistemológico¹²³. Além do mais, evidenciam um posicionamento coerente e consistente mediante ao discordarem da perspectiva acumulativa e de crescimento linear (item B) [$Md(i) = 2$], bem como uma rejeição ainda mais enfática à visão de que os conhecimentos científicos, uma vez corroborados empiricamente, tornam-se são verdades absolutas e definitivas (item D) [$Md(i) = 1$].

A Figura 32 também mostra os valores de $Md(f)$ obtidos a partir das respostas ao questionário VOSE-EF (Questão 2), após a intervenção didática. Não se observa nenhuma alteração nos valores da Md , obtendo-se a igualdade $Md(i) = Md(f)$, e a conclusão de as concepções dos estudantes, em relação a esse aspecto da NdC, ainda permaneceram classificadas como “*parcialmente informada*”.

Contudo, entre os resultados observados, destaca-se, de forma insatisfatória, as respostas para o item adicional E não familiar (inédito), que aborda a perspectiva “falsificacionista ingênua”. Uma vez que a sentença transmite uma ideia “*distorcida*” [$S = 1$] sobre a NdC, esperava-se um posicionamento pelo menos de discordância por parte dos estudantes. Entretanto, o valor encontrado de $Md(f) = 4$ indica uma nítida concordância com a afirmação. Neste caso, em particular, torna-se importante notar que a distribuição percentual das respostas foi CF = 15,8%, C = 47,4%, D = 31,6% e DF = 5,3%, isto é, no total, 63,2% concordaram e 36,8% discordaram.

As concepções posteriores dos estudantes sobre a NdC, em relação a esse item E (perspectiva “falsificacionista ingênua”), foram classificadas como “*distorcida*”. Isso sugere que os estudantes não compreenderam – ou no momento da coleta de dados não se lembraram – que a “teoria clássica ondulatória-eletromagnética”, por exemplo, diante do conjunto de observações contraditórias, e após anos de tentativas persistentes com o objetivo de algum tipo de adequação empírica, não foi completamente substituída pela teoria quântica, mas, em vez disso, teve seu domínio e abrangência de validação restringidos a fenômenos puramente ópticos.

Em síntese, os dados indicam que as concepções dos estudantes, mesmo após a intervenção didática, permanecem predominantemente “*parcialmente informadas*”, com sinais

¹²³ Como se observa, dependendo da concepção epistemológica que se tem sobre o processo de construção do conhecimento científico, as concepções dos estudantes podem ser interpretadas como ‘bem informada’ ou não. Os autores (índice referência especialista), adotam a perspectiva (como em uma resposta kuhniana) de evolução via revolução, uma vez que evolução e revolução não são antíteses

de adesão seletiva a perspectivas epistemológicas mais críticas e históricas da ciência. No entanto, a concordância com o item E revela a persistência de uma visão “falsificacionista ingênua”, incompatível com o entendimento contemporâneo sobre o desenvolvimento da ciência. À luz da TAS (Ausubel, 2003), esse resultado é interpretado com base no entendimento de que certos aspectos da epistemologia da ciência – sobretudo aqueles que desafiam noções intuitivas fortemente enraizadas, como as de “erro”, de “refutação” e de “prova definitiva” – não são facilmente apreendidos ou modificados, exigindo tempo, continuidade e estratégias didáticas específicas para que novos significados sejam ancorados de forma estável e integrada à estrutura cognitiva dos estudantes.

No que concerne às dificuldades e facilidades nos processos de ensino e de aprendizagem das perspectivas revolucionária, acumulativa e evolucionária, a literatura apresenta resultados divergentes. Por um lado, Cavalcante (2017) e Cortez (2019) constataram que, ao término de suas disciplinas, os licenciandos ainda mantinham uma visão acumulativa e de crescimento linear do desenvolvimento científico. Por outro lado, Durbano (2012), Biancolin (2014) observaram que os licenciandos em biologia tendem a concordar com a perspectiva revolucionária e, ao mesmo tempo, discordam da visão acumulativa e de crescimento linear. Bertogna (2020) evidenciou que 39% dos sujeitos de pesquisa, bacharéis em física, concordaram que uma teoria científica se altera pelo acréscimo de novas informações, e que 33% consideraram a possibilidade de revisões e de aceitação de novos conhecimentos. Nenhum participante julgou uma teoria científica como algo inalterado. Massoni (2005) encontrou indícios de aceitação da natureza conjectural e provisória das teorias científicas, sendo esse o resultado mais frequente¹²⁴.

Os resultados evidenciados neste estudo assemelham-se fortemente aos encontrados por Teixeira (2003). O autor constatou que 88,8% dos estudantes concordavam com caráter provisório (de natureza tentativa e erro) das teorias científicas, estando sujeitas a transformações e até mesmo derrocadas, seja como partes de um mesmo sistema paradigmático ou competindo com outros paradigmas, apoiados em pressupostos e concepções diferentes.

O Quadro 11 apresenta os enunciados dos itens declarativos investigados sobre a “Natureza do Conhecimento Científico”, porém, especificamente no que se refere ao constructo “leis científicas”. Também são indicados os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes.

¹²⁴ Infelizmente, nos estudos mencionados, as perspectivas absolutas e falsificacionista ingênua do desenvolvimento científico não foram objetos de investigação. Portanto, não é possível fazer quaisquer comentários a esse respeito.

Quadro 11 - Itens declarativos a respeito da “Natureza do Conhecimento Científico (Leis)” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 2) e VOSE-EF (Questão 3). Resultados. Classificação das respostas dos estudantes.

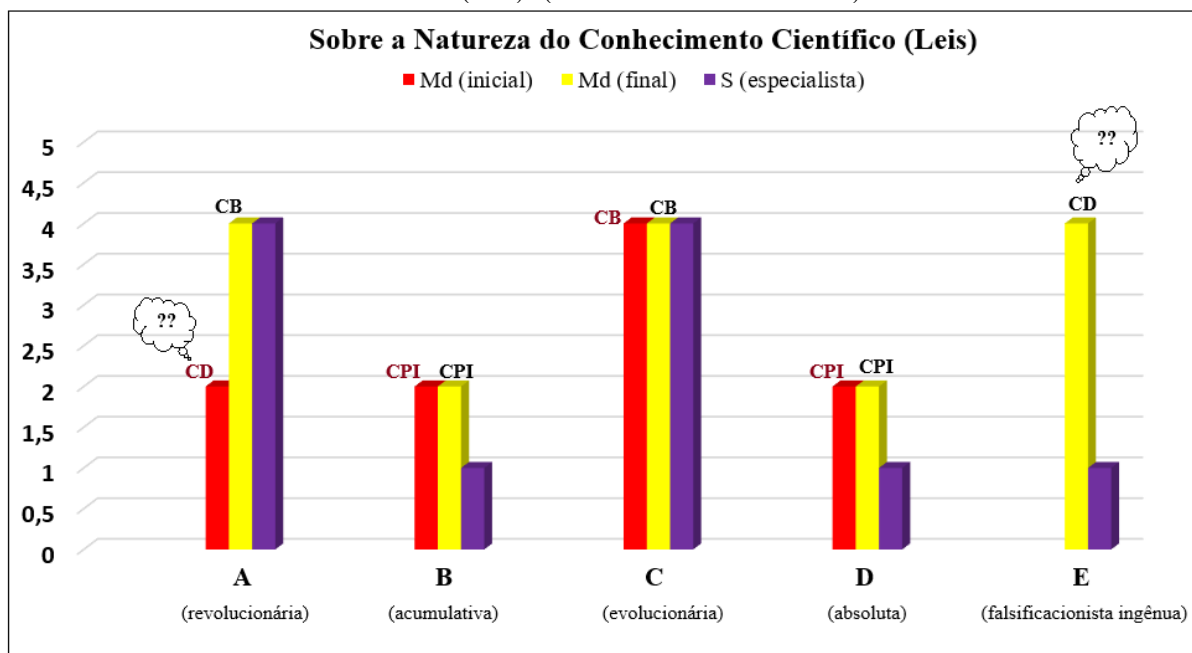
Itens Declarativos	Ranking Médio	Classificação
A (VOSE-RCN). Não é possível descartar que essa lei se mostrará inválida em uma nova observação experimental, gerando uma crise e uma mudança revolucionária, sendo necessária uma substituição completa da Lei da Inércia para explicação e descrição dos movimentos.	$Md(i) = 2$	“distorcida”
	$S = 4$	
A (VOSE-EF). Embora seja considerada bastante difícil, não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica sobre o efeito fotoelétrico no futuro. Dessa forma, diante de novas evidências, pode ser necessário que a “lei do efeito fotoelétrico de Einstein” tenha que ser substituída completamente por outra lei.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
B (VOSE-RCN). A comunidade científica somente aceita uma lei científica após um longo processo acumulativo de inúmeras e variadas evidências empíricas disponíveis. Portanto, a Lei da Inércia permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá no futuro.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
B (VOSE-EF). Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, sendo uma lei amplamente aceita e corroborada nos dias de hoje, a “lei do efeito fotoelétrico de Einstein” permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá ainda mais no futuro.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
C (VOSE-RCN). Com a realização de novas pesquisas, levantamento de dados e informações, a Lei da Inércia poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
C (VOSE-EF). Com a continuidade das pesquisas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, com novos dados e informações, essa lei poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
D (VOSE-RCN). As “Leis de Newton” para compreensão dos movimentos são comprovadas cientificamente há mais de 300 anos. Elas alcançaram o status de verdade absoluta. Logo, não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito por parte de outros cientistas.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
D (VOSE-EF). Nos últimos 100 anos, essa lei foi corroborada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita nos dias de hoje. Ela alcançou o status de verdade absoluta e está definitivamente incorporada ao “corpus” de conhecimento científico da humanidade. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
E (VOSE-RCN). Não se aplica.		
E (VOSE-EF). A “verdade científica” é uma flor muito frágil. Se no futuro os cientistas evidenciarem, sem sombra de dúvida, uma única nova evidência inconsistente e contraditória (anomalia) com a atual “lei do efeito fotoelétrico de Einstein”, ela necessariamente terá de ser substituída por outra lei científica.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa

A Figura 33 mostra os resultados da investigação sobre as mesmas cinco distintas perspectivas epistemológicas de desenvolvimento científico, porém referentes agora às leis científicas. O objetivo foi avaliar se as respostas dos estudantes sofreriam algum tipo de alteração caso a análise fosse conduzida em relação às leis científicas, em vez das teorias.

Figura 33 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 2) e VOSE-EF (Questão 3) para o aspecto de Natureza da Ciência “Natureza do Conhecimento Científico (Leis)” (contém 4-5 itens avaliativos).



Md: mediana; S: “índice de referência especialista”; CPI: “compreensão parcialmente informada”; CD: “compreensão distorcida”; CB: “compreensão bem informada”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Nota-se que os resultados para as concepções prévias dos estudantes para as perspectivas evolucionária e acumulativa – ilustrados na Figura 32 e na Figura 33 pelas barras vermelhas dos itens B e C – são idênticos, indicando concordância com a visão evolucionária e discordância com a visão acumulativa, tanto no contexto das teorias quanto das leis científicas. Entretanto, observa-se uma mudança de posicionamentos em relação às perspectivas revolucionária e absoluta (itens A e D), o que confirma a hipótese inicial de que os estudantes tendem a atribuir maior grau de certeza às leis científicas do que às teorias científicas – resultado condizente com uma “visão empírico-indutivista e a-teórica” da ciência.

Anteriormente, na Figura 32, para o item A, as respostas iniciais acerca do aspecto “Natureza do Conhecimento Científico” exibiam uma concordância com a perspectiva revolucionária (teorias) [$Md(i) = 4$], enquanto que agora na Figura 33, exibem uma nítida discordância [$Md(i) = 2$]. E para o item D, cujas respostas iniciais exibiam uma discordância enfática em relação à perspectiva absoluta [$Md(i) = 1$], com a divisão percentual de $C+CF = 10,5\%$ e $D+DF = 89,5\%$, agora exibem uma discordância menos acentuada [$Md = 2$]. Com efeito, a nova divisão percentual de $C+CF = 36,8\%$, $I = 10,5\%$ e $D+DF = 52,6\%$ correspondem a uma quase divergência equilibrada de posicionamentos [$Md(i) \approx 3$]. Esses resultados indicam que sete estudantes mudaram sua opinião acerca das perspectivas revolucionárias e absolutas

de desenvolvimento do conhecimento científico, quer fossem questionados sobre teorias ou leis científicas.

Em particular, no caso do item D, embora tenha sido obtido um valor de $Md(f) = Md(i) = 2$, discrepante do valor $S = 1$, a análise de distribuição percentual das respostas mostra uma evolução nas concepções epistemológicas dos estudantes. Os dados coletados indicam que, após a intervenção didática um aumento de 21,3% no percentual de discordância, embora o valor da Md tenha permanecido estável.

A análise da Figura 33 indica que, após a intervenção didática, os valores de $Md(i)$ e $Md(f)$ são iguais (exceto para o item A), porém, iguais ou próximo ao valor do índice referência S . Em termos gerais, esses números sugerem que as discussões e reflexões explícitas, ao longo da unidade de ensino da disciplina de História da Ciência 2023-1, cuja ênfase foi dada ao desenvolvimento inicial da teoria quântica da natureza da luz, por meio da análise histórica do avanço científico (não linear) sobre o entendimento do fenômeno do efeito fotoelétrico, não foi, em grande medida, eficaz para uma mudança nas concepções prévias dos estudantes.

Utilizou-se a expressão “em grande medida”, pois, novamente, observa-se que uma concordância [$Md = 4$] com a perspectiva “falsificacionista ingênua” (item E), que resultou em uma categorização como compreensão “*distorcida*”. Contudo, assim como no item D, observar apenas o valor da mediana pode produzir inferências imprecisas. Com efeito, a distribuição percentual das respostas para o item E indica que 15,8% “concordam fortemente”, 36,8% “concordam”, 42,1% “discordam” e 5,3% “discordam fortemente”. Ou seja, no total, 47,4% discordam e 52,6% concordam com a perspectiva “falsificacionista ingênua”. Portanto, nesse caso, tem-se de fato uma “*divergência equilibrada*”.

É importante realçar que na versão original do questionário VOSE (Chen, 2006) não se encontra uma pergunta que aborde de maneira específica a natureza do desenvolvimento científico no contexto das leis científicas, apenas o constructo teorias científicas são abordadas. Em outros questionários destinados a fazer um levantamento das concepções de NdC de professores e estudantes, como a série de questionários VNOS (Lederman *et al.*, 2002), esse aspecto também não é investigado. Além disso, as perspectivas “absoluta” e “falsificacionista ingênua” também não são contempladas nem nenhum dos dois questionários mencionados. Aparentemente, a hipótese de discrepância nas respostas dos estudantes às mesmas perguntas sobre leis e teorias, e sua confirmação, e a tendência em concordar com a perspectiva “falsificacionista ingênua”, representam uma contribuição original deste estudo.

O caráter provisório do conhecimento científico foi abordado de modo explícito na implementação da unidade de ensino da disciplina História da Ciência 2023-1. Na semana 9,

foi realizada uma aula expositiva dialogada sobre o desenvolvimento e a consolidação da teoria clássica do eletromagnetismo ao longo do século XIX, tradicionalmente representada pelas quatro equações de James C. Maxwell (1831-1879). O objetivo foi enfatizar que essa teoria era considerada, na virada do século XX, uma das teorias mais bem-sucedidas e abrangentes de toda a Física, pois unificava quatro áreas distintas: óptica, ondulatória, eletricidade e magnetismo. Posteriormente, nas semanas 12 e 13, foram conduzidas leituras e análises a respeito das investigações experimentais de Hertz e de Lenard sobre o efeito fotoelétrico e a natureza dos raios catódicos, mostrando que a teoria clássica do eletromagnetismo era o referencial teórico adotado por esses cientistas ao realizarem a busca por explicações para as propriedades dos fenômenos investigados.

Logo após, na semana 15, a leitura e discussão em sala de aula da tradução do artigo de Einstein de 1905 – “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” – representou um momento crucial na estrutura didático-organizacional da unidade de ensino. Foi mostrado, de forma explícita, que o conhecimento científico, embora confiável e duradouro, jamais pode ser considerado uma verdade absoluta e definitiva, independentemente da extensão das evidências empíricas a seu favor. A fragilidade de uma visão absoluta e definitiva dos conhecimentos científicos foi enfatizada, por exemplo, nas discussões e reflexões referentes à introdução do artigo, na qual Einstein propõe uma limitação de validade para a teoria clássica do eletromagnetismo. Ele afirmou:

A teoria ondulatória da luz, que faz uso de funções espaciais contínuas, confirmou-se de forma excepcional na descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente nunca será substituída por outra teoria. Deve-se ter em mente, porém, [...] que a teoria da luz, operando com funções espaciais contínuas, leva a contradições quando aplicadas aos fenômenos de emissão e transformação da luz”. De fato, parece-me que as observações da “radiação de corpo negro”, “fotoluminescência”, “produção de raios catódicos por luz ultravioleta”, e outros fenômenos associados à emissão ou transformação da luz, podem ser mais facilmente entendidas se admitirmos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço (Einstein, 1905, p. 132-133).

Nesse momento, os professores-pesquisadores realçaram que Einstein estava propondo, de maneira audaciosa e revolucionária, uma restrição na abrangência dos fenômenos que poderiam ser explicados pela teoria clássica do eletromagnetismo, em particular, aqueles denominados “puramente ópticos”, que estão diretamente associados à propagação e transmissão de ondas eletromagnéticas. E que, de acordo com o pensamento epistemológico de Einstein, os fenômenos envolvendo a interação entre luz e matéria (*e.g.*, “radiação de corpo negro”, “fotoluminescência” e “efeito fotoelétrico”), poderiam ter suas propriedades e

observações mais bem compreendidas a partir da aplicação de sua hipótese heurística de “*quantum* de luz”, ou seja, a partir de sua “teoria quântica da luz”.

Nas duas semanas seguintes, ao explorar três tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico e as investigações experimentais de Robert Millikan sobre a “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein, buscou-se discutir explicitamente como os novos acontecimentos nas duas primeiras décadas do século XX, incluindo a evolução das pesquisas científicas relacionadas ao efeito fotoelétrico, contribuíram para a confirmação de que a teoria clássica do eletromagnetismo, até então amplamente aceita, era incapaz de explicar os fenômenos envolvendo absorção e emissão de luz.

Nesse contexto, ao considerar o planejamento didático e os resultados derivados das respostas dos estudantes sobre as perspectivas revolucionária, evolucionária, acumulativa e absoluta do desenvolvimento científico, exibindo concordância com as duas primeiras e, ao mesmo tempo, discordância em relação às duas últimas, pode-se inferir que a disciplina História da Ciência 2023-1 forneceu importantes subsídios para uma compreensão mais bem informada do trabalho científico.

No entanto, identificou-se como concepção distorcida da NdC a perspectiva “falsificacionista ingênua”, necessitando de maior atenção em eventuais pesquisas futuras. Essa dificuldade, talvez, possa ser explicada com base nos apontamentos de outros estudiosos sobre os processos de ensino e de aprendizagem de aspectos da NdC.

Clough (2007) e Martins (2015) expressaram preocupações em relação às possibilidades de interpretações radicais indesejadas como resultado das tentativas de desconstrução de concepções equivocadas da NdC. Clough (2007), por exemplo, relatou:

Estudantes com frequência veem as coisas como preto ou branco. Por exemplo, quando discutia o caráter histórico provisório da ciência, há alguns anos, ao ensinar ciências na escola secundária, meus estudantes saltavam do extremo de ver a ciência como conhecimento absolutamente verdadeiro para o outro extremo, como conhecimento não confiável. Era necessário muito esforço para movê-los para uma posição mais intermediária. Colegas contaram-me sobre estudantes que perguntavam por que eles tinham que aprender o conteúdo científico se ele estava sempre mudando (Clough (2007, p. 34).

Considerando essa possibilidade, as respostas para a perspectiva “falsificacionista ingênua”, tanto para leis quanto para teorias científicas, parecem refletir uma preocupação excessiva dos estudantes em discordar fortemente da perspectiva absoluta e definitiva. As atividades planejadas e realizadas na semana 15 (leituras e seminário), sobre as persistentes

tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, aparentemente não foram suficientes para que os estudantes compreendessem a insustentabilidade dessa visão distorcida da NdC.

4.2.3 Sobre a Natureza das Observações Experimentais

No que tange ao aspecto “Natureza das Observações Experimentais”, a ênfase foi dada às possíveis influências a que os cientistas estão sujeitos durante os processos de coleta, análise e interpretação de dados empíricos. No questionário VOSE-RCN, foi indagado:

[Questão 9] É bastante discutido na História, Filosofia e Sociologia das Ciências se as observações experimentais realizadas por um grupo de cientistas foram influenciadas ou não por suas crenças pessoais, valores socioculturais, preferências teóricas e metodológicas, ideologias e, em especial, por suas expectativas futuras com os resultados da pesquisa: lucro, fama; prestígio etc.

Na sua opinião, é válido, razoável e seguro dizer que cientistas, agindo o mais honestamente possível, podem relatar observações experimentais diferentes, até mesmo contraditórias, na mesma época, para um mesmo fenômeno ou problema que está sendo investigado [e.g., doença infecciosa]?

Já no questionário VOSE-EF, questionou-se de forma idêntica:

[Questão 7] É bastante discutido na História, Filosofia e Sociologia das Ciências se as observações experimentais realizadas por um grupo de cientistas foram influenciadas ou não por suas crenças pessoais, valores socioculturais, preferências teóricas e metodológicas, ideologias e, em especial, por suas expectativas futuras com os resultados da pesquisa: lucro, fama; prestígio etc.

Diante das informações compartilhadas nessa disciplina de História da Ciência, tomando como recorte principal as investigações científicas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no início do século XX, você considera válido, razoável e seguro dizer que cientistas, agindo o mais honestamente possível, podem relatar observações experimentais diferentes, até mesmo contraditórias, na mesma época, para um mesmo resultado experimental?

O objetivo principal nas duas questões foi investigar se os estudantes concordam ou discordam dos itens declarativos que, de maneira explícita, sugerem que as observações experimentais, relativas a um mesmo fenômeno, podem ser diferentes devido às antecipações ou concepções dos cientistas (itens A, F e G). Esses itens sustentam que as observações são carregadas de teorias subjacentes e, adicionalmente, salientam que é impossível e, até mesmo indesejável, eliminar por completo a presença de elementos subjetivos no trabalho científico.

Também foram examinadas as influências de outros fatores, a saber: crenças pessoais e preferências teóricas – “*subjetividade*” – (itens A e F); educação formal e treinamento científico (item B e C); aplicação do “método científico” (E e H); a natureza pura dos dados experimentais (D); e limitações e incertezas do conhecimento científico disponível (G). Em particular, para avaliar a coerência e a consistência dos posicionamentos, as declarações nos itens C, D e H compartilham elementos que caracterizam uma interconexão entre a “visão empírico-indutivista e a-teórica” e a “visão rígida, exata e infalível”, conforme descrito por Cachapuz *et al.* (2005). Esses itens sugerem que existe na prática científica objetividade máxima, imparcialidade e neutralidade metodológica, o que resultaria em observações experimentais desprovidas de quaisquer influências de teorias subjacentes, valores e crenças.

O Quadro 12 mostra os enunciados dos itens declarativos investigados a respeito da “Natureza das Observações Experimentais”. Também são indicados os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes.

Quadro 12 - Itens declarativos a respeito da “Natureza das Observações Experimentais” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 9) e VOSE-EF (Questão 7).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
A (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque diferentes valores e crenças levam a diferentes expectativas que, por sua vez, influenciam na coleta e análise de dados.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
A (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque diferentes preferências teóricas, valores e crenças pessoais levam a diferentes expectativas que, por sua vez, influenciam na coleta e análise de dados.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
B (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque os cientistas formados na mesma área de pesquisa possuem ideias muito semelhantes.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
B (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque os cientistas formados na mesma área de pesquisa possuem ideias muito semelhantes.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
C (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque a excelente formação e treinamento acadêmico possibilitam que cientistas abandonem seus valores e crenças pessoais, tornando-se neutros e objetivos na condução de suas pesquisas.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
C (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque a excelente formação e treinamento acadêmico possibilitam que cientistas abandonem suas preferências teóricas, valores, crenças e interesses, tornando-se neutros, imparciais e objetivos na condução de suas pesquisas.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
D (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque as observações experimentais são exatamente aquilo que nós vemos e nada mais. Fatos são fatos.	$Md(i) = 3$	“divergência equilibrada”
	$S = 1$	

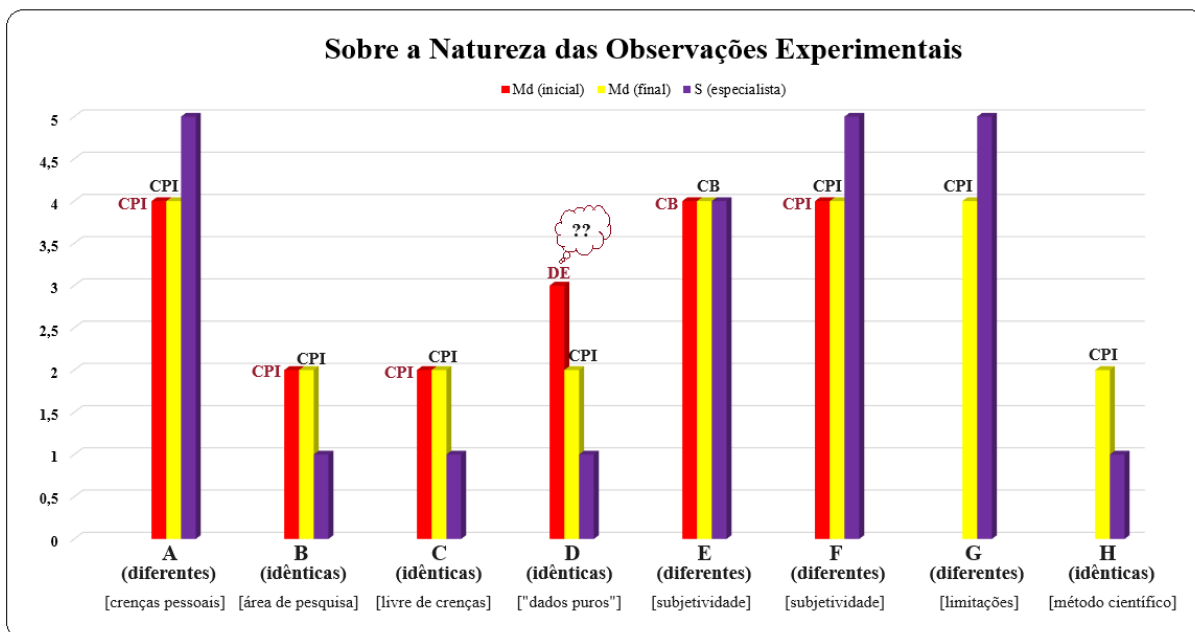
D (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque as observações experimentais são exatamente aquilo que nós vemos e nada mais. As observações experimentais são meramente uma reprodução objetiva do mundo exterior. Fatos são fatos, e contra fatos científicos não há argumentos.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
E (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos. Embora a subjetividade não possa ser completamente eliminada na observação, a ciência adota mecanismos eficientes para melhorar sua objetividade, como a publicidade dos resultados e a revisão por pares.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
E (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos. Embora a subjetividade e os vieses pessoais não possam ser completamente eliminados, a prática científica adota mecanismos eficientes para melhorar sua objetividade e imparcialidade, como a publicidade dos estudos científicos e a revisão por pares.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 4$	
F (VOSE-RCN). Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, embora as imagens formadas na retina sejam exatamente iguais. Porém, a interpretação é não neutra, isto é, aquilo que cada cientista percebe é influenciado pelo contexto e por fatores subjetivos.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
F (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, embora as imagens formadas na retina sejam exatamente iguais. Porém, a interpretação é não neutra, isto é, aquilo que cada cientista percebe e compreende é influenciado pelo contexto e por fatores subjetivos.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
G (VOSE-RCN). Não se aplica.		
G (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque a complexidade dos fenômenos estudados, o conhecimento científico disponível e as limitações inerentes aos testes experimentais podem permitir diferentes interpretações para o mesmo resultado experimental.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
H (VOSE-RCN). Não se aplica.		
H (VOSE-EF). Os relatos das observações experimentais devem ser idênticos, porque o uso rigoroso e diligente do “método científico” Hipotético-Dedutivo não admite interpretações diferentes para o mesmo resultado experimental.	$Md(f) = 2$	“bem informada”
	$S = 1$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Figura 34 ilustra o gráfico com os valores da Md correspondentes aos itens avaliados, assim como S , e as classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes. Nela, pode-se observar que para o primeiro conjunto (itens A, E e F) – observações experimentais diferentes – as concepções prévias dos estudantes foram categorizadas como “parcialmente informada” ou como “bem informada”, indicando uma tendência em concordar com as declarações que sugerem que as observações experimentais são carregadas de teorias subjacentes, valores e crenças pessoais, e sujeitas às divergências devido às limitações do conhecimento científico.

Figura 34 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 9) e VOSE-EF (Questão 7) para o aspecto de NdC “Natureza das Observações Experimentais”.



Md: mediana; S: “índice de referência especialista”; CPI: “*compreensão parcialmente informada*”; DE: “*divergência equilibrada*”; CB: “*compreensão bem informada*”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa

Quanto ao segundo conjunto (itens B, C e D) – observações experimentais idênticas – as respostas exibem certa coerência e consistência mediante a tendência em discordar das afirmações apresentadas nos itens B e D, sendo classificadas também como “*parcialmente informada*”. Como única exceção, nota-se uma “*divergência equilibrada*” para o item D [$Md = 3$]. Esse resultado é corroborado pela distribuição percentual das respostas iniciais igual a 21,1% “discordância”, 31,6% “indecisão” e 47,4% “concordância”, mostrando que não havia uma opinião majoritária entre os estudantes.

No item D foi afirmado: “D. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente as mesmas, porque as observações experimentais são exatamente aquilo que nós vemos e nada mais. Fatos são fatos”. A sentença transmite uma ideia ingênua de que as observações experimentais são obtidas por meio de “dados puros”. Essa afirmação sobre a NdC foi considerada “*distorcida*” ($S = 1$) pelos professores-pesquisadores (especialistas), pois não leva em consideração a complexidade da observação empírica na ciência. Embora a observação científica busque capturar fatos objetivos, o processo de análise e interpretação dos dados pode ser influenciado por diversos fatores, como a fundamentação teórica, a escolha da metodologia experimental, as ferramentas de medição empregadas e até mesmo o contexto político, econômico, científico-tecnológico e sociocultural em que a observação ocorre.

Esses resultados indicam que as concepções prévias dos estudantes se mostraram relativamente próximas aos posicionamentos epistemológicos compartilhados pelos estudos

contemporâneos da HFSC sobre a “Natureza das Observações Experimentais”, sinalizando, de maneira geral, uma compreensão “*parcialmente informada*”.

A análise da Figura 34 ainda mostra que os valores de $Md(f)$, obtidos para as concepções dos estudantes após a intervenção didática (barras amarelas), são exatamente iguais aos valores de $Md(i)$, com exceção para o item D, no qual obteve-se o novo valor $Md(f) = 2$, indicando uma discordância da afirmação. Considerando a análise e discussão anterior sobre as concepções prévias, nota-se uma nítida evolução na compreensão epistemológica dos estudantes. Além disso, para os itens inéditos G e H, observa-se uma categorização das respostas como “*parcialmente informada*”, exibindo coerência e consistência nos posicionamentos.

Em termos gerais, conforme observado na Figura 34, não se evidenciam ganhos expressivos com a implementação da unidade de ensino na disciplina de História da Ciência 20231-1, exceto no item D, que muda de “*divergência equilibrada*” para “*parcialmente informada*”. Portanto, os resultados de aprendizagem significativa sobre o aspecto epistemológico “Natureza das Observações Experimentais”, relatados nesta subseção, sugerem que o planejamento e a estrutura didático-organizacional, bem como a implementação de uma abordagem histórica e integrada, contextual, do tipo reflexiva e explícita, contribuíram muito pouco para uma compreensão mais bem informada deste aspecto da NdC.

Comparativamente, os resultados encontrados na literatura de pesquisa em ensino de ciências são um pouco divergentes. Durbano (2012) e Cortez (2019) observaram que, tanto antes quanto depois da intervenção didática, os licenciandos mantiveram uma perspectiva ambígua sobre a possibilidade de as crenças e expectativas pessoais interferirem nas interpretações das observações experimentais. Além disso, os autores relataram a persistência de incertezas entre os estudantes quanto à capacidade da formação e do treinamento científico em permitir que os cientistas deixem de lado seus valores socioculturais para conduzirem suas investigações de maneira neutra, imparcial e objetiva.

Por outro lado, Teixeira (2003) e Cavalcante (2017) apontam que os licenciandos não parecem ter dificuldades em compreender a influência de fatores subjetivos na pesquisa científica, como a criatividade, a imaginação, as crenças pessoais, os valores socioculturais e as ideologias, bem como as limitações e incertezas do conhecimento científico. Eles destacam que os licenciandos em física expressaram a importância de fundamentar a observação empírica em um arcabouço teórico. No estudo realizado por Bertogna (2020) foi constatado que, entre os participantes, 78% dos entrevistados concordam com a possibilidade de que dados empíricos podem ser interpretados de formas distintas e resultar em conclusões diversas devido à aplicação de teorias ou modelos teóricos diferentes, resultando, assim, em conclusões variadas.

Em contrapartida, somente 16% dos participantes expressaram concordância com a ideia de que os dados empíricos, sendo de alta qualidade e obtidos a partir da aplicação rigorosa e diligente do “método científico”, devem levar a uma única conclusão.

Diante desse contexto, os resultados obtidos neste estudo, concernentes às dificuldades e facilidades nos processos de ensino e de aprendizagem sobre o aspecto de NdC “Natureza das Observações Experimentais”, estão em consonância com as conclusões de Teixeira (2003), e em maior proximidade com as de Cavalcante (2017) e Bertogna (2020).

Durante a implementação da unidade de ensino na disciplina de História da Ciência 2023-1, em várias oportunidades, o aspecto epistemológico “Natureza das Observações Experimentais” foi explorado por meio da problematização das visões “empírico-indutivista e a-teórica”, “visão aproblemática e a-histórica” e “visão rígida, algorítmica e infalível”, conforme a definição de Cachapuz *et al.* (2005). Intencionou-se utilizar os (micro)episódios históricos que envolvessem como temática principais alguma controvérsia científica, com o propósito de estimular discussões e reflexões explícitas, de modo a evidenciar, com a máxima clareza possível, que as observações experimentais são intrinsecamente carregadas de uma elevada competência prática e teórica.

Pode-se mencionar quatro encontros nos quais essa estratégia didática foi implementada: (i) semana 8: As investigações a “Natureza da Luz” na primeira metade do século XIX; (ii) semana 14: As investigações experimentais de Phillip Lenard sobre o efeito fotoelétrico; (iii) semana 15: A interpretação heurística de “*quantum* de luz” por Albert Einstein; e (iv) semana 16: Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico.

Na semana 8, utilizou-se como material de apoio o texto histórico construído pela pesquisadora Oliveira (2019), abordando os contextos científicos francês e britânico do início do século XIX, envolvendo a controvérsia científica acerca da natureza da luz.

Na semana 14, recorreu-se à tradução da *Nobel Lecture* proferida pelo físico alemão Philipp Lenard, como material de apoio. Nessa aula, as complexidades e as diferentes interpretações sobre os mesmos dados experimentais, no final do século XIX, acerca natureza dos raios catódicos, foram amplamente exploradas. Essa controvérsia científica envolveu notadamente cientistas ingleses (defendendo a perspectiva corpuscular, como J. J. Thomson) e germânicos (defendendo perspectiva ondulatória, como Hertz e Lenard). Além disso, nesse encontro, discutiu-se a interpretação de Lenard de seus dados empíricos sobre o efeito fotoelétrico, segundo os princípios da teoria clássica do eletromagnetismo, conhecida como “hipótese de gatilho”. Tentamos mostrar que, ao contrário daquilo que é transmitido pelas narrativas pseudo-históricas encontradas nos livros didáticos, sugerindo uma ruptura drástica e

abrupta entre a física clássica e a física moderna, os resultados das investigações experimentais de Lenard, conduzidas entre 1887 e 1902, podiam (e foram) explicados satisfatoriamente à luz de sua “hipótese de gatilho”. Essa explicação foi de tal forma que tais dados empíricos sobre o efeito fotoelétrico, pelo menos na virada e início do século XX, não representaram uma dificuldade intransponível ou uma crise científica para a física clássica.

Na semana seguinte, as discussões e reflexões explícitas a respeito da natureza das observações experimentais foram intensificadas com a leitura e análise do artigo de Einstein de 1905, intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”. Considerando os conhecimentos prévios dos estudantes sobre a “hipótese de gatilho” de Lenard (1902), adquiridos na semana anterior, os professores-pesquisadores esforçaram-se para mostrar que a hipótese heurística de Einstein de “*quantum* de luz” consistia em uma interpretação alternativa, inconsistente e incompatível com a interpretação de Lenard, porém, embasada empiricamente nos próprios dados coletados por Lenard três anos antes.

Na sequência, na semana 16, por meio de leituras e da apresentação de seminários, discutiu-se três tentativas clássicas distintas de interpretação do efeito fotoelétrico. Foi retomada a interpretação formulada por Lenard (“hipótese de gatilho”) e as razões para seu respectivo abandono por volta de 1911. Acrescentou-se a discussão a respeito das propostas de Arthur Haas (1910a, 1910b) e de J. J. Thomson (1910, 1913), nas quais buscou-se derivar classicamente a equação fotoelétrica de Einstein – que naquela época já possuía algumas evidências empírica de apoio – a partir de modelos específicos da estrutura da matéria, fundamentados em algum tipo de interação ondulatória ressonante entre a luz e os elétrons (cf. Suttini; Caluzi; Errobidart, 2024).

Em conjunto, especificamente nesses quatro encontros, durante as discussões e reflexões, buscou-se insistentemente chamar a atenção para a não neutralidade das interpretações e observações experimentais realizadas pelos diversos cientistas referenciados, realçando a influência de ideias aprioristas, o papel essencial das hipóteses e suposições, e dos corpos coerentes de conhecimentos disponíveis – nesse caso, a teoria clássica do eletromagnetismo – como diretrizes que orientaram todo o processo de investigação científica.

4.2.4 Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias

Durante a etapa coleta de dados, os estudantes foram instruídos a examinar diferentes afirmações sobre o uso da imaginação, da criatividade e de analogias no contexto da pesquisa científica. O propósito foi investigar se eles concordavam ou discordavam das declarações que, de forma explícita, sugeriam ou rejeitavam o uso da imaginação, da criatividade e de analogias como elementos legítimos e essenciais nos processos de investigação científica.

No questionário VOSE-RCN, foi indagado:

[Questão 3] Cientistas são pessoas que desenvolvem pesquisas científicas. Em outras palavras, a partir de uma metodologia, testam e avaliam (aceitando ou rejeitando) hipóteses para chegar a conclusões nas diversas áreas do conhecimento. Ou seja, são as pessoas responsáveis por produzir e construir a própria ciência. Os praticantes da ciência devem ter um foco principal: produzir e avaliar novos conhecimentos científicos. A rotina desses profissionais inclui: elaborar e desenvolver projetos de pesquisas; publicar artigos científicos; participar de eventos acadêmicos (congressos, simpósios, encontros etc.); ministrar aulas e palestras; e conduzir treinamentos para nova geração de cientistas.

Diante desse propósito, em 1951 foi criado o Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), o primeiro grande marco para formalização da profissão de cientista no processo de institucionalização da ciência no Brasil. Atualmente, segundo a UNESCO, o Brasil possui cerca de 700 cientistas por milhão de habitantes. Outros países apresentam um número consideravelmente maior, por exemplo, a China possui 1100, a Argentina 1200, a Rússia 3100, a União Europeia 3200, os Estados Unidos 3900, Coréia e Singapura 6400, e Israel 8300”.

Em sua percepção, quando os cientistas estão desenvolvendo suas pesquisas, em algum momento, eles utilizam de imaginação e criatividade?

No questionário VOSE-EF, uma pergunta direta foi feita da seguinte maneira:

[Questão 4] Em sua percepção, por meio dos estudos na disciplina História da Ciência 2023-1, quando os cientistas estavam desenvolvendo suas pesquisas sobre a natureza da luz e da matéria (e.g., I. Newton, T. Young, A. Fresnel, J. C. Maxwell, H. Hertz, P. Lenard, J. J. Thomson, W. Wien, M. Planck, A. Einstein, R. Millikan e muitos outros), em algum momento, eles utilizaram a imaginação, a criatividade e analogias?

O Quadro 13 mostra os enunciados dos itens declarativos investigados, bem como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes. Os cinco primeiros itens são comuns a ambos os questionários. Nos itens A e B, as declarações variam quanto ao grau de utilização da imaginação, da criatividade e das analogias, apresentando menor ou maior ênfase nesses elementos. Por outro lado, nos itens C e D, afirma-se que tais recursos constituem um meio ilegítimo na pesquisa

científica, com o risco de ser usado para defender um ponto de vista a todo custo. Nos itens D e E são fornecidas duas justificativas para uma possível rejeição ou ausência do emprego de tais elementos na prática científica: a inconsistência lógica e os potenciais prejuízos à confiabilidade do conhecimento científico.

Os três últimos itens (F, G e H) são exclusivos do questionário VOSE-EF. Neles são investigados a concordância e a discordância em relação ao emprego da imaginação, criatividade e analogias tanto por físicos teóricos quanto por físicos experimentais quando estão conduzindo suas investigações científicas.

Quadro 13 - Itens declarativos a respeito da “Imaginação, Criatividade e Analogias” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
A (VOSE-RCN). A imaginação e a criatividade são fontes essenciais para a inovação científica e tecnológica.	$Md(i) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
A (VOSE-EF). O uso da imaginação, da criatividade e de analogias são fontes essenciais para a inovação científica e tecnológica.	$Md(f) = 4$ $S = 5$	
B (VOSE-RCN). Os cientistas utilizam pelo menos um pouco de imaginação e criatividade quando estão conduzindo uma pesquisa científica.	$Md(i) = 4$ $S = 4$	“bem informada”
B (VOSE-EF). Os cientistas utilizam pelo menos um pouco de imaginação, criatividade e analogias quando estão conduzindo uma pesquisa científica.	$Md(f) = 4$ $S = 4$	
C (VOSE-RCN). A imaginação e a criatividade não são consistentes nem coerentes com os princípios lógicos e objetivos do trabalho científico.	$Md(i) = 2$ $S = 2$	“bem informada”
C (VOSE-EF). O uso da imaginação, da criatividade e de analogias não são consistentes nem coerentes com o rigor e com os princípios lógicos e objetivos do trabalho científico.	$Md(f) = 2$ $S = 2$	
D (VOSE-RCN). A imaginação e a criatividade podem se tornar um meio para um cientista defender seu ponto de vista a qualquer custo.	$Md(i) = 2$ $S = 2$	“bem informada”
D (VOSE-EF). O uso da imaginação, da criatividade e de analogias podem se tornar um meio um cientista defender seu ponto de vista a qualquer custo.	$Md(f) = 2$ $S = 2$	
E (VOSE-RCN). A imaginação e criatividade não possui confiabilidade e credibilidade.	$Md(i) = 2$ $S = 2$	“bem informada”
E (VOSE-EF). O uso da imaginação, da criatividade e de analogias prejudica a confiabilidade e credibilidade dos resultados científicos. Portanto é um meio ilegítimo para um cientista defender seu ponto de vista.	$Md(f) = 2$ $S = 2$	
F (VOSE-RCN). Não se aplica.		
F (VOSE-EF). Além da lógica matemática e de evidências empíricas disponíveis, os físicos teóricos (e.g., J. Maxwell, M. Planck e A. Einstein) necessitaram recorrer à imaginação, criatividade e analogias para criar suas respectivas teorias científicas.	$Md(f) = 4$ $S = 5$	“parcialmente informada”
G (VOSE-RCN).		
G (VOSE-EF). Os físicos experimentais (e.g., P. Lenard, J. J. Thomson e R. Millikan) não precisaram recorrer à imaginação, criatividade ou analogias, porque eles observaram as propriedades da luz e dos elétrons com seus próprios olhos durante os seus respectivos testes experimentais.	$Md(f) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”
H (VOSE-RCN). Não se aplica.		
H (VOSE-EF). Os físicos experimentais, (e.g., P. Lenard, J. J. Thomson e R. Millikan) não precisaram recorrer à imaginação, criatividade ou analogias. Eles se dedicaram à coleta e análise de dados sobre a natureza da	$Md(f) = 2$ $S = 1$	“parcialmente informada”

luz e da eletricidade, tarefas puramente técnicas que demandam apenas treinamento específico no uso de equipamentos e aplicação de lógica matemática.		

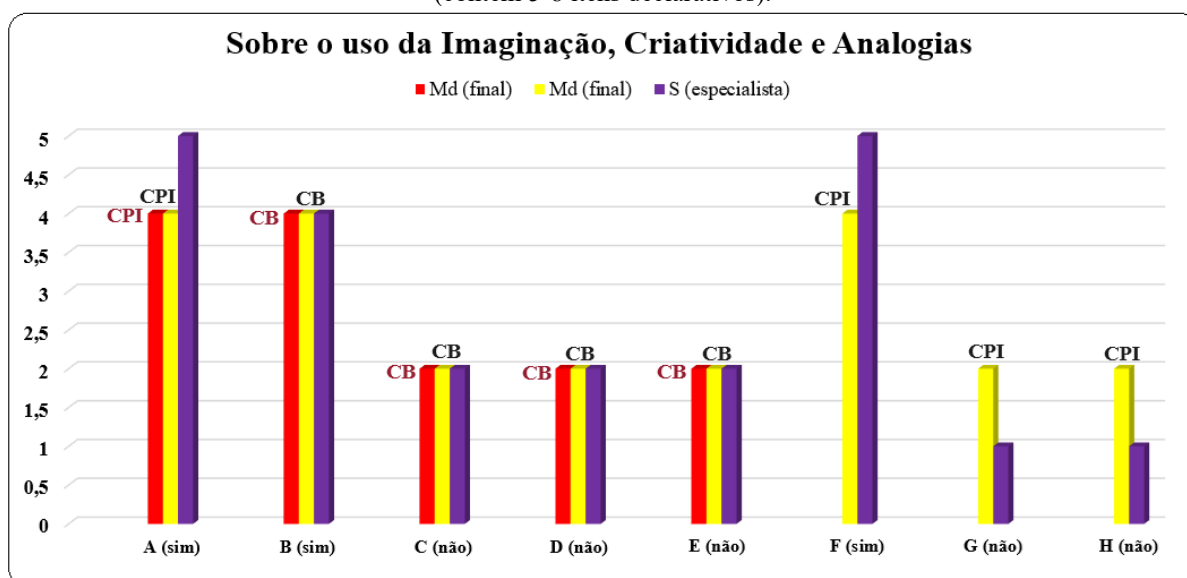
$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A

Figura 35 apresenta o gráfico com os valores da Md correspondentes aos itens avaliados nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, incluindo os valores do S , bem como as categorizações das concepções dos estudantes.

Figura 35 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4) para o aspecto de NdC “Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias” (contém 5-8 itens declarativos).



Md : mediana; S : “índice de referência especialista”; CPI: “compreensão parcialmente informada”; CB: “compreensão bem informada”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

De acordo com a análise empreendida, seguindo os critérios de categorização pré-estabelecidos, nota-se que as concepções prévias dos estudantes (barras vermelhas) foram classificadas como “bem informada” em quatro itens, e somente no item A, como “parcialmente informada”. Contudo, vale a pena realçar que a distribuição percentual das respostas para o item A foi $C+CF = 94,7\%$ e $I = 5,3\%$, com zero discordância. A categorização “parcialmente informada”, portanto, deve-se ao fato de o índice de S ($S = 5$), enquanto o valor encontrado para mediana foi de $Md = 4$, e não a posicionamentos discordantes quanto ao uso da imaginação e criatividade. Comparando as respostas aos itens A e B, nota-se que os estudantes parecem ter algumas dúvidas quanto à sugestão de que a imaginação e da criatividade são fontes essenciais nas investigações científicas, mas concordam nitidamente que tais elementos, em alguma medida, estão presentes na atividade científica.

A

Figura 35 também mostra os resultados obtidos em relação às concepções posteriores dos estudantes (barras amarelas). Observa-se para os cinco itens comuns a ambos os questionários que os valores de $Md(f)$ são exatamente iguais aos de $Md(i)$. Além disso, para os três itens inéditos investigados (F, G e H), cujas sentenças abordavam o trabalho científico de físicos teóricos e experimentais mencionados ao longo da disciplina, evidencia-se que os valores de $Md(f)$ são relativamente próximos aos valores do S . Portanto, em resumo, tais resultados sugerem uma compreensão epistemológica bem informada em relação ao uso da imaginação, criatividade e analogias na atividade científica, tanto no início quanto ao término da unidade de ensino.

Nas pesquisas conduzidas por Teixeira (2003), Durbano (2012) e Cortez (2019), os autores relataram que os licenciandos, tanto no início quanto no final da disciplina, apresentavam uma tendência em concordar com os itens declarativos que sustentavam a importância da imaginação e criatividade na ciência, enquanto simultaneamente discordavam das afirmações que sugeriam o contrário. Em consonância, Bertogna (2020) concluiu que 94% dos participantes elaboraram respostas sinalizando concordância com o papel essencial da criatividade na construção do conhecimento científico. Além disso, 83% dos entrevistados forneceram exemplos adequados do emprego da criatividade no trabalho científico. Portanto, os resultados de aprendizagem deste estudo, relatados nesta subseção, a respeito do aspecto epistemológico “Uso de Imaginação, Criatividade e Analogias”, são similares às conclusões de outros estudos apresentados na literatura de pesquisa em ensino de ciências.

Pode-se inferir que os dados indicam que pouquíssimos estudantes no ensino superior possuem concepções prévias distorcidas sobre esse aspecto da NdC. Além disso, evidencia-se que, após as diferentes intervenções didáticas, uma compreensão ainda mais bem informada sobre o trabalho científico é alcançada, mesmo por aqueles estudantes que inicialmente não reconheciam a importância de tais recursos.

Cabe destacar que, dentro da estrutura didático-organizacional da unidade de ensino da disciplina História da Ciência 2023-1, as duas primeiras aulas da Semana 7 foram intencionalmente dedicadas à promoção de discussões e reflexões explícitas acerca de alguns resultados preliminares das concepções prévias dos estudantes. Essa estratégia visou fomentar a problematização inicial dessas concepções, construindo redes de subsunções para a aprendizagem significativa ao longo da disciplina. Nesse primeiro momento, o aspecto “Uso da

Imaginação, Criatividade e Analogias”, devido à pequena discrepância em relação ao item A, foi selecionado para discussão em sala de aula¹²⁵.

Inicialmente, os professores-pesquisadores apresentaram brevemente os procedimentos metodológicos adotados para análise e interpretação de dados, bem como para a categorização das concepções epistemológicas dos estudantes. Como exemplo, foram mostrados alguns dados de um estudo similar anterior, porém, referente a estudantes da educação profissional técnica de nível médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (cf. Suttini, Errobidart e Caluzi, 2022). Por meio de uma apresentação de slides, desenvolveu-se uma aula expositiva dialogada, na qual os estudantes foram indagados: (a) A imaginação/criatividade pode ser desenvolvida e aprimorada (treinada), tal qual a memorização? (b) Ou, de outro modo, a imaginação/criatividade é um “dom” inato (os indivíduos têm ou não têm) ou é uma habilidade ou competência que pode ser desenvolvida e aprimorada de acordo com as possibilidades do ambiente estimulador? (c) Quais profissões são consideradas criativas em nossa sociedade? (d) As aulas tradicionais da disciplina de Física, em geral, demandam o uso de criatividade e imaginação dos estudantes? (e) A resolução de exercícios de Física é uma tarefa cognitiva que exige criatividade e imaginação?

Após ouvir as opiniões dos estudantes, foram apresentados os dados preliminares referentes aos itens declarativos nas perguntas 3, 5 e 6, do questionário VOSE-RCN, que abordavam o aspecto de NdC “Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias”. Foi mostrado que nos itens que reconheciam a relevância do papel de tais recursos na construção do conhecimento científico, o percentual de concordância foi acima de 74%, alcançando o máximo de 85%. Ao mesmo tempo, o percentual de discordância nos itens que sustentavam o contrário, foi acima de 63%, alcançando o máximo de 74%.

Em suma, os resultados referentes ao aspecto epistemológico sobre o “Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias”, apresentados nesta subseção, indicam que o desenvolvimento e a organização do plano didático, juntamente com a adoção de uma abordagem histórica, integrada, contextual, reflexiva e explicitamente delineada, contribuíram para promoção de uma compreensão mais precisa e bem informada da atividade científica.

¹²⁵ Na segunda parte da aula, abordou-se o aspecto “Metodologia Científica”, cujos resultados serão analisados na próxima subseção.

4.2.5 Sobre a Metodologia Científica

Para o levantamento das concepções epistemológicas dos estudantes sobre o aspecto da NdC “Metodologia Científica”, primeiramente foi indagado se eles anteriormente já haviam estudado sobre o denominado “método científico”. Como resposta, 17 estudantes afirmaram “sim” (~90%) e, surpreendentemente, 2 responderam “não” (~10%). Em seguida, no questionário VOSE-RCN, indagou-se:

[Questão 8] Geralmente, é afirmado que a enorme confiança e credibilidade atribuída pela sociedade ao trabalho científico deve-se, principalmente, à aplicação do chamado “**método científico**”. Esse método, na maioria das vezes, é apresentado como um método de investigação do tipo “passo a passo”, ou receita a ser rigorosamente seguida. Suas etapas sequenciais e obrigatórias são:

- **1ª Etapa.** Observar um fenômeno do mundo natural;
- **2ª Etapa.** Criar hipóteses sobre esse fenômeno observado;
- **3ª Etapa.** Projetar um aparato experimental para testar as hipóteses anteriormente criadas;
- **4ª Etapa.** Realizar a coleta de dados (levantamento de evidências empíricas) com extremo rigor, precisão e cuidado.
- **5ª Etapa.** Realizar análises e discussões racionais e objetivas com base unicamente nas evidências empíricas disponíveis;
- **6ª Etapa.** Elaborar conclusões sobre validade ou não das hipóteses inicialmente criadas.

Você alguma vez já estudou sobre o “método científico”? () *Sim* () *Não*
 Analise as afirmativas abaixo.

Já no questionário VOSE-EF, ao término da disciplina, o aspecto “metodologia científica” foi abordado em três questões:

[Questão 8a] Afinal de contas, como funciona essa coisa chamada Ciências? E qual sua relação com o tal do “método científico”? Analise os itens abaixo sobre o assunto.

[Questão 8b] Como os cientistas conduzem suas investigações sobre os fenômenos naturais? Analise os itens abaixo sobre o assunto.

[Questão 8c] Os cientistas J. J. Thomson, P. Lenard, E. Rutherford e N. Bohr propuseram seus respectivos modelos de estrutura atômica da matéria depois de longos processos de investigação científica teórico-experimental. Como eles realizaram essas investigações científicas? Analise os itens abaixo sobre o assunto

O Quadro 14 mostra os enunciados dos itens declarativos investigados, bem como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes. Os sete itens declarativos apresentados na questão 8a são comuns a ambos os questionários. Para a questão 8b e 8c, foram elaborados três e quatro itens declarativos inéditos, respectivamente. Objetivou-se verificar se os estudantes concordavam

(ou discordavam) do uso, na prática científica cotidiana, de um método universal de investigação, rígido, exato, infalível, obrigatório, isento de vieses e crenças pessoais (8cA, 8bA, 8bC, 8aE e 8aG); ou se concordavam com as declarações que indicavam a utilização, na realidade, de uma diversidade de procedimentos e abordagens metodológicas de investigação científica, igualmente válidos e aceitáveis, dependendo a natureza específica do objeto em estudo (8cB, 8cC, 8bB, 8bD, 8aA, 8aB, 8aC, 8aD, 8aF).

Quadro 14 - Itens declarativos a respeito da “Metodologia Científica” avaliados nos questionários VOSE-RCN (Questão 3) e VOSE-EF (Questão 4).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
8A (VOSE-RCN). O “método científico” é útil na maioria dos casos, mas não é nenhuma garantia de resultados válidos e positivos. Portanto, os cientistas normalmente precisam construir (elaborar/criar/inventar) novos métodos de investigação.	$Md(i) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8aA (VOSE-EF). O “método científico” é útil na maioria dos casos, mas não é nenhuma garantia de resultados válidos e positivos. Portanto, os cientistas normalmente precisam construir (elaborar/criar/inventar) novos métodos de investigação.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8B (VOSE-RCN). Não existe o “método científico” fixo, universal e obrigatório para todas as pesquisas científicas. Desde que as metodologias de investigação estejam apoiadas no valor da evidência empírica, na lógica e na argumentação, qualquer método é válido e aceitável.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
8aB (VOSE-EF). Na prática, não se pode dizer que existe o “método científico”, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. Se uma nova metodologia de investigação estiver apoiada no valor da evidência empírica, na lógica e na argumentação, ela será considerada válida e aceitável pela comunidade científica.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
8C (VOSE-RCN). Não existe o “método científico” fixo, universal e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, descoberto (achado/encontrado/localizado) acidentalmente.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
8aC (VOSE-EF). Na prática, não se pode dizer que existe o “método científico” fixo, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, descoberto (revelado/encontrado/localizado) acidentalmente.	$Md(f) = 2$	“distorcida”
	$S = 4$	
8D (VOSE-RCN). Existem diferentes tradições e diversas metodologias científicas que variam radicalmente de acordo com aquilo que se quer estudar (planetas, doenças, fósseis, átomos e moléculas); e é isto que determina o método pelo qual a pesquisa científica irá ocorrer.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
8aD (VOSE-EF). Existem diferentes tradições e diversas metodologias científicas que variam radicalmente de acordo com aquilo que se quer estudar (planetas, doenças, fósseis, átomos e moléculas); e é isto que determina a metodologia de investigação pela qual a pesquisa científica irá ocorrer.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
8E (VOSE-RCN). Desde que seja seguido rigorosamente, o “método científico” é uma garantia de resultados válidos, confiáveis, precisos, imparciais e objetivos. Por isso, a comunidade científica adota e aceita somente essa metodologia de investigação.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
8aE (VOSE-EF). Desde que seja seguido rigorosamente, o “método científico” é uma garantia de resultados válidos, confiáveis, precisos, imparciais e objetivos. Por isso, a comunidade científica adota e aceita somente essa metodologia de investigação.	$M(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
8F (VOSE-RCN). A comunidade científica apenas recomenda o uso do “método científico”, porque ele é um procedimento sistemático, lógico e	$Md(i) = 4$	“distorcida”

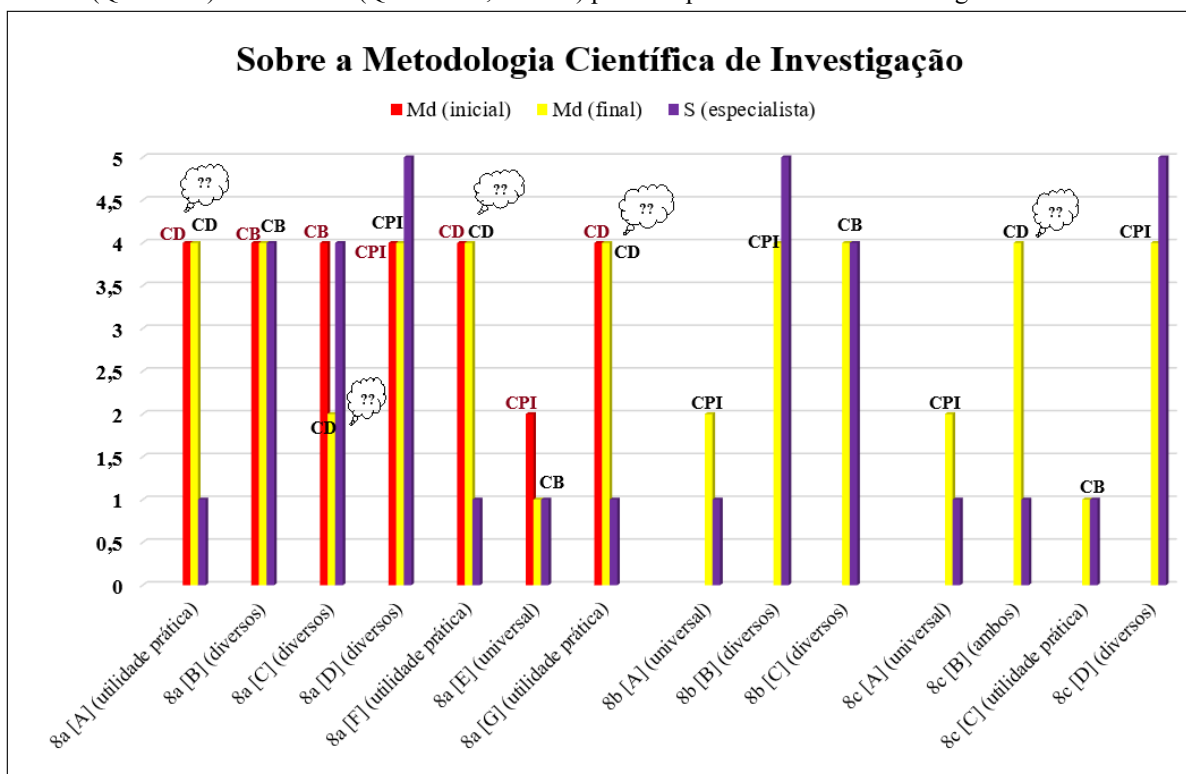
racional de investigação, cujo objetivo é facilitar a obtenção de conhecimentos sobre os fenômenos físicos, químicos e biológicos.	$S = 1$	
8aF (VOSE-EF). A comunidade científica apenas recomenda o uso do “método científico”, porque ele é um procedimento sistemático, lógico e racional de investigação, cujo objetivo é facilitar a obtenção de conhecimentos sobre os fenômenos físicos, químicos e biológicos. No entanto, outros métodos de investigação também são considerados aceitáveis e válidos.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8G (VOSE-RCN). As investigações científicas podem se desenvolver de diversas maneiras. Mas o importante é que, quando os resultados das pesquisas se tornam públicos, a comunidade científica utilizará o “método científico” para verificar sua confiabilidade e possíveis fraudes.	$Md(i) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8aG (VOSE-EF). As investigações científicas podem se desenvolver de diversas maneiras. Mas o importante é que, quando os resultados das pesquisas se tornam públicos, a comunidade científica utilizará o “método científico” para verificar confiabilidade dos resultados, erros procedimentais e até mesmo possíveis fraudes.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8bA (VOSE-EF). Todos os cientistas utilizam a mesma metodologia para conduzir suas pesquisas, o “método científico universal”.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
8bB (VOSE-EF). Os cientistas utilizam diferentes metodologias para conduzir suas pesquisas, até mesmo criam novas metodologias científicas caso necessário.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
8bC (VOSE-EF). Todos os cientistas utilizam alguma forma de metodologia científica para conduzir suas pesquisas, mas nem todas as pessoas que utilizam alguma metodologia científica em sua profissão podem ser consideradas cientistas.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
8cA (VOSE-EF). Todos os cientistas citados seguiram rigorosamente a mesma metodologia para conduzir suas pesquisas, o “método científico universal”.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
8cB (VOSE-EF). Alguns cientistas podem ter seguido rigorosamente o “método científico universal” em suas pesquisas, enquanto outros podem ter adotado abordagens ligeiramente diferentes ou complementares.	$Md(f) = 4$	“distorcida”
	$S = 1$	
8cC (VOSE-EF). Em suas investigações científicas, os cientistas citados podem ter utilizado diferentes metodologias científicas, mas para validação e aceitação de seus resultados experimentais, eles seguiram rigorosamente as etapas do “método científico universal”.	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
8cD (VOSE-EF). Na prática, não se pode afirmar que existe o “método científico universal” para realização de investigações científicas, pois admite-se o uso de diferentes abordagens e métodos de investigação para o mesmo fenômeno.	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Figura 36 ilustra os valores da Md referentes aos itens investigados para esse aspecto da NdC nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, bem como os valores do S e a categorização das concepções epistemológicas dos estudantes.

Figura 36 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 8) e VOSE-EF (Questão 8a, 8b e 8c) para o aspecto de NdC “Metodologia Científica”.



Md: mediana; S: “índice de referência especialista”; CPI: “*compreensão parcialmente informada*”; CD: “*compreensão distorcida*”; CB: “*compreensão bem informada*”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

De acordo com a análise dos dados referentes às concepções prévias dos estudantes (barras vermelhas), e considerando apenas os itens que contemplam a perspectiva da diversidade metodológica, observa-se que os valores de mediana inicial $Md(i)$ são iguais ou próximos do índice de referência dos especialistas S (itens 8aB, 8aC, 8aD, 8bB, 8bC e 8cD).

Entretanto, este é um caso em que a análise exclusiva das medianas pode induzir a interpretações imprecisas. Os itens 8aB, 8aC e 8aD apresentem $Md(i) = 4$ – o que, a princípio, sinalizaria concordância com a ideia de diversidade nos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa científica –, porém, a distribuição percentual das respostas revela um cenário mais ambíguo: para os três itens obteve-se $C+CF = 52,6\%$; $I = 10,05\%$; $D+DF = 36,8\%$). Esses dados sugerem, de maneira mais precisa e representativa, uma “*divergência equilibrada*” nas concepções iniciais dos estudantes em relação a esse aspecto da NdC, com uma leve predominância de respostas concordantes, mas com uma significativa parcela de discordâncias.

Essa interpretação é corroborada por dois indícios adicionais. Por um lado, nota-se a discordância expressiva no item 8aE — cuja proposição defende uma visão normativa e rígida do “método científico” como um procedimento padronizado, obrigatório e infalível — aponta

para a presença de concepções “*parcialmente informadas*”. Por outro lado, a concordância nos itens 8aA, 8aF e 8aG, que atribuem uma utilidade prática ao “método científico”, reforça a hipótese de que muitos estudantes operam a partir de uma concepção pragmática e empírico-indutivista, associando o método científico a um instrumento eficaz e uniforme de obtenção de resultados válidos, independentemente do contexto.

Em particular, para os itens 8aA, 8aF e 8aG, observou-se um valor $Md(i)$ muito distante do valor do índice de referência S ($\Delta = 3$) sinalizando uma compreensão “*distorcida*” da NdC. O valor da $Md = 4$, representa, de fato, uma distribuição percentual das respostas com nível de concordância acima de 80% para os três itens. A nítida concordância com esses itens parece estar em consonância com os dados preliminares, relatados anteriormente na Seção 4.1 “Concepções Prévias sobre a NdC: primeiras observações” deste capítulo, quando foi identificado uma concordância com a afirmativa de que “o impasse [controvérsia científica] só poderá ser resolvido com experimentação”, sinalizando a presença de traços de uma “visão experimentalista crédula” do trabalho científico.

Em resumo, considerando as respostas apresentadas para os sete itens investigados no questionário VOSE-RCN sobre o aspecto “Metodologia Científica”, os resultados indicam que não havia um entendimento epistemológico claro e bem definido por parte dos estudantes acerca desse aspecto da NdC.

Do ponto de vista da TAS (Ausubel, 2003), especialmente no que se refere ao princípio da *diferenciação progressiva*, esses dados reforçam a necessidade de explicitar as distinções entre diferentes concepções sobre a metodologia científica, de modo que os estudantes possam organizar logicamente novos significados – como que foi feito na Semana 7. Além disso, a *reconciliação integrativa* torna-se indispensável para articular e superar entre as contradições conceituais pré-existentes, como aquelas evidenciadas entre a aceitação da diversidade metodológica (itens 8aB, 8aC, 8aD e 8aE) e a crença na existência de um método científico único e útil (itens 8aA, 8aF e 8aG).

A Figura 36 também ilustra os resultados referente às concepções posteriores dos estudantes sobre o aspecto da NdC “Metodologia Científica” (barras amarelas). Embora se observe certo deslocamento em direção a concepções mais alinhadas com a diversidade epistêmica e metodológica das práticas científicas, os dados evidenciam que essa mudança ainda é parcial e heterogênea. Tal constatação reforça a necessidade de intervenções didáticas ainda mais sistemáticas, explícitas e reflexivas, distribuídas ao longo do processo formativo, capazes de reconstruir subsunçores e favorecer uma compreensão da ciência como uma prática plural, situada historicamente e sujeita à revisão contínua. Essas ações pedagógicas devem

confrontar diretamente o imaginário consolidado de um “método científico” universal, linear e infalível — concepção típica de uma visão empírico-indutivista e normativa, ainda presente nas falas e decisões conceituais de parte significativa dos estudantes.

Em primeiro lugar, nota-se para o item 8aE que o valor da mediana final $M(f)$ se aproximou e igualou-se ao valor do índice de referência S . Os dados sobre distribuição percentual indicam um aumento de 20% na frequência das respostas que discordaram da afirmativa. Em segundo lugar, para os itens 8aB e 8aD, agora o valor da $Md(f) = 4$ de fato representa um posicionamento majoritário de concordância dos estudantes, sendo 89,5% para o item 8aB e 84,2% para o item 8aD. Já em relação ao resultado item 8aC, que à primeira vista poderia ser interpretado como um retrocesso no entendimento epistemológico, o valor $Md(f) = 2$ não é representativo quando comparado com a distribuição percentual das respostas. Com efeito, observou-se para esse item, de modo similar à primeira coleta de dados, uma “*divergência equilibrada*”, com 47,4% de concordância e 52,6% de discordância. Por último, em relação aos itens 8aA, 8aF e 8aG, não foi observada nenhuma mudança significativa, nem no valor da Md nem na distribuição percentual da frequência das respostas.

Portanto, pode-se inferir que houve apenas uma ligeira mudança em sentido a uma compreensão mais bem informada dos estudantes em relação às possibilidades do emprego de metodologias diversificadas no trabalho científico.

Essa conclusão é reforçada pelos resultados obtidos nos outros sete itens (não familiares) investigados exclusivamente no questionário VOSE-EF (itens 8bA, 8bB, 8bC, 8cA, 8cB, 8cC e 8cD). Observa-se que as respostas foram classificadas como “*bem informada*” em apenas dois itens, “*parcialmente informada*” em quatro itens, e “*distorcida*” no item restante.

Vale a pena fazer uma breve discussão sobre o item 8cC, cuja sentença é bastante similar ao item 8aG, os quais sugerem que uma utilidade prática para o “método científico universal”, porém os resultados são contraditórios. No item 8cC foi afirmado: “**8cC.** *Em suas investigações científicas, os cientistas citados podem ter utilizado diferentes metodologias científicas, mas para validação e aceitação de seus resultados experimentais, eles seguiram rigorosamente as etapas do ‘método científico universal’.*”. Observou-se nesse caso que o valor da $Md(f) = 2$ não é totalmente representativo, pois a distribuição percentual mostra uma divisão equilibrada de posicionamentos, sendo 47,4% de concordância e 52,6% de discordância.

Com efeito, os resultados para os itens 8aG e 8cC apontam para uma distinção epistemológica feita por parte dos estudantes entre o “contexto da investigação” e o “contexto da validação e aceitação”. As respostas sugerem que, para eles, a aplicação obrigatória do “método científico” é considerada o critério de demarcação. Ao passo que, no primeiro caso,

isto é, na prática científica cotidiana, eles concordam que é essencial manter uma ampla diversidade metodológica de investigação científica, de acordo com o objeto de pesquisa.

Embora esses dois contextos ressaltem uma diferença entre a maneira como uma ideia é inicialmente construída/criada/inventada e como essa ideia é posteriormente avaliada, testada e validada cientificamente, desempenhando um papel importante na compreensão bem informada do processo científico e na análise de teorias científicas, os estudos contemporâneos da HFSC apontam para uma complexidade ainda maior nessa dicotomia. Considera-se que tanto o contexto da investigação quanto o da validação e da aceitação são influenciados por uma variedade de fatores, incluindo questões sociais, políticas e culturais. Essa perspectiva realça a necessidade de uma abordagem ainda mais contextualizada e integrada ao examinar o desenvolvimento e a evolução do conhecimento científico, afastando-se de uma “visão acumulativa e de crescimento linear” do trabalho científico, a qual é reforçada pela “visão rígida, algorítmica e infalível” do método científico (Cachapuz, *et al.* 2005).

Os resultados de aprendizagem em outras pesquisas empíricas, no âmbito do ensino superior, abordando o aspecto de NdC “Metodologia Científica”, são heterogêneos. Massoni (2005), após a implementação de uma disciplina de História e Epistemologia da Física, afirmou que cerca de 90% dos licenciandos definiram o que é ciência de maneira amplamente alinhada com a visão epistemológica contemporânea da HFSC. Segundo a autora, isso representou uma mudança bastante significativa, pois, no início da disciplina, muitos deles mantinham uma forte perspectiva empírico-indutivista de que o conhecimento científico era produzido seguindo rigidamente as etapas do “método científico”, partindo da observação para a experimentação, e no final, descobrir leis e teorias fixas, tidas como verdades absolutas.

Biancolin (2014) e Cavalcante (2017), em contrapartida, relataram que, de modo geral, os participantes enalteceram a importância de um “método científico” infalível e exato, que resulta em um conhecimento cientificamente comprovado, devido à estrita adesão ao protocolo estabelecido por esse método. Cortez (2019) notou importantes inconsistências e contradições na visão de NdC dos estudantes. Os resultados apontaram que, entre os seis itens avaliados no questionário VOSE original (versão traduzida), as respostas em dois deles foram consideradas contraditórias. Na pesquisa conduzida por Teixeira (2003) não foi observada nenhuma mudança significativa quanto ao aspecto “Metodologia Científica” após a implementação de uma abordagem contextual explícita. Em ambas as etapas de coletas de dados, o autor evidenciou que mais de 71% dos licenciandos em Física consideraram o emprego rigoroso do “método científico” como o critério de demarcação que distingue a ciência (ou uma disciplina científica como a física, química e biologia) de outras formas de conhecimento (*e.g.*, senso comum,

religião, filosofia e matemática). Os estudantes apontaram que a aplicação do “método científico” valida os enunciados das hipóteses, leis e teorias científicas, algo que não é característico de outras áreas de conhecimento, com o objetivo de conferir elevado grau de certeza e veracidade aos conceitos científicos por meio da experimentação e da razão. Bertogna (2020) relatou percentagens semelhantes nas respostas encontradas em relação ao papel dos procedimentos metodológicos investigação científica.

Conforme mencionado na nota de rodapé da subseção anterior, no encontro da Semana 7, planejou-se a promoção de discussões e reflexões explícitas, abordando alguns resultados preliminares das concepções prévias dos estudantes. Na segunda parte, que compreendeu duas aulas, o aspecto “Metodologia Científica” foi explorado e problematizado. Essa escolha foi feita antecipadamente à análise preliminar de dados, uma vez que a literatura em ensino de ciências tem sinalizado a presença de obstáculos, dificuldades e persistências das “visões empírico-indutivistas e a-teóricas” e das “visões rígidas, algorítmicas e infalíveis”, que são materializadas pela crença ingênua no cientificamente comprovado, com o sentido de verdade indubitável, pela aplicação rigorosa e diligente do “método científico” (Lederman *et al.*, 2002, 2007; Cachapuz *et al.*, 2005; Lederman, N.; Bartos; Lederman, J., 2014).

Inicialmente, os professores-pesquisadores mostraram algumas imagens, facilmente encontradas na internet, que ilustram as etapas sequenciais do “método científico”. Em seguida, indagou-se: (a) “Qual o papel (ou a função) da ‘metodologia científica’ em uma pesquisa/investigação?”; (b) “Há diferenças significativas entre a ‘metodologia científica’ utilizada nas ‘Ciências Naturais’ (e.g., Física), nas ‘Ciências Médicas’ (e.g., Medicina) e nas ‘Ciências Humanas’ (e.g., Ensino de Física)? Se sim, quais?”. Os professores-pesquisadores fizeram o registro no quadro das opiniões dos estudantes, separando-as entre características semelhantes e distintas.

Após essa etapa, com base nas informações encontradas no trabalho de Gil-Pérez *et al.* (2001) e Cachapuz *et al.* (2005), cuja leitura e análise já tinha sido realizada no semestre anterior, discutiu-se como as sete imagens distorcidas da atividade científica, identificadas pelos autores, são transmitidas por meio das ilustrações icônicas e estereotipadas sobre o trabalho científico. Além disso, uma vez que os estudantes tinham apresentado um seminário na semana 5 sobre a estrutura sequencial, a abordagem e o conteúdo conceitual do efeito fotoelétrico textualizados em seis diferentes livros-texto de ensino superior, tornou-se possível realizar uma análise comparativa entre a estrutura sequencial das narrativas nos livros-texto e as etapas sequenciais do “método científico”. Dessa forma, buscou-se mostrar como tais narrativas transmitem implicitamente uma concepção epistemológica que não corresponde a

uma compreensão bem informada do processo de construção do conhecimento científico. Ressaltamos a contribuição das discussões e reflexões promovidas anteriormente na semana 4, com base nos trabalhos de Martins (2001) e Allchin (2004), enfatizando a identificação de elementos que podem sinalizar a presença de uma narrativa pseudo-históricas em textos didáticos e acadêmicos.

Dando prosseguimento à aula, mais uma vez, os professores-pesquisadores utilizaram os dados do estudo realizado por Suttini, Errobidart e Caluzi (2022) para mostrar que, aparentemente, na educação básica profissional, ao longo do percurso escolar, os estudantes tendem a concordar cada vez mais com a existência de um único método de pesquisa científica padronizado e obrigatório, ao passo que tendem a discordar da validade de métodos diversos. Esses resultados foram então comparados com os dados obtidos por meio das respostas à pergunta 8 do questionário VOSE-RCN, revelando que a maioria dos estudantes que participaram da pesquisa concordava com a diversidade metodológica e discordava da universalidade da metodologia na pesquisa científica. Essa comparação revestiu-se de grande importância, pois permitiu perceber que alguns estudantes tomaram consciência de que, no futuro, deverão estar atentos às concepções distorcidas sobre a NdC que seus estudantes provavelmente expressarão em suas aulas.

Diante do exposto, embora ainda persistam algumas concepções epistemológicas distorcidas sobre o processo de validação do conhecimento científico, os resultados relativos ao aspecto da NdC “Metodologia Científica”, sugerem que a estruturação do plano de ensino, aliados à implementação de uma abordagem histórica abrangente, contextualizada, reflexiva, contribuíram para uma compreensão mais bem informada sobre o trabalho científico.

4.2.6 Sobre o Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico

Sobre o aspecto da NdC “Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico”, foram elaboradas questões abordando controvérsias científicas históricas e contemporâneas, bem como os fatores que podem influenciar as tomadas de decisões e as complexidades envolvidas no processo de aceitação de novas teorias científicas.

No questionário VOSE-RCN, foi indagado:

[Questão 7] O desaparecimento dos dinossauros e de milhares de outras espécies há cerca de 66 milhões de anos foi considerado um dos grandes enigmas para a ciência. Como até mesmo as modernas técnicas de datação geológica ainda possuem um erro experimental de cerca de 100 000 anos, várias teorias científicas foram estabelecidas ao longo dos anos. Até meados do século passado, a teoria melhor aceita para explicar a catástrofe envolvia unicamente processos evolutivos associados ao planeta Terra: o desencadeamento de uma longa série de erupções vulcânicas devido aos violentos movimentos das placas tectônicas (teoria 1). Outra teoria também existia, porém, com muito menos adeptos: a “teoria do resfriamento global” (teoria 2). No entanto, em 06 de junho de 1980, os cientistas Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro e Helen V. Michel, propuseram a inédita Teoria do Impacto (ou Teoria K-Pg) para extinção em massa das espécies. Baseando-se na análise de fósseis e de camadas geológicas, eles publicaram um estudo no qual defendem, surpreendentemente, que a origem da catástrofe era extraterrestre: a queda de um gigantesco asteroide de cerca 10 km de diâmetro a uma velocidade próxima de 72.000 km/h (teoria 3).

Como você acredita que a comunidade científica (a maioria de cientistas e pesquisadores) se posicionou nos primeiros 10 anos após o surgimento da Teoria do Impacto como tentativa de explicação do evento de extinção em massa de espécies?

Já no questionário VOSE-EF, perguntou-se:

[Questão 6] Tomando como exemplo os três casos de controvérsias científicas históricas analisados durante esse curso de História das Ciências (teoria corpuscular de Newton x teoria ondulatória de Young sobre a natureza da luz; interpretação inglesa [corpuscular] x germânica [ondulatória] sobre a natureza dos raios catódicos; teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell x teoria quântica de Einstein sobre a natureza da luz), o que se conclui sobre os processos de aceitação de novos conhecimentos científicos? Julgue os itens a seguir considerando os fatores que podem influenciar esse processo.

Em ambos os questionários foi inserida a seguinte nota explicativa:

Note e Adote: “Aceitar” uma teoria é uma postura adotada pela comunidade científica quando as pesquisas relevantes sobre um certo fenômeno são consideradas como efetivamente completadas. Logo, “aceitar” uma determinada teoria “T” é julgar que essa teoria não necessita ser submetida a investigações futuras, de tal forma que ela já está bem estabelecida a ponto de ser utilizada em novos projetos de ciência aplicada, e também incluída no seletor “*corpus* de conhecimentos científicos consolidados” (Lacey, 2008).

Os estudantes foram instruídos a examinar oito itens declarativos relacionados a fatores que têm o potencial de influenciar o processo de validação e aceitação de novos conhecimentos científicos, tais como: ausência de sólida corroboração empírica, representando uma “visão relativista” da NdC (itens A e B), na qual todas as teorias concorrentes são tratadas como igualmente válidas até que evidências robustas e sólidas surjam a favor de uma única teoria; paradigma dominante, isto é, a teoria aceita pela comunidade científica (itens C e F); simplicidade (item D); reputação, *status* acadêmico e autoridade dos cientistas propositores (item E); intuição (item G); e fecundidade para novos projetos de pesquisa (item H). Em

resumo, o objetivo principal foi investigar se os estudantes concordavam (ou discordavam) das sugestões de influência de outros critérios, além da importância dos resultados empíricos, alguns considerados subjetivos, para aceitação de uma nova teoria pela comunidade científica. Isso porque o apoio de evidências empíricas como critério de avaliação e aceitação é comumente exagerado na interconexão entre a “visão descontextualizada”, a “visão empírico-indutivista e a-teórica” e a “visão rígida, algorítmica e infalível”, conforme relatado por Cachapuz *et al.* (2005).

O Quadro 15 mostra os enunciados dos itens declarativos investigados, bem como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, assim como S , e as respectivas classificações das concepções prévias e posteriores dos estudantes.

Quadro 15 - Itens declarativos a respeito do “Processo de Validação e Aceitação de Teorias Científicas” investigados nos questionários VOSE-RCN (Questão 7) e VOSE-EF (Questão 6).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
7A (VOSE-RCN). Diante do impasse, a comunidade científica deixou temporariamente em aberto o julgamento e não aceitou nenhuma das três teorias antes de distinguir, por meio da argumentação e de novas evidências empíricas, qual delas era definitivamente a melhor.	$Md(i) = 4$	“ <i>distorcida</i> ”
	$S = 2$	
6A (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, os cientistas deixam temporariamente em aberto o julgamento e não aceitam nenhuma das teorias concorrentes antes de distinguir, por meio da argumentação e de novas evidências empíricas, qual delas é definitivamente a melhor.	$Md(f) = 2$	“ <i>parcialmente informada</i> ”
	$S = 2$	
7B (VOSE-RCN). Diante do impasse, a comunidade científica aceitou as três teorias científicas, porque todas forneciam explicações racionais, plausíveis e com o apoio de evidências empíricas disponíveis, porém, a partir de diferentes perspectivas.	$Md(i) = 2$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 2$	
6B (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, os cientistas aceitam as duas teorias científicas competidoras, porque ambas podem fornecer explicações racionais, plausíveis e com o apoio de evidências empíricas disponíveis, porém, a partir de diferentes perspectivas.	$Md(f) = 2$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 2$	
7C (VOSE-RCN). Como é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas, a comunidade científica escolheu continuar aceitando a teoria científica com a qual ela já estava mais familiarizada.	$Md(i) = 2$	“ <i>distorcida</i> ”
	$S = 4$	
6C (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas e, portanto, os cientistas adotam atitude conservadora, isto é, a maioria deles escolhe continuar aceitando a teoria científica com a qual eles já estão mais familiarizados.	$Md(f) = 4$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 4$	
7D (VOSE-RCN). A comunidade científica escolheu aceitar a teoria mais simples, evitando as teorias abstratas, difíceis e complexas. A simplicidade é um critério importante no momento de escolha entre teorias competidoras e incompatíveis sobre um mesmo fenômeno.	$Md(i) = 4$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 4$	
6D (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que a simplicidade é um critério importante no momento de escolha entre teorias competidoras e incompatíveis sobre um mesmo fenômeno.	$Md(f) = 4$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 4$	
7E (VOSE-RCN). O <i>status</i> acadêmico de cada grupo de cientistas (experiência, prestígio, reputação, gênero, nacionalidade etc.) teve um papel importante e influenciou no processo de aceitação de uma das três teorias pela comunidade científica.	$Md(i) = 4$	“ <i>bem informada</i> ”
	$S = 4$	

6E (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que o <i>status</i> acadêmico de cada grupo de cientistas (experiência, prestígio, reputação, gênero, nacionalidade etc.) é um fator importante e que influencia no processo de aceitação de uma teoria na comunidade científica.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
7F (VOSE-RCN). Em tais situações, a comunidade científica quase sempre tende a aceitar as novas teorias científicas, preferencialmente aquelas que apresentam somente pequenas modificações com relação à teoria atualmente aceita.	$Md(i) = 2$	“distorcida”
	$S = 4$	
6F (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que os cientistas quase sempre tendem a aceitar as novas teorias científicas, no entanto, preferencialmente aquelas que apresentam somente pequenas modificações com relação à teoria atualmente aceita.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
7G (VOSE-RCN). Em tais situações, a comunidade científica usa, pelo menos um pouco, de intuição (pressentimento) para julgar a aceitação de uma das três teorias científicas competidoras.	$Md(i) = 2$	“distorcida”
	$S = 4$	
6G (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que os cientistas usam, pelo menos um pouco, de intuição (pressentimento) para julgar subjetivamente a aceitação de uma das duas teorias científicas competidoras.	$Md(f) = 2$	“distorcida”
	$S = 4$	
7H (VOSE-RCN). O grau de alcance, de fecundidade e de “fertilidade” de cada uma das três teorias, isto é, o potencial para no futuro próximo os cientistas investigam novos fenômenos, bem como atrair recursos para novas pesquisas, foi decisivo no processo de escolha.	$Md(i) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
6H (VOSE-EF). Diante de controvérsias científicas, observa-se que a avaliação sobre o grau de alcance, de fecundidade e de “fertilidade” de cada uma das duas teorias, isto é, o potencial para no futuro próximo os cientistas investigarem novos fenômenos, bem como atrair recursos para pesquisas, é um fator importante no processo de escolha individual de cada cientista.	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	

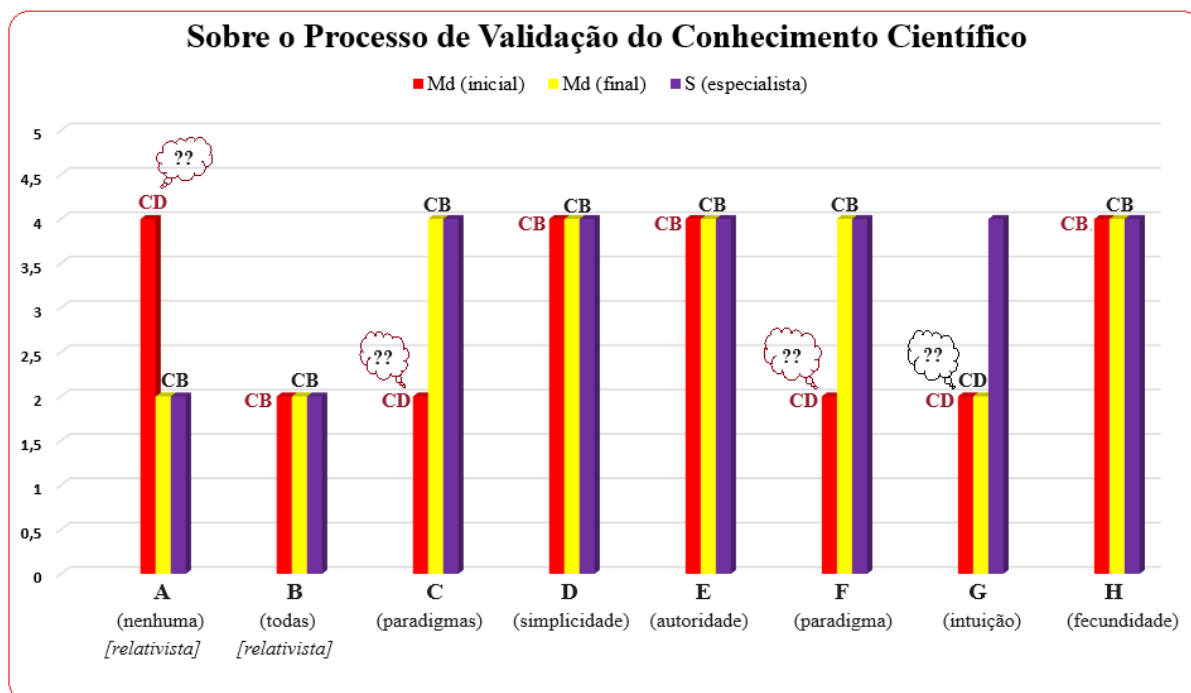
$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Bando de dados da pesquisa.

A Figura 37 exibe os valores da Md referentes aos oito itens avaliados nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, juntamente com os valores de S , e as respectivas categorizações das concepções dos estudantes.

Os resultados apontam que, diante da tarefa de avaliar a influência de diferentes critérios que os cientistas podem utilizar para justificar a escolha entre duas teorias científicas concorrentes e incompatíveis, as concepções prévias dos estudantes (barras vermelhas) apresentaram igual incidência das categorias “distorcida” e “bem informada” da NdC. Entre os critérios avaliados, observa-se que os estudantes ora concordaram, ora discordaram da chamada “visão relativista”. Em particular, concordaram com a ideia de que, na ausência de evidências empíricas sólidas e robustas a favor de uma das teorias, a comunidade científica, em contextos de controvérsia, tende a não aceitar nenhuma das teorias concorrentes (item A).

Figura 37 - Valores de mediana e do “índice de referência especialista” obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 7) e VOSE-EF (Questão 6) para o aspecto de NdC “Processo de Validação do Conhecimento Científico”.



Md: mediana; S: “índice de referência especialista”; CD: “*compreensão distorcida*”; CB: “*compreensão bem informada*”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

No entanto, expressaram discordância quanto à possibilidade de que duas ou mais teorias possam ser aceitas temporariamente até que novas evidências empíricas sejam obtidas (item B). Ademais, observou-se, nos itens C, F e G, uma nítida discordância em relação à influência do paradigma predominante e ao uso da intuição (ou pressentimento) no processo de escolha entre teorias científicas concorrentes e incompatíveis. Por outro lado, registrou-se concordância com a influência de critérios como a simplicidade (parcimônia), o *status* acadêmico (autoridade) e do potencial de fecundidade (fertilidade) da teoria para novos projetos de pesquisa (itens D, E e H).

Em relação aos resultados obtidos para os itens cuja interpretação e classificação é de “*bem informada*”, deve-se ressaltar que os percentuais de frequência das respostas não foram substancialmente elevados. Por exemplo, para os itens D, E e H, cujas sentenças transmitem uma imagem bem informada sobre o trabalho científico, foi encontrado um percentual de 57,9% de concordância para cada um. Além do mais, nesses itens, os percentuais de frequência de respostas discordantes foram consideráveis, sendo de 42,1% para o item D e 31,6% para os itens E e H. Na mesma linha de raciocínio, observa-se que o percentual de discordância para o

item B, que transmite uma imagem distorcida da atividade científica, também não foi significativamente elevado, sendo 57,9% de discordância e 31,6% de concordância.

Esses dados sugerem que, para esses itens, embora a classificação das respostas do grupo de estudantes tenha sido como de compreensão “*bem informada*” da NdC, havia um percentual significativo de estudantes com opiniões contrárias ao posicionamento epistemológico majoritário.

Em contrapartida, em relação às concepções posteriores dos estudantes sobre o processo de validação e aceitação de teorias científicas, pode-se reconhecer, na Figura 37, que quase todos os valores de $Md(f)$ se aproximaram e igualaram-se os valores do índice de referência S (barras amarelas). No total, as respostas finais para sete itens foram classificadas como compreensão “*bem informada*” da NdC. Além disso, observou-se que, nesses casos, o valor da $Md(f) = 4$ representava precisamente os percentuais majoritários de concordância ou discordância: 63,2% para os itens A e F; 84,2% para os itens B e H; 94,7% para os itens C e D e 100% para o item E.

Somente as respostas finais para o item G, referente ao uso da intuição (pressentimento) e de julgamentos subjetivos nas tomadas de decisões para avaliar a aceitação de teorias competidoras em controvérsias científicas, ainda permaneceram classificadas como compreensão “*distorcida*” da NdC. Entretanto, observou-se uma melhoria significativa no percentual de distribuição das respostas. Enquanto na primeira coleta de dados, cerca de 79% dos estudantes discordaram da sentença (e 21,1% concordaram), na segunda coleta de dados, embora o valor da mediana tenha se mantido constante $Md(f) = Md(i) = 2$, obteve-se uma “*distribuição equilibrada*”, com 52,6% de discordância e 47,4% de concordância.

A literatura de pesquisa em ensino de ciências aponta resultados heterogêneos, até mesmo contraditórios. Nas pesquisas desenvolvidas por Teixeira (2003) e Gatti (2005), os autores observaram que inicialmente a maioria dos estudantes afirmavam a importância do consenso para o desenvolvimento científico, porém, muitos deles pareciam acreditar ingenuamente que esse consenso é obtido exclusivamente por meio de observações experimentais conclusivas que mostram que uma determinada teoria é verdadeira. Essa concepção, segundo os autores, aponta para fortes indícios de “*experimentalismo crédulo*”. Ao final dos cursos, os dados indicaram que alguns poucos estudantes ainda mantinham essa visão distorcida do trabalho científico¹²⁶.

¹²⁶ É importante notar que nem Teixeira (2003) nem Gatti (2005) investigaram diretamente e explicitamente as possibilidades de concordância dos participantes em relação a outros critérios de validação no processo de

Já os resultados obtidos por Cortez (2019) indicaram que, ao final da intervenção didática, os licenciandos não apresentavam mudanças significativas em relação às suas concepções sobre o processo de aceitação e validação do conhecimento científico. Por um lado, acreditam que as teorias científicas (ou o grupo de cientistas apoiadores) possuem certa “autoridade” ou “*status* acadêmico” que influencia diretamente na sua aceitação por parte de outros pesquisadores. Além disso, tendem a reconhecer que essa aceitação depende da familiaridade dos outros cientistas com a teoria proposta. Ou seja, em ambos os casos, observa-se uma concordância com a influência do “paradigma” ou do “programa de pesquisa” em períodos de controvérsias científicas, justificando as razões pelas quais os cientistas tendem a manter uma postura conservadora perante as ideias revolucionárias. Por outro lado, os dados revelaram que os licenciandos discordavam enfaticamente da ideia de que os cientistas sofrem quaisquer influências da intuição e da complexidade da teoria em suas tomadas de decisão.

Em relação à estrutura didático-organizacional da unidade de ensino empregada na disciplina de História da Ciência 2023-1, as discussões e reflexões sobre o peso relativo dos diversos fatores que pode influenciar o “Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico” foram intensificadas, de maneira mais explícita, nos encontros nos quais as controvérsias científicas eram temáticas principais: semana 8 (Natureza da Luz, séculos XVIII e XIX); semana 13 (Natureza dos Raios Catódicos); semana 15 (Análise do artigo de Einstein de 1905); e semana 16 (Tentativas Clássicas de Interpretação do Efeito Fotoelétrico).

Em particular, a leitura na íntegra do artigo de Einstein de 1905 – “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” – possibilitou apresentar o problema de pesquisa, detalhar a cadeia de raciocínio e o referencial teórico utilizado (o modelo de Wien para radiação de corpo negro e o Princípio de Boltzmann), citar os fatos que o levaram à proposição da hipótese heurística de “*quantum* de luz”, mostrar as limitações de seu modelo teórico, e identificar tanto as evidências empíricas disponíveis quanto as ausentes naquela época, sendo de fundamental importância para a validação e aceitação de suas ideias.

Todos esses elementos foram importantes para sustentar o argumento de que nos anos seguintes, entre 1905 e 1923, havia razões legítimas para a comunidade científica rejeitar a proposta de teoria quântica da radiação proposta por Einstein. De outro modo, objetivou-se contrapor-se explicitamente à imagem de senso comum e amplamente difundida de que essa rejeição se deu somente por causa de crenças pessoais ultrapassadas, com cientistas cujas mentes estavam fechadas para uma nova “Física Moderna” (embora alguns realmente

validação do conhecimento científico, tais como a intuição, a parcimônia, o paradigma, a fecundidade e a reputação acadêmicas dos cientistas proponentes, conforme são apresentados no questionário original VOSE.

estivessem); ou que as ideias revolucionárias de Einstein eram muito complexas, com uma matemática avançada, abstrata e incompreensível para os demais cientistas.

Conforme evidenciado no texto, a “hipótese de *quantum* de luz” foi derivada da analogia termodinâmica entre as equações já conhecidas para a entropia da radiação monocromática e para a entropia de um gás ideal ou de uma solução diluída, válida somente para uma densidade suficientemente baixa, isto é, dentro dos limites de validade da fórmula de radiação de Wien. Neste contexto, os professores-pesquisadores buscaram elucidar que a validade da hipótese de Einstein restringia-se apenas à luz de pequeno comprimento de onda (*e.g.*, ultravioleta), e não a todo espectro eletromagnético – das ondas de rádio até as dos raios gama (γ) –, portanto, tratava-se, de um modelo teórico ainda incompleto e de caráter heurístico.

Além disso, foi discutido que, embora Einstein tenha mostrado nesse artigo os resultados preliminares da aplicação de sua “hipótese de *quantum* de luz” fossem compatíveis com as evidências empíricas disponíveis e propriedades de três fenômenos envolvendo a emissão e transformação da luz (“regra de Stokes”, “efeito fotoelétrico” e “ionização de gases”), a importante derivação da “lei do efeito fotoelétrico”, na qual uma das assertivas é que o potencial de corte é linearmente dependente da frequência da radiação eletromagnética, resultou de uma extrapolação do modelo teórico, uma vez que até então essa relação linear nunca tinha sido testada experimentalmente. Nas palavras de Einstein (1905, p. 146): “Se a fórmula deduzida for correta, então o potencial de corte, quando plotado no gráfico em coordenadas cartesianas, em função da frequência de luz incidente, deve fornecer uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza da substância”. Em síntese, nesse momento, buscou-se argumentar que a hipótese de Einstein de “*quantum* de luz”, na época de sua proposição, ainda carecia de um sólido e robusto apoio experimental, sendo uma das principais razões para sua rejeição temporária.

As complexidades do “Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico”, especialmente a influência do paradigma dominante e de seu *status* acadêmico hegemônico – a teoria clássica do eletromagnetismo – continuaram ser exploradas e aprofundadas de uma maneira explícita na semana 16. Abordamos as tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, como exemplificadas pela “hipótese de gatilho” de Lenard em 1902, pela hipótese de “*quantum* de ação elementar” de Arthur E. Hass em 1910, e pelas “hipóteses de dupletos-elétricos” de J. J. Thomson em 1910 e 1913.

Mesmo que tais hipóteses tenham sido rejeitadas pela comunidade científica, o ponto central delas foi mostrar que era possível derivar a mesma “lei do efeito fotoelétrico” de Einstein e explicar os resultados experimentais disponíveis, com satisfatório grau de adequação

empírica, a partir de modelos particulares de estrutura atômica, a partir dos quais compreendia-se a interação entre radiação eletromagnética e a matéria, por meio das propriedades clássicas de ressonância ondulatória.

Em conjunto, essas discussões e reflexões contribuíram para mostrar aos estudantes que, além da difícil aceitação da fragilidade da teoria clássica do eletromagnetismo, umas das teorias mais bem-sucedidas da Física até então, para a qual os recentes experimentos de H. Hertz de 1887 contribuíram para ampla consolidação, esses outros fatores contribuíam decisivamente para o ambiente de dúvidas, incertezas e rejeição da teoria quântica de Einstein.

Diante do exposto, embora tenha sido observado que ainda persistam algumas dúvidas dos estudantes quanto ao peso relativo do uso do fator “intuição” no “Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico”, os nossos resultados indicam que a organização da unidade de ensino, juntamente com a aplicação de uma abordagem histórica, contextualizada e reflexiva, foram importantes por promover uma compreensão mais precisa e bem informada sobre processo de validação e aceitação de teorias científicas.

4.2.7 Sobre Leis e Teorias Científicas

Além das questões anteriores nas quais investigou-se a compreensão epistemológica dos estudantes em relação ao caráter provisório das “teorias” e “leis” na estrutura do conhecimento científico (cf. Subseção 5.2.2: Sobre a Natureza do Conhecimento Científico), também foi elaborada uma pergunta específica abordando a definição e a distinção entre esses dois conceitos científicos. No questionário VOSE-RCN, foi indagado:

[Questão 4] “Em tempos de “Pós-Verdade” e “Fake-News”, a atenção aos significados dos termos técnicos é fundamental. Na ciência, toda discussão intelectualmente honesta começa apenas depois que se tem um conjunto de dados empíricos confiáveis, sobre os quais é possível elaborar e defender diferentes interpretações. E, para participar de uma discussão técnica de alto nível, uma pessoa necessita de experiência e de excelente qualificação profissional. Infelizmente, hoje em dia, muitas pessoas, até mesmo autoridades públicas, são despreparadas ou simplesmente agem de forma intelectualmente desonesta quando se veem incapazes de defender seus argumentos sobre um tema técnico-científico, principalmente aqueles que geram algum tipo de comoção social, optando muitas vezes por questionar a confiabilidade dos dados empíricos disponíveis ou a índole e o caráter dos cientistas envolvidos sem o apoio de evidências justificáveis. De fato, esse tipo de conduta estimula crises sociais que são geradas pela estupidez e pela desinformação, como a desconfiança infundada na eficácia de diversas vacinas historicamente bem-

sucedidas, fazendo com que doenças anteriormente praticamente erradicadas, como o sarampo, voltem a ser um problema de saúde pública no Brasil e em outros países”.

Considerando a importância do significado correto e preciso dos termos científicos, julgue os itens abaixo.

Já no questionário VOSE-EF, perguntou-se sucintamente:

[Questão 5] Considerando a importância do significado correto e preciso dos termos científicos, julgue os itens abaixo sobre teorias e leis científicas.

Entre as concepções de senso comum investigadas, verificou-se se os estudantes consideravam que leis e teorias científicas são conceitos idênticos ou diferentes, juntamente com as razões subjacentes a essas percepções (itens D, E, F e G). Além disso, examinou-se se a expressão “teoria científica” é compreendida como uma suposição meramente hipotética, isto é, sem o apoio empírico robusto para seus enunciados (item A); e se as teorias, mediante acúmulo de corroborações experimentais, podem ser elevadas ao *status* de lei científica, havendo uma hierarquização empírica entre esses dois conceitos (item B). Também foi sugerido que ambos os conceitos podem possuir características semelhantes, como dependência da corroboração empírica e natureza provisória (item C e H).

O Quadro 16 mostra os enunciados dos itens declarativos examinados, assim como os valores da $Md(i)$ e $Md(f)$, incluindo o S , e a classificação das concepções epistemológicas prévias e posteriores dos estudantes.

Quadro 16 - Itens declarativos a respeito do “Leis e Teorias Científicas” investigados nos questionários VOSE-RCN (Questão 4) e VOSE-EF (Questão 5).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação
A. As teorias científicas são suposições hipotéticas sobre algum fenômeno, com pouquíssimas evidências empíricas para apoiá-las; portanto, não possuem tanta credibilidade e nem são tão confiáveis quanto às leis científicas.	$Md(i) = 2$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 1$	“bem informada”
	$S = 1$	
B. Se uma teoria científica resiste a inúmeros e variados testes experimentais, então ela poderá se tornar uma lei científica; portanto, uma lei possui muito mais evidências empíricas de apoio e se aplica a um número maior de eventos e fenômenos.	$Md(i) = 4$	“distorcida”
	$Md(f) = 2$	“parcialmente informada”
	$S = 1$	
C. Existem teorias científicas que possuem mais evidências empíricas de apoio do que algumas leis científicas em fenômenos da mesma área de pesquisa.	$Md(i) = 3$	“divergência equilibrada”
	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
D. As teorias e as leis científicas são diferentes tipos de conceitos/categorias nas ciências naturais; portanto, elas não podem ser comparadas ou organizadas hierarquicamente quanto a algum grau de superioridade ou de certeza científica.	$Md(i) = 3$	“divergência equilibrada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	

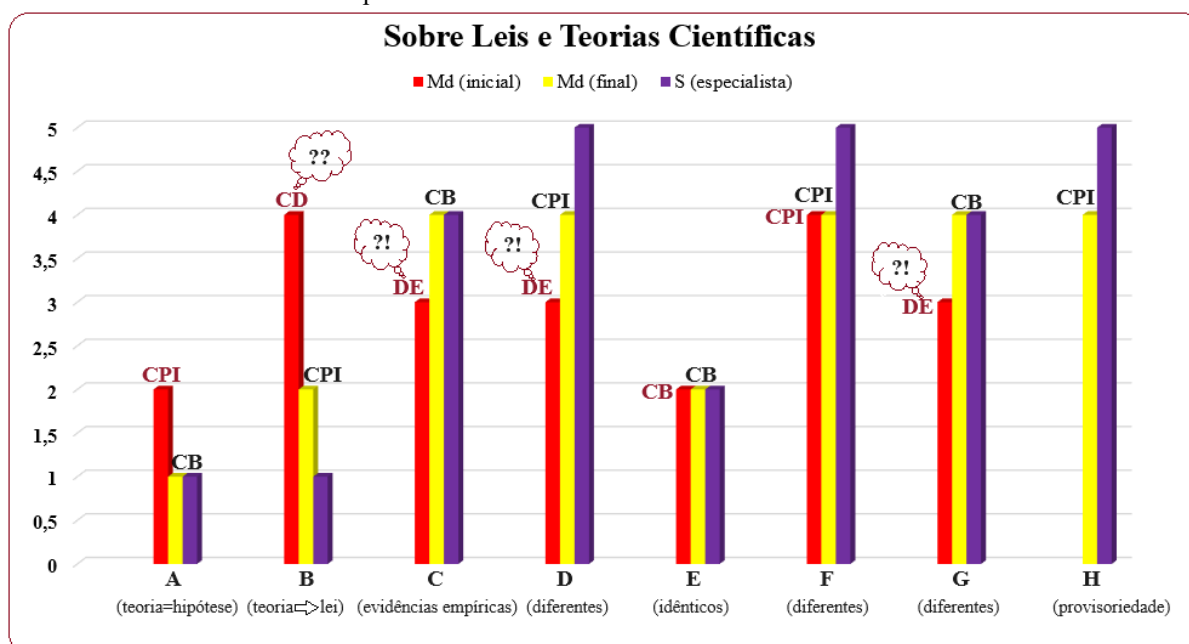
E. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias idênticos, pois ambas podem ser refutadas ou invalidadas no futuro, bem como utilizadas para fazerem previsões sobre um fenômeno.	$Md(i) = 2$	“bem informada”
	$Md(f) = 2$	“bem informada”
	$S = 2$	
F. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias diferentes, enquanto teorias produzem afirmações generalizadas e universais sobre a natureza, as leis científicas são mais específicas e restritas a casos particulares dos fenômenos.	$Md(i) = 4$	“parcialmente informada”
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	
G. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias diferentes, embora ambas possam fazer previsões acerca de um fenômeno, o que possibilita que ambas possam ser confirmadas ou refutadas/invalidadas.	$Md(i) = 3$	“divergência equilibrada”
	$Md(f) = 4$	“bem informada”
	$S = 4$	
H. Na História da Física, algumas leis científicas têm mostrado um período de corroboração científica (validade) relativamente mais duradouro em comparação com o tempo de vida das teorias científicas que as originaram. No entanto, é importante reconhecer que a validade científica de qualquer lei ou teoria científica está sujeita a um processo contínuo de investigação e revisão.	Não se aplica.	Não se aplica.
	$Md(f) = 4$	“parcialmente informada”
	$S = 5$	

$Md(i)$: mediana inicial; $Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

A Figura 38 ilustra o gráfico construído com os valores da Md referentes aos oito itens avaliados nos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF, juntamente com os valores de S , e as respectivas categorizações das concepções dos estudantes.

Figura 38 - Valores da mediana obtidos nos questionários VOSE-RCN (Questão 4) e VOSE-EF (Questão 5) para o aspecto de NdC “Sobre Leis e Teorias Científicas”.



Md : mediana; S : “índice de referência especialista”; CPI: “compreensão parcialmente informada”; DE: “divergência equilibrada”; CD: “compreensão distorcida”; CB: “compreensão bem informada”.

Fonte: Banco de dados pesquisa.

Nota-se que as concepções prévias da NdC dos estudantes (barras vermelhas) foram classificadas como “*bem informada*” (somente no item E e, para os itens A e F, como “*parcialmente informada*”. Além disso, para os itens C, D e G, observou-se uma “*divergência equilibrada*”, corroborada pela distribuição percentual das respostas (ver Tabela 2, itens 4C, 4D e 4G).

Esses dados sugerem que, inicialmente, em alguns momentos, os estudantes reconheciam que leis e teorias científicas são formas distintas de conhecimento, como pode ser observado pela discordância em relação à sentença do item E ($Md(i) = 2$) e concordância com o item F ($Md(i) = 4$) e, em especial, pelo entendimento de que o significado de “teoria científica” não é o mesmo que “hipótese” (discordância para item A, $Md(i) = 2$).

No entanto, a distribuição percentual para o item E ($C+CF = 42,1\%$, $D+DF = 52,6\%$ e $I = 5,3\%$), indica que o valor encontrado para a $Md(i) = 2$ não representa precisamente uma ampla maioria no posicionamento discordante dos estudantes, sinalizando, na verdade, uma possível divergência equilibrada.

Por outro lado, para o item B, as respostas indicam uma compreensão “*distorcida*” da NdC. Nele, foi afirmado: “**B.** Se uma teoria científica resiste a inúmeros e variados testes experimentais, ela então poderá tornar-se uma lei científica; portanto, uma lei possui muito mais evidências empíricas de apoio e se aplica a um número maior de eventos e fenômenos”. Para esse item, obteve-se um valor de $Md(i) = 4$, que, de fato, representa que 57,9% (11 estudantes) concordaram que uma teoria se torna automaticamente uma lei após resistir a inúmeros e variados testes experimentais. A concepção de que as leis são hierarquicamente superiores às teorias científicas, em virtude do acúmulo de evidências empíricas, é uma ideia de senso comum, socialmente difundida e bastante contestada na literatura de ensino de ciências, cujas raízes remetem à “*visão empírico-indutivista e a-teórica*” e à ausência de discussões e reflexões explícitas sobre as definições epistemológicas de tais conceitos (Lederman *et al.*, 2002).

Contudo, essa concepção pareceu não ser bastante consistente. Isso porque, para o item C, no qual era indicada uma relação hierárquica inversa (“**C.** Existem teorias científicas que possuem mais evidências empíricas de apoio do que algumas leis científicas em fenômenos da mesma área de pesquisa”), as repostas se mostraram divididas de forma aproximadamente igual ($C+CF = 36,8\%$; $I = 31,6\%$; $D+DF = 31,65$), resultando em um valor de $Md(i) = 3$, caracterizando uma divisão equilibrada de posicionamentos epistemológicos.

Na Figura 38 também são mostrados os resultados obtidos para as concepções epistemológicas posteriores dos estudantes sobre esse aspecto da NdC (barras amarelas). É

perceptível que, em todos os itens avaliados, os valores de $Md(f)$ se aproximaram ou igualaram aos valores de S .

Todavia, dentre as concepções posteriores dos estudantes, com base nos dados de distribuição percentual das respostas em cada categoria, nota-se para o item C a persistência de uma possível “*divergência equilibrada*” – $C+CF = 52,6\%$ e $D+DF = 47,4\%$. A sentença do item C sugere que “existem teorias científicas que possuem mais evidências empíricas de apoio do que algumas leis científicas em fenômenos da mesma área de pesquisa”. Essa afirmação foi considerada “*bem informada*” sobre a NdC ($S = 4$), pois devido a maior abrangência em relação às leis, as teorias científicas englobam um número significativo de diferentes fenômenos, muitas vezes não correlacionados à primeira vista, incorporando suas respectivas leis e as evidências empíricas disponíveis. Portanto, nesse caso específico, o valor da $Md(f) = 4$ não é precisamente representativo e requer cautela na construção das inferências sobre a aprendizagem desse aspecto da NdC.

Por outro lado, para o item B, o único item declarativo cujas concepções prévias foram categorizadas como “*distorcida*”, agora observa-se um valor de $Md(f) = 2$, indicando uma discordância de uma sentença considerada uma ideia distorcida sobre o trabalho científico. Esse resultado é confirmado pela distribuição percentual: $C+CF=15,8\%$ e $D+DF=84,2\%$. A classificação das respostas posteriores como “*parcialmente informada*” resulta da atribuição de máxima discordância para o índice de referência ($S = 1$). Entretanto, a variação entre os valores de $Md(i)$ e $Md(f)$ é evidente e significativa do ponto de vista da mudança de posicionamento epistemológico.

De maneira geral, os resultados apresentados nesta subseção diferem de alguns outros encontrados na literatura de pesquisa em ensino de ciências, que têm relatado obstáculos e dificuldades em relação à aprendizagem desse aspecto da NdC na formação inicial de professores de disciplinas científicas.

No estudo conduzido por Teixeira (2003), embora o autor tenha constatado uma melhoria nas concepções epistemológicas dos estudantes, observou-se que, ao final da intervenção didática, mais da metade dos estudantes apresentaram respostas epistemologicamente não compatíveis com os estudos contemporâneos da HFSC: cerca de 30% consideravam teorias como ideias, estudos ou fatos sem corroboração empírica sólida e robusta, ou seja, ideias ainda sem validade e aceitação pela comunidade científica; outros 13% acreditavam que as teorias evoluem progressivamente com o acúmulo de evidências empíricas e se tornam leis a partir do momento em que cessam as dúvidas e incertezas; 6,5% afirmavam que as teorias são provisórias, enquanto as leis científicas são imutáveis; e 13% foram

classificadas como respostas não compreendidas. Por outro lado, as respostas de 38,7% indicavam uma compreensão bem informada de que as teorias científicas são explicações de fenômenos, enquanto leis expressam as relações entre os fenômenos.

Cortez (2019) constatou que, mesmo após uma sequência didática fundamentada na HFSC sobre modelos atômicos, os licenciandos ainda tendiam a concordar que as teorias não são tão definidas quanto as leis científicas, isto é, que as teorias científicas são consideradas análogas a suposições hipotéticas que ainda carecem de sólida e robusta corroboração empírica (item A), e, ao satisfazerem esse critério de validação, podem alcançar o *status* de lei científica (item B). Além disso, a autora observou que eles, de forma coerente e consistente, porém equivocada, discordavam da sentença que afirmava que teorias e leis são diferentes conceitos/categorias e sem transformações entre elas (item D). Portanto, ao final da intervenção didática, a autora concluiu que os estudantes apresentavam uma compreensão “*distorcida*” em relação a esse aspecto da NdC, não conseguindo diferenciar adequadamente os conceitos de teorias e leis científicas.

A pesquisa realizada por Durbano (2012) foi observado que, embora todos os estudantes reconhecessem que leis e teorias científicas são formas distintas de conhecimentos, metade deles atribuía essa diferença à ideia equivocada de que as leis científicas seriam, supostamente, mais corroboradas experimentalmente e mais confiáveis do que as teorias científicas. Portanto, consideravam existir algum tipo de hierarquia empírica entre esses dois conceitos. As respostas aos quatro itens declarativos do questionário original VOSE forneceram dados adicionais que fortaleceram as conclusões do autor, sinalizando uma compreensão “*distorcida*” sobre esse aspecto da NdC.

Em relação à estrutura didático-organizacional da unidade de ensino implementada na disciplina de História da Ciência 2023-1, as discussões e reflexões explícitas acerca das definições e diferenciações entre os conceitos de leis e teorias científicas foram intensificadas na semana 17 (penúltimo encontro), cujo tema principal era “As Investigações Experimentais de Robert Millikan sobre o Efeito Fotoelétrico”. Para o desenvolvimento da aula, foi solicitada a realização de um seminário coletivo (o terceiro ao longo da disciplina) baseado na tradução parcial do artigo intitulado “Uma determinação fotoelétrica da constante de Planck ‘ h ’” (Millikan, 1916c). Devido à grande extensão desse texto histórico de fonte primária (36 páginas), foram selecionadas somente as seguintes seções para leitura prévia e análise: Introdução; Aparato Experimental; Fontes de Erros e suas Eliminações; e Teoria da Fotoemissão.

Ao longo das quatro aulas, os professores-pesquisadores procuraram auxiliar os estudantes a: (i) reconhecer a importância do desenvolvimento histórico dos testes experimentais sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no período de 1898-1917; (ii) compreender os detalhes sobre funcionamento do aparato experimental construído por Millikan e colaboradores para testar a validade da equação fotoelétrica de Einstein – uma lei científica; (iii) entender como Millikan e colaboradores identificaram fontes de erros experimentais nos trabalhos predecessores, assim como implementaram suas respectivas eliminações; e, de maneira mais significativa, (iv) reconhecer que Robert Millikan, apesar de ter contribuído para corroboração empírica da “lei fotoelétrica” de Einstein, rejeitou enfaticamente e explicitamente a teoria quântica para natureza da luz, optando por defender uma teoria da fotoemissão fundamentada na Física Clássica, isto é, na teoria clássica do eletromagnetismo, apresentada nos trabalhos de J. J. Thomson de 1903.

Em particular, muitos diálogos explícitos sobre o aspecto da NdC “Leis e Teorias Científicas” se desdobraram a partir da tentativa de compreender as razões para o posicionamento “inesperado” de Robert Millikan na conclusão do seu artigo científico. Em outras palavras, indagou-se: Por que Millikan rejeitou a teoria quântica de Einstein, mesmo tendo acabado de obter dados bastante confiáveis que empiricamente corroboravam a “lei fotoelétrica” de Einstein, cuja derivação foi um resultado direto da aplicação da “hipótese do *quantum* de luz”? A partir desse questionamento, aliado às informações das aulas anteriores sobre as tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, foi possível elucidar, por exemplo, que a mesma “lei fotoelétrica de Einstein” já tinha sido derivada por outros cientistas (Arthur Hass, J. J. Thomson, Arnold Sommerfeld e O. W. Richardson) a partir de diferentes modelos teóricos clássicos, incompatíveis e contraditórios com a teoria quântica de Einstein. Dessa forma, com base em informações históricas primárias, objetivou-se mostrar aos estudantes que a confirmação empírica de uma “lei científica” não implica necessariamente a validação e aceitação de uma única “teoria científica”, visto que essa mesma lei pode ser derivada a partir de outras teorias concorrentes.

Diante desse contexto descritivo, destarte ainda subsistam algumas pequenas confusões e incompreensões epistemológicas (Item C na Figura 38), os resultados referentes ao aspecto da NdC “Leis e Teorias Científicas” sugerem que a estruturação da disciplina, associada à implementação de uma abordagem histórica abrangente e contextualizada, de caráter reflexivo, utilizando como suporte didático textos históricos, tanto de fontes primárias quanto secundárias, contribuiu para uma compreensão mais bem informada sobre o processo de construção do conhecimento científico.

4.2.8 Sobre a Natureza dos Modelos Científicos

A compreensão dos estudantes sobre a “Natureza dos Modelos Científicos” foi investigada exclusivamente no questionário VOSE-EF. Partiu-se do pressuposto ausubeliano de que a análise e interpretação dos resultados seriam um pouco mais robustas e confiáveis se as concepções posteriores dos estudantes fossem avaliadas por meio de uma questão totalmente não familiar sobre a NdC. Nesse contexto, formulou-se a seguinte pergunta:

[Questão 1] Qual a relação entre os modelos científicos e a realidade física (e.g., modelo do Big Bang, modelo de “*quantum* de luz”; modelo-padrão das partículas elementares)?

Entre as concepções epistemológicas investigadas, verificou-se se os estudantes concordavam ou discordavam dos itens declarativos que sugerem que um modelo científico é uma construção humana abstrata. Essa construção envolve corroboração empírica, teorias subjacentes e o uso da imaginação, criatividade e analogias (item A e C), representando de forma simplificada a realidade física e, portanto, sujeita a revisões e refutações (itens C, D, F e G). Para esse primeiro conjunto de itens, foi atribuído o valor máximo para o $S = 5$, uma vez que tais sentenças estão em consonância com os estudos contemporâneos da HFSC.

Do mesmo modo, por outro lado, buscou-se examinar se os estudantes concordavam com a ideia de senso comum (e estereotipada) de que um modelo científico, uma vez aceito pela comunidade científica, é considerado uma cópia fiel, exata e genuína da realidade física, porque foi “descoberto” empiricamente pelos cientistas. Isso seria algo que estava oculto, encoberto ou escondido e que foi revelado e/ou encontrado de forma pronta, definitiva e imutável (itens B e E). Para esse segundo conjunto de itens declarativos, foi atribuído o valor mínimo para $S (= 1)$, uma vez que tais sentenças transmitem uma imagem que está em total discordância com a epistemologia moderna.

O Quadro 17 mostra os enunciados dos sete itens declarativos investigados, bem como os valores da Md , incluindo o S e as correspondentes classificações das concepções epistemológicas posteriores dos estudantes.

Quadro 17 - Itens declarativos a respeito do “Modelagem Científica” investigados nos questionários VOSE-EF (Questão 1).

Itens Declarativos	Resultados	Classificação

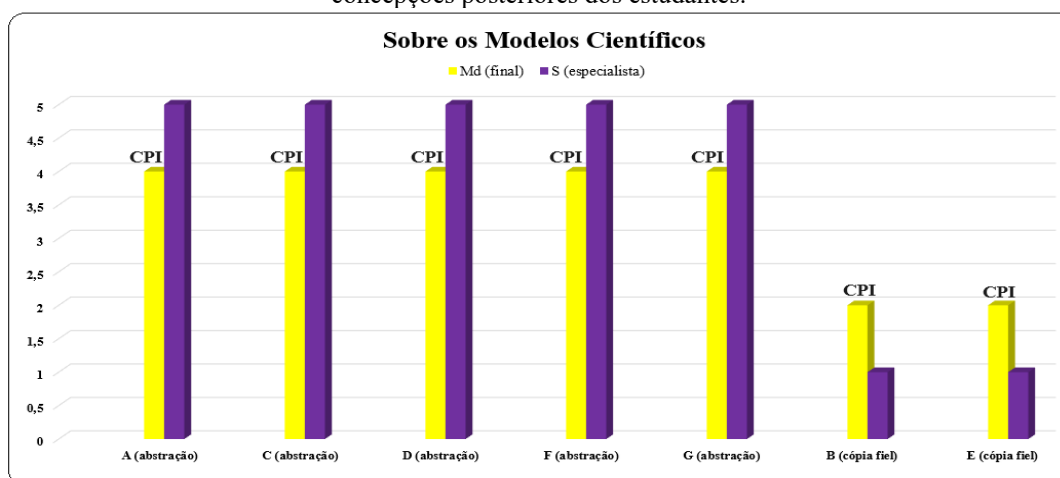
A. A construção de modelos científicos está fundamentada na corroboração empírica, porém, esse processo também reflete o papel essencial de leis e teorias subjacentes, uso de imaginação, criatividade e analogias por parte dos cientistas.	$Md(f) = 4,0$	“parcialmente informada”
	$S = 5,0$	
B. Uma vez aceito e incorporado ao corpus de conhecimento das ciências, um modelo científico é considerado uma cópia fiel da realidade. Portanto, os modelos científicos atualmente aceitos representam de forma autêntica a realidade física.	$Md(f) = 2,0$	“parcialmente informada”
	$S = 1,0$	
C. Os modelos científicos representam de forma simplificada a realidade física, a qual foi construída (não revelada) por meio de deduções matemática, da experimentação e observação rigorosas.	$Md(f) = 4,0$	“parcialmente informada”
	$S = 5,0$	
D. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois isso é impossível. No entanto, os modelos são construídos para explicar de maneira satisfatória os fenômenos e as observações empíricas disponíveis.	$Md(f) = 4,0$	“parcialmente informada”
	$S = 5,0$	
E. Os atuais modelos científicos, os quais são bastante abrangentes e precisos, representam de forma autêntica a realidade física, a qual foi revelada (não construída) por meio de deduções matemáticas, da experimentação e observação rigorosas.	$Md(f) = 2,0$	“parcialmente informada”
	$S = 1,0$	
F. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois isso é impossível, uma vez que são construções humanas e, portanto, limitadas pela nossa compreensão e pelas observações empíricas disponíveis.	$Md(f) = 4,0$	“parcialmente informada”
	$S = 5,0$	
G. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois estão sujeitos a revisões diante de novas evidências, podendo sofrer ajustes e até mesmo serem substituídos por outros mais abrangentes e precisos.	$Md(f) = 4,0$	“parcialmente informada”

$Md(f)$: mediana final; S : “índice de referência especialista”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa

A Figura 39 ilustra o gráfico construído com os valores da “mediana” (Md) referentes aos oito itens avaliados no questionário VOSE-EF, acompanhados dos valores do índice de referência (S) e das respectivas categorizações das concepções posteriores dos estudantes.

Figura 39 - Valores de mediana obtidos no questionário VOSE-EF (Questão 1) para o aspecto de NdC “Modelagem Científica”, assim como “índice de referência especialista”, e as respectivas classificações das concepções posteriores dos estudantes.



Md : mediana; S : “índice de referência especialista”; CPI: “compreensão parcialmente informada”.

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Observa-se que, em todos os itens avaliados, as concepções posteriores de NdC dos estudantes foram categorizadas como “parcialmente informada”, pois os valores obtidos para Md são próximos aos do índice de referência S ($\Delta \leq 1$). Além do mais, nota-se coerência e consistência nos posicionamentos, uma vez que expressaram concordância com o significado conceitual de modelo científico como uma representação abstrata e simplificada da realidade física. Ao mesmo tempo, discordaram da ideia de senso comum de modelo como cópia fiel e exata da realidade. Os dados referentes à distribuição percentual das respostas em cada categoria (ver Tabela 3, itens 1A-1G), mostrando elevados percentuais de concordância ou discordância, confirmam que os valores obtidos para a Md são representativos como medida de tendência central.

É relevante enfatizar que a categorização das respostas como “*parcialmente informada*”, e não como “*bem informada*” da NdC, não decorre de concepções epistemológicas distorcidas (exceto para o item F). Na realidade, isso ocorre devido à atribuição de valor máximo para o índice de referência S ($S = 5$ ou $S = 1$), conforme interpretado pelos professores-pesquisadores. Esse índice representa posicionamentos como “concorda fortemente” ou “discorda fortemente”, e não apenas como “concorda” ou “discorda”. Dessa forma, nota-se para o item A, por exemplo, que os dados de distribuição percentual indicam 100% de concordância ($C = 63,1\%$ e $CF = 36,8\%$, ver Tabela 3, item 1A), embora o valor obtido para Md ($= 4$) resulte na categorização das respostas do grupo participante como “*parcialmente informada*”.

Esses resultados estão alinhados com outros achados na literatura de pesquisa em ensino de ciências. Cortez (2019) observou que os licenciandos frequentemente destacaram o papel dos modelos científicos como formas de representação teórica da ciência, por meio dos quais se explica o mundo natural, suas características e transformações. Além disso, elas ressaltaram que, desde o pré-teste, a maioria dos licenciandos considerou a natureza dos modelos científicos como uma representação ou analogia de algo que não é passível de observação direta.

Teixeira (2003) inferiu que as respostas dos licenciandos podiam ser agrupadas em duas grandes categorias: (i) concepção de que os modelos científicos são reproduções autênticas da realidade física, fundamentadas na corroboração empírica sólida e em previsões bem-sucedidas (58% na primeira coleta de dados e 29% na segunda); (ii) concepção que reconhece as limitações dos modelos físicos, compreendidos como tentativas de representar a realidade (35,5% na primeira coleta de dados e 58,1% na segunda). Com base nesses resultados, o autor concluiu que houve uma nítida evolução na percepção dos licenciandos de que o conhecimento científico se desenvolve por meio de tentativas e erros, assim como na compreensão da natureza

provisória e simplificada dos modelos científicos, os quais não devem ser encarados como cópias autênticas da realidade física.

Gatti (2005) investigou dois possíveis entendimentos de professores de física em formação inicial sobre a natureza dos modelos científicos: concepção ontológica, considerando-os como cópias da realidade física, ou concepção epistemológica, vendo-os como construções humanas. Após a intervenção didática, a autora observou uma mudança significativa nos posicionamentos do grupo participante. Nesta ocasião, somente uma estudante manteve uma postura puramente ontológica em relação aos modelos científicos. Outros quatro estudantes apresentaram uma visão intermediária, não compatível com uma visão puramente epistemológica, pois suas respostas sugeririam indícios de uma concepção realista ingênua. Por fim, os seis participantes restantes apresentaram uma visão a respeito da natureza dos modelos científicos compatível com a epistemológica contemporânea.

No que diz respeito à estrutura didático-organizacional da unidade de ensino empregada na disciplina de História da Ciência 2023-1, as discussões e reflexões envolvendo a “Natureza dos Modelos Científicos” não se limitaram a um encontro específico. Pelo contrário, ocorreram em diferentes momentos, uma vez que esse tema se entrelaça com todos os outros aspectos da NdC abordados.

De modo geral, ao abordar situações vinculadas a controvérsias científicas históricas, como o debate sobre os modelos ondulatório e corpuscular na natureza da luz no século XIX, as discussões e reflexões explícitas sobre a “Natureza dos Modelos Científicos” facilitaram o ensino ao ancorar a compreensão epistemológica em situações-problemas reais. As informações históricas abordaram questões fundamentais da epistemologia, incluindo a origem do conhecimento científico e a influência do contexto social nas investigações. Além disso, as problematizações sobre controvérsias científicas permitiram aos estudantes explorarem diferentes perspectivas, enriquecendo sua visão da construção do conhecimento científico e ressaltando a natureza contingente e provisória dos modelos científicos ao longo do tempo.

Diante dos resultados apresentado nesta subseção, a contextualização histórica, aliada às leituras de fontes primárias, análises crítica, discussões e reflexões explícitas sobre as controvérsias científicas, que destaca as limitações, dificuldades técnico-científicas e as evidências empíricas disponíveis, parecer ter contribuído para uma visão *parcialmente informada* dos estudantes sobre a “Natureza dos Modelos Científicos”. Em termos gerais, pode-se afirmar que essa visão é próxima e compatível com a epistemologia contemporânea da HFSC, exceto para o aspecto “metodologia científica”, que parece demandar novas estratégias didáticas.

4.3 O QUE AFIRMAM OS ESTUDANTES SOBRE A ORGANIZAÇÃO E IMPLMENTAÇÃO DA UNIDADE DE ENSINO NA DISCIPLINA HISTÓRIA DA CIÊNCIA 2023-1?

Nesta seção, serão analisadas as respostas dos estudantes ao *Questionário de Avaliação Geral*. As percepções dos estudantes a respeito da organização didático-pedagógica e implementação da unidade de ensino oferecem informações importantes para analisar as contribuições do uso da abordagem contextual explícita e da TAS (Ausubel, 2003), bem como identificar pontos críticos que precisam ser repensados.

O instrumento é composto por dez questões fechadas, no formato de respostas de itens tipo-Likert, além de 5 questões abertas, com o objetivo de proporcionar maior flexibilidade e variedade de respostas, assim como a identificação de tópicos não antecipados. Foi abordada uma variedade de temas, incluindo a participação dos estudantes durante a disciplina (Questão 1), a qualidade dos textos históricos (Questão 2), os prazos estipulados para a entrega das atividades (Questão 3), a condução das discussões e reflexões pelos professores (Questão 4), a organização estrutural e sequência lógica dos assuntos abordados (Questão 5), a influência da disciplina para uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC (Questão 6) e para sua formação crítica enquanto futuros professores de Física (Questão 7), além da avaliação geral da disciplina como um todo (Questão 8). Ademais, foram incluídas questões sobre o tipo de oferta (optativa ou obrigatória) da disciplina na matriz curricular de ambas as modalidades licenciatura (Questão 9) e bacharelado (Questão 10).

As cinco questões abertas foram incluídas para investigar as perspectivas dos estudantes quanto às modificações ou não de suas próprias concepções sobre NdC após cursar a disciplina (Questão 11), quanto ao uso didático da História da Ciência (Questão 12) e às implicações para sua futura prática docente (Questão 13), bem como para identificar as principais dificuldades e obstáculos encontrados ao longo da disciplina (Questão 14), e para permitir comentários livres sobre outros aspectos considerados relevantes nessa experiência educacional (Questão 15) (ver **Apêndice D**).

4.3.1 Análise das Respostas ao *Questionário de Avaliação Geral*

Os resultados quantitativos da distribuição percentual das respostas às questões fechadas (1 a 8) do *Questionário de Avaliação Geral* da disciplina de História da Ciência 2023-1 estão apresentados no

Quadro 18 e na Figura 40. Já a sistematização temática das respostas e comentários dos estudantes às questões abertas (11 a 15), que abrangem diferentes aspectos da disciplina, pode ser consultada ao final do **Apêndice D**.

Esse questionário foi respondido de forma anônima no último encontro da disciplina por 22 estudantes (identificados por **E1**, **E2**, ..., **E22**).

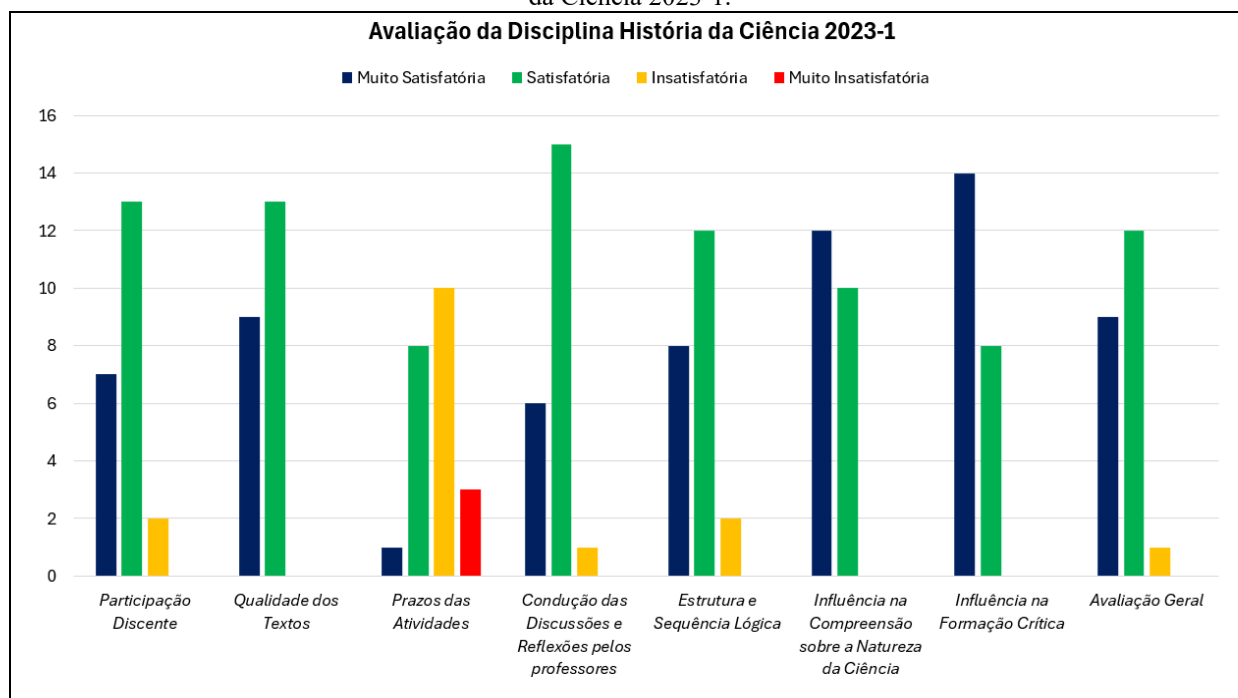
Em linhas gerais, a percepção dos estudantes sobre a organização e implementação da unidade de ensino é positiva, especialmente no que tange à qualidade dos textos selecionados, à influência em sua formação crítica e à compreensão mais bem informada sobre a NdC. Entretanto, identifica-se uma quantidade não desprezível de críticas e pontos importantes de insatisfação, notadamente relacionados à sobrecarga de atividades, exigência de prazos curtos para a realização das tarefas e à abordagem limitada dos fenômenos físicos, com foco específico no efeito fotoelétrico.

Quadro 18 - Distribuição percentual das respostas ao questionário (fechado) de avaliação geral da disciplina de História da Ciência 2023-1.

Temas Avaliados	Questão	Muito Satisfatória n [%]	Satisfatória n [%]	Insatisfatória n [%]	Muito Insatisfatória n [%]
Participação Discente	1	7 [32%]	13 [59%]	2 [9%]	0 [0%]
Qualidade dos Textos	2	9 [41%]	13 [59%]	0 [0%]	0 [0%]
Prazos das Atividades	3	1 [5%]	8 [36%]	10 [45%]	3 [14%]
Condução das Discussões e Reflexões pelos professores	4	6 [27%]	15 [68%]	1 [5%]	0 [0%]
Estrutura e Sequência Lógica	5	8 [36%]	12 [55%]	2 [9%]	0 [0%]
Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência	6	12 [55%]	10 [45%]	0 [0%]	0 [0%]
Influência na Formação Crítica	7	14 [64%]	8 [36%]	0 [0%]	0 [0%]
Avaliação Geral	8	9 [40%]	12 [55%]	1 [5%]	0 [0%]

Fonte: Banco de dados da pesquisa.

Figura 40 - Distribuição percentual das respostas ao questionário de avaliação da disciplina de História da Ciência 2023-1.



Fonte: Banco de dados da pesquisa.

(a) *Participação Discente*¹²⁷

A participação dos estudantes – em termos de assiduidade, pontualidade, contribuição nas discussões e reflexões, entrega das atividades, leituras e comprometimento – foi autoavaliada positivamente, com sete estudantes classificando-a como "*Muito Satisfatória*", 13 como "*Satisfatória*" e apenas dois como "*Insatisfatória*". Esses/as dois/duas últimos/as estudantes, em suas respostas às questões abertas 14 e 15, manifestaram críticas relacionadas à sobrecarga de atividades e à percepção de desajuste da disciplina em relação às suas expectativa, fatores que podem ter prejudicado um envolvimento mais profundo com o conteúdo.

Entre as observações, um/a estudante (identificado/a como **E14**) sugeriu: "*Dar mais atenção aos alunos do bacharelado, mesmo que o curso seja voltado para a licenciatura*"(Q.

¹²⁷ **Questão 1.** Como você avalia sua participação durante a disciplina de História das Ciências 2023-1 em termos de assiduidade, pontualidade, contribuição nas discussões e reflexões, entrega das atividades, leituras e comprometimento?

14). “[...] Gostaria de ver uma abordagem voltada para o pessoal do bacharelado, ou seja, para futuros cientistas. Na verdade, seria ótimo ter essa disciplina como obrigatória no bacharelado, porém de forma adequada para esse público” (Q. 15). Suas observações sugerem expectativas de maior ênfase em conteúdos técnicos e matemáticos avançados, com foco em aspectos experimentais e análise de dados do efeito fotoelétrico. Contudo, é importante ressaltar que a disciplina foi concebida para atender prioritariamente às necessidades específicas dos licenciandos, com ênfase na formação de professores e na compreensão mais bem informada sobre a NdC, sendo obrigatória para a licenciatura e apenas optativa para o bacharelado. Portanto, sua sugestão pode ser vista como descontextualizada e desalinhada com a finalidade principal da disciplina. Não obstante, essa dissonância sublinha a necessidade de reforçar, desde o início, uma comunicação clara dos objetivos e da estrutura da disciplina em seu formato atual, minimizando possíveis desalinhamentos de expectativas .

Por sua vez, o/a estudante **E21** comentou: “Controlar a quantidade de trabalhos extraclasse, considerando que grande parte dos alunos do período noturno trabalha para se sustentar. A carga atual dificulta e desanima o processo de aprendizagem” (Q. 14). A sobrecarga de atividades mencionada pode ter dificultado a assimilação hierárquica e a interação adequada com os subsunçores, bem como a predisposição ativa de alguns estudantes, essenciais para a aprendizagem significativa segundo Ausubel (2003). Essas críticas específicas à sobrecarga de atividades e prazos – que de fato foram bastante recorrentes – refletem alguns desafios inerentes ao perfil dos estudantes do período noturno, que frequentemente enfrentam limitações de tempo e energia.

Em geral, a análise das respostas ao tema autoavaliativo “Participação Discente” sugere a necessidade de ajustes na carga e nos prazos para entrega das atividades, bem como de estratégias mais flexíveis que considerem as particularidades dos diferentes públicos-alvo da disciplina. Tais medidas podem favorecer, em uma nova oportunidade, um maior engajamento dos estudantes e aprimorar o processo de aprendizagem significativa

(b) *Qualidade dos Textos Selecionados*¹²⁸

¹²⁸ **Questão 2.** Como você avalia a qualidade dos textos históricos e leituras obrigatórias solicitadas durante o curso em relação à adequação da linguagem, abordagem satisfatória do conteúdo, acessibilidade, dimensão adequada para leitura completa dentro do tempo estipulado e relevância para sua formação crítica?

A qualidade dos textos foi avaliada de forma positiva, com nove respostas classificando-a como "*Muito Satisfatória*" e 13 como "*Satisfatória*". Esse índice de aprovação sugere que os materiais selecionados para a unidade de ensino desenvolvida na disciplina História da Ciência 2023-1 desempenharam sua função de ativar subsunçores (conhecimentos prévios específicos e relevantes), favorecendo a assimilação significativa de novos conteúdos, conforme preconizado por Ausubel (2003). A escolha de textos adequados parece ter contribuído para a construção de novas conexões entre o conhecimento pré-existente e as novas informações, ajudando no refinamento e enriquecimento dos subsunçores, o que pode ter contribuído para uma compreensão mais aprofundada dos temas abordados.

No entanto, algumas sugestões merecem reflexão. O/A estudante E7 sugeriu: "*Abordar mais conteúdos relacionados à matemática*" (Q. 14). "*Seria interessante mais aplicação matemática. O assunto escolhido nas aulas foi bem interessante, e seria ainda mais enriquecido se houvesse mais discussões sobre a parte matemática, além de exercícios com cálculos*" (Q. 15). A integração da história da ciência com a matemática pode, de fato, enriquecer a compreensão de certos fenômenos, mas é importante considerar que o foco da disciplina está em desenvolver uma compreensão crítica e histórica da evolução do conhecimento científico, mais do que em aspectos técnicos ou de aplicação matemática. A abordagem matemática em nível avançado, embora pertinente em muitas áreas da Física, não constitui o ponto central desta disciplina, que visa promover uma reflexão crítica sobre os processos históricos que levaram ao desenvolvimento das ideias científicas.

(c) *Volume e Prazos de Entrega das Atividades*¹²⁹

O tema "Prazos das Atividades" apresentou o maior índice de insatisfação, com 10 das respostas classificando-o como "*Insatisfatória*" e três como "*Muito Insatisfatória*", enquanto apenas oito consideraram os prazos como "*Satisfatórios*" e uma os avaliou como "*Muito Satisfatórios*". Esses dados evidenciam que os prazos curtos e a sobrecarga de atividades foram desafios significativos para grande parte dos estudantes, dificultando o equilíbrio entre as demandas da disciplina e suas responsabilidades pessoais e acadêmicas.

¹²⁹ **Questão 3.** Como você avalia o prazo estipulado pelos professores para a realização e entrega das atividades de leitura extraclasse? Considere a extensão das leituras, a complexidade dos temas abordados e a carga horária da disciplina?

Três respostas registradas na Questão 14 destacam-se pela clareza e abrangência das críticas. O/A estudante **E1** afirmou: *“Entender que há outras disciplinas interfere na capacidade de cumprir as demandas. As leituras de grandes artigos, aliadas aos prazos de entrega, tornam-se muito difíceis e exaustivas”* (Q. 14). Já o/a estudante **E9** escreveu: *“Em minha sincera opinião, minha maior dificuldade foi realizar todas as atividades com o mesmo grau de qualidade devido ao curto prazo, considerando também as demais disciplinas. O curso foi extremamente satisfatório, mas as atividades semanais tornaram-se um obstáculo para vários colegas da turma”* (Q. 14). E, por sua vez, o/a estudante **E21** asseverou: *“Controlar a quantidade de trabalhos extraclasse, considerando que grande parte dos alunos do período noturno trabalha para se sustentar. A carga atual dificulta e desanima o processo de aprendizagem”* (Q. 14).

Esses comentários refletem uma sobrecarga cognitiva, exacerbada especialmente nas quatro últimas semanas da disciplina, devido à quantidade excessiva de atividades solicitadas e prazos apertados, o que gerou tensões e certa dose de desmotivação. Essa sobrecarga possivelmente comprometeu a qualidade do aprendizado e dificultou o estabelecimento de conexões significativas entre o novo conteúdo e o conhecimento prévio. De acordo com a teoria de Ausubel (2003), a aprendizagem significativa requer tempo suficiente para que os novos conteúdos sejam assimilados e integrados de forma não literal e não arbitrária aos subsunçores dos estudantes, de maneira clara e organizada, permitindo a construção de significados próprios. Assim, o planejamento adequado dos prazos é essencial para que os estudantes possam refletir, conectar os novos conceitos ao conhecimento pré-existente e assimilar o conteúdo de forma profunda e estruturada.

A necessidade de ajustes nos prazos é evidente. As modificações devem levar em conta o contexto pessoal e acadêmico dos estudantes, introduzindo maior flexibilidade no cronograma e priorizando atividades mais estratégicas. Equilibrar as demandas do curso com as limitações de tempo dos estudantes pode não apenas mitigar a insatisfação e melhorar a avaliação desse aspecto, mas também maximizar o impacto positivo da disciplina na formação crítica dos participantes e em sua compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC.

(d) *Condução das Discussões e Reflexões pelos Professores*¹³⁰

A condução das discussões e reflexões por parte dos professores-pesquisadores foi outro ponto amplamente reconhecido como um aspecto positivo da disciplina, com seis respostas classificando-a como "*Muito Satisfatória*", 15 respostas como "*Satisfatória*" e apenas uma como "*Insatisfatória*". Esses resultados sugerem que a mediação dos professores cumpriu seu objetivo de estimular a reflexão crítica, alinhando-se ao princípio da *reconciliação integrativa* de Ausubel (2003). O/A estudante **E3** ilustra essa percepção positiva ao comentar: "*Caluzi, dê mais aulas! Ouvir você falar é ótimo*" (Q. 14).

Alguns estudantes destacaram o valor dos debates em sala de aula, apresentações e leituras, considerando-os fundamentais para consolidar e transformar sua visão sobre a NdC. Como exemplo representativo, destaca-se a resposta do/a estudante **E16**, que sublinha como as atividades interativas contribuíram para aprofundar a compreensão da construção do conhecimento científico e das complexas dinâmicas sociais que a influenciam: "*Mesmo havendo o contato em outras disciplinas, como metodologia, acredito que o tema não havia sido debatido mais 'a fundo', pois sempre fomos questionados ao longo da disciplina sobre isso, por exemplo, em debates, apresentações e textos*" (Q. 11).

Apesar dos elogios, algumas sugestões indicaram possíveis melhorias. O/A estudante **E14** sugeriu: "*Tornar as atividades propostas mais claras, evidenciando seus objetivos e a metodologia requerida. [...] Além disso, dar dicas e feedback sobre a postura de apresentação oral*" (Q. 14). Já o/a estudante **E12** apontou: "*O tempo de fala dos alunos deve ser ajustado. É importante evitar o uso de termos menos formais nas discussões*" (Q. 14). O/A estudante **E19** destacou: "*Questionar os alunos de forma mais construtiva*" (Q. 14). Outra questão relevante foi levantada pelo/a estudante **E10**, que afirmou: "*Principalmente no retorno aos alunos. É importante que saibam como estão as suas reflexões sobre a NdC. Talvez, se houvesse menos reflexões escritas, os professores poderiam dar mais retornos [feedbacks]. Isso tornaria o desenvolvimento das ideias mais efetivo*" (Q. 14).

Pode-se concluir que, embora a condução das discussões e reflexões em sala de aula tenha sido bem avaliada, ajustes pontuais podem ser feitos para aprimorar a clareza das orientações, a gestão do tempo nas discussões e a oferta de feedback. Questionamentos mais

¹³⁰ **Questão 4.** Como você avalia a condução das discussões e reflexões sobre a Pseudo-História e sobre a Natureza das Ciências pelos professores em sala de aula? Considere a clareza na apresentação dos conceitos, a promoção do debate entre os estudantes, o estímulo à participação ativa e a relevância dos exemplos e casos apresentados.

direcionados e formativos podem enriquecer ainda mais o processo de ensino e de aprendizagem.

(e) *Estrutura e Sequência Lógica*¹³¹

A avaliação da estrutura e sequência lógica da unidade de ensino recebeu, em sua maioria, avaliações positivas, com 20 dos estudantes considerando-a "*Muito Satisfatória*" (8) ou "*Satisfatória*" (12), enquanto apenas dois a consideraram "*Insatisfatória*". Não houve respostas classificando-a como "*Muito Insatisfatória*". Esses resultados indicam que a estrutura da disciplina foi percebida como coerente e bem planejada, promovendo uma progressão lógica do conteúdo, do geral ao específico. Tal organização reflete a aplicação dos princípios da *diferenciação progressiva e reconciliação integrativa* da teoria de Ausubel (2003), utilizados no planejamento pedagógico da disciplina.

Entretanto, algumas críticas indicam que a ênfase excessiva no efeito fotoelétrico, apesar de sua relevância, pode ter limitado a percepção de abrangência da disciplina. O/A estudante **E15**, por exemplo, sugere que “[...] *seria interessante abordar mais eventos e fenômenos físicos durante as aulas*” (Q. 14), enquanto o/a estudante **E18** recomenda “*retomar o formato original do curso e seguir uma sequência lógica abrangente*” (Q. 14), que oferecia uma visão mais ampla e diversificada da História da Ciência. Além disso, o/a estudante **E20** propõe “*abordar mais conteúdos de Física, em vez de se aprofundar totalmente em apenas um tópico*” (Q. 14). Essas críticas sugerem que o foco aprofundado no fenômeno do efeito fotoelétrico, apesar da coerência interna estrutural, pode ter gerado a percepção de uma perda de diversidade temática, limitando a exploração de outros eventos históricos e científicos que enriqueceriam a experiência de aprendizado e atenderiam às expectativas e interesses dos discentes.

Isso pode ser entendido dentro do contexto do planejamento didático-pedagógico da disciplina, que optou por uma abordagem sincrônica da História da Ciência, priorizando um estudo mais aprofundado do efeito fotoelétrico, mas também fornecendo uma preparação inicial que inclui quatro áreas principais da Física do século XIX: óptica-ondulatória,

¹³¹ **Questão 5.** Como você avalia a organização estrutural e a sequência lógica dos assuntos abordados durante a disciplina? Considere a progressão dos temas, a conexão entre os conteúdos, a clareza na apresentação e a coerência na ordem dos tópicos.

eletromagnetismo, termodinâmica, estrutura da matéria e novas radiações. Essa decisão visava contextualizar o fenômeno dentro de um panorama geral da evolução da Física. A crítica do/a estudante **E15** reflete uma percepção de que o foco específico pode ter limitado a abrangência da disciplina, mas essa abordagem sincrônica busca justamente integrar diversos campos do conhecimento, o que, embora necessário para uma visão mais profunda e integrada da História da Física, pode ter gerado desconforto para estudantes que esperavam uma abordagem mais tradicional.

Outro ponto levantado pelo/a estudante **E16** refere-se à recomendação de “[...] evitar a redundância com conteúdo abordado em outras disciplinas” (Q. 14). Essa crítica sugere a necessidade de maior articulação curricular, evitando repetições que possam ser percebidas como desnecessárias. No entanto, a retomada de conceitos prévios é fundamental para assegurar subsunçores claros, estáveis e bem definidos na estrutura cognitiva dos estudantes. Esses elementos são cruciais para que novos conteúdos mais complexos sejam compreendidos de forma significativa, como destacado na teoria de Ausubel (2003). Curiosamente, o/a mesmo/a estudante **E16** mencionou, ao final de sua resposta, a necessidade de “[...] apresentar um discurso mais claro, com perguntas cujas respostas já estejam pré-estabelecidas pelos professores, não tão difíceis de compreender” (Q. 14). Na mesma linha de raciocínio, o/a estudante **E21** sugeriu: “Tentar abordar um tema que não seja tão avançado para a compreensão. Isso facilitaria para o aluno realizar as atividades de maneira mais proveitosa” (Q. 15).

Essas declarações evidenciam a importância de consolidar uma base sólida de conhecimentos prévios para facilitar a assimilação de novos conteúdos, reafirmando o papel estratégico da retomada de conceitos em disciplinas interligadas. A TAS enfatiza a importância de um material instrucional organizado e adequado no nível cognitivo dos estudantes, de modo que os conceitos sejam acessíveis e possam ser assimilados de forma gradual e estruturada. As sugestões de **E16** e **E21**, portanto, refletem uma preocupação com a potencial sobrecarga cognitiva que ocorre quando o conteúdo é muito complexo em relação aos subsunçores prévios dos estudantes. Isso pode dificultar a integração de novos conceitos e gerar uma aprendizagem baseada em memorização em vez de compreensão profunda.

Em resumo, embora o foco específico e a abordagem sincrônica possam ter gerado desconforto para alguns estudantes, essas escolhas foram estrategicamente fundamentadas no objetivo de promover a aprendizagem significativa. A priorização de tópicos aprofundados, aliada à retomada de conceitos essenciais, buscou não apenas construir subsunçores sólidos, mas também desenvolver uma compreensão crítica e contextualizada da História da Ciência.

As críticas levantadas, por certo, oferecem uma oportunidade de refinamento. No entanto, elas não comprometem a coerência estrutural nem a intenção pedagógica da disciplina, que permanece centrada na aplicação dos princípios da *diferenciação progressiva* e *reconciliação integrativa*.

(f) *Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência*¹³²

Os elevados índices de aprovação em relação à influência da disciplina na compreensão da NdC (12 como "*Muito Satisfatória*" e 10 como "*Satisfatória*") sugerem que a disciplina teve um papel relevante em estimular os discentes a refletir e atribuir significados aos conteúdos abordados. De maneira geral, as respostas apresentadas às questões abertas sobre a modificação da concepção inicial dos estudantes quanto à NdC (Questão 11) ou ao uso didático da História da Física (Questão 12) ou à prática docente futura (Questão 13) após a disciplina de História das Ciências 2023-1 (Questão 11), mostram uma gama de reações que refletem tanto mudanças significativas quanto ajustes mais sutis nas percepções dos participantes.

A resposta do/a estudante **E10** é representativa no que diz respeito a uma possível alteração substancial na compreensão epistemológica dos estudantes sobre a NdC: *Minha visão sobre a imparcialidade, e não a neutralidade, do cientista e, consequentemente, sobre a própria interpretação dos dados experimentais brutos, foi corroborada. Ainda vejo a ciência como um modelo que se baseia em dados experimentais observados, mas agora a enxergo como um modelo construído por pessoas sujeitas à influência de fatores sociais, culturais, econômicos e políticos. Em última instância, os dados experimentais são os mais importantes, mas entendo a influência de fatores humanos em suas interpretações*". Esse depoimento evidencia que visão da ciência como um processo totalmente neutro, imparcial e objetivo foi desafiada, com destaque para a ideia de que a ciência é uma construção humana, influenciada por fatores sociais, culturais, econômicos e políticos. De fato, a percepção de que a ciência é uma construção humana, sujeita a influências de outros contextos, foi um tema recorrente.

¹³² **Questão 6.** Como você avalia a influência da disciplina de História das Ciências 2023-1 para a construção de uma imagem mais autêntica sobre a Natureza das Ciências? **Questão 11.** Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto à Natureza das Ciências sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos.

Também houve uma reflexão sobre a distinção entre leis, teorias e postulados, com alguns estudantes destacando que esses conceitos, que antes pareciam confusos ou abstratos, se tornaram mais claros após as aulas, com uma ênfase no debate sobre as diferenças entre teorias e leis científicas, como exemplificado pelas respostas dos/as estudantes **E1** ("*Sim. Alguns conceitos e 'imagens' ficaram mais claros ou até foram alterados, levando-me a ter um pensamento crítico com as leituras. Um exemplo básico foi a distinção entre leis, teorias e postulados*" [Q. 11]), **E11** ("*Acho que houve um bom aprimoramento. Tenho a concepção de que tudo que vimos de alguma forma já estava em minha mente, por eu simplesmente ler bastante sobre isso. Por isso, acredito que a disciplina amadureceu minhas ideias, mas uma coisa 'nova' foi o debate sobre as diferenças entre leis e teorias científicas, que eu ainda não tinha refletido sobre*" [Q. 11]) e **E18** ("*Sim. Eu não tinha noção das diferenças e semelhanças entre leis e teorias científicas*" [Q. 11]).

Contudo, algumas respostas indicam que a concepção dos estudantes já estava parcialmente formada antes da disciplina, com um entendimento básico sobre a NdC. Respostas como as dos/as estudantes **E8** ("*Não sofreu muitas alterações. A professora Sandra Gatti trabalhou muito bem, mas essa disciplina conseguiu aprofundar o conteúdo de forma excelente*" [Q. 11]) e **E13** ("*Sim, mas não muito. Eu já tinha uma boa noção sobre aspectos da Natureza da Ciência (NdC) e História da Ciência (HC)*" [Q. 11]) sugerem que, embora a visão geral tenha permanecido a mesma, a disciplina ajudou a refinar e detalhar conceitos e concepções epistemológicas já pré-existentes, resultando em mudanças sutis ou ajustes.

Outros estudantes mencionaram que, apesar de já possuírem algum conhecimento prévio, agora conseguem refletir de maneira mais crítica sobre a história da ciência e os processos que envolvem a construção do conhecimento científico, como pelos estudantes **E3** ("*Sim, eu acho que antes dessa disciplina eu ainda tinha muitos pensamentos errados (mesmo no terceiro ano). Hoje em dia, sei analisar melhor a pseudo-história*" [Q. 11]), **E12** ("*Sim, sofreu mudanças. Começo pela palavra 'Ciência'. A consideração de que existem vários processos em torno de apenas uma palavra é algo mais claro para mim no momento. A questão da neutralidade científica também foi um aspecto que se tornou mais claro na minha percepção*" [Q. 11]) e **E17** ("*Sim. Antes de cursar a disciplina de História da Ciência, minha visão sobre a natureza da ciência (NdC) era um pouco arbitrária, mas agora consigo ter uma visão mais clara*" [Q. 11]).

De forma geral, as respostas revelam que a unidade de ensino empregada na disciplina História das Ciências 2023-1 foi eficaz em provocar mudanças na forma como os estudantes concebem a NdC, promovendo uma compreensão mais crítica e contextualizada da ciência

como um processo dinâmico e influenciado por múltiplos fatores. Enquanto alguns estudantes apresentaram uma mudança mais profunda e transformadora, outros experimentaram um amadurecimento das ideias já existentes. A disciplina parece ter cumprido seu papel ao proporcionar um espaço para reflexão, discussão e aprimoramento dos conhecimentos sobre o campo da ciência.

Sob a perspectiva de TAS proposta por Ausubel (2003), a atribuição de significados próprios está ligada à personalização dos subsunçores, o que pode contribuir para uma maior retenção e aplicação dos conceitos. Nesse contexto, as reflexões críticas propostas durante a disciplina parecem ter promovido esse tipo de aprendizado, embora os desafios relacionados ao volume de atividades e aos prazos tenham sido mencionados como fatores a serem considerados.

(g) *Influência na Formação Crítica*¹³³

Os resultados indicam que unidade de ensino foi bem-sucedida e reconhecida na promoção da formação crítica dos estudantes, com 14 respostas classificadas como "*Muito Satisfatória*" e 8 como "*Satisfatória*". Esses dados sugerem que a proposta didática conseguiu gerar e estimular discussões e reflexões sobre temas científicos e sociais, com impacto na formação acadêmica e profissional dos estudantes, incluindo a construção de uma imagem mais precisa e bem informada sobre a NdC e o fortalecimento de uma visão crítica da prática docente em relação ao uso de narrativas pseudo-históricas.

Além disso, alguns discentes sugeriram o aprofundamento das discussões sobre questões sociais no contexto científico. O/A estudante **E13** propôs: "*Trabalhar tópicos relacionados à condição elitista da sociedade, além de temas como racismo, machismo e sexismo*". Essa sugestão indica um interesse em expandir os debates críticos na disciplina. No entanto, embora a sugestão seja pertinente, é possível que o/a estudante **E13** não tenha lembrado

¹³³ **Questão 7.** Como você avalia a influência da disciplina de História das Ciências 2023-1 na sua formação crítica como futuro(a) professor(a) de física? Considere a ampliação do seu conhecimento sobre abordagens pedagógicas, a reflexão sobre os pressupostos da ciência e a capacidade de questionar e analisar criticamente os conteúdos da área. **Questão 12.** Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto ao uso didático da História da Física sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos. **Questão 13.** Sua concepção inicial (antes da disciplina) de prática docente futura sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Dê alguns exemplos.

ou não tenha considerado o fato de que a disciplina promoveu discussões e reflexões sobre a complexa relação entre a produção do conhecimento científico e as questões éticas, morais e políticas, como recordou o/a estudante **E5**: *“A disciplina de História da Ciência atendeu às expectativas, além de até mesmo surpreender, trazendo assuntos relativamente ‘polêmicos’ para uma maior e melhor construção do conhecimento”* (Q. 12).

Um exemplo significativo foi a análise do protagonismo de Lenard e de Johannes Stark (1874-1957) no contexto histórico-social da Alemanha nazista, e sua liderança na chamada “Física Alemã”. Essa discussão objetivou promover reflexões críticas sobre como valores socioculturais podem influenciar a produção do conhecimento científico e sua aplicação em contextos ideológicos.

Com base nas respostas das questões abertas 12 e 13, é possível identificar como a unidade de ensino influenciou diferentes aspectos da formação acadêmica e profissional na perspectiva dos estudantes. As respostas mencionam não apenas a relevância da História da Ciência para o aprendizado, mas também as implicações para a prática docente e a formação crítica dos futuros professores e pesquisadores. A análise dos depoimentos indicam três enfoques principais: (i) “Concepções e Importância da História da Ciência”; (ii) “Aplicações Didáticas da História da Ciência”; e (iii) “Impacto na Formação Acadêmica e Profissional”.

Na categoria “Concepções e Importância da História da Ciência”, algumas respostas refletem uma valorização crescente da disciplina. O/A estudante **E3** afirmou: *“Hoje em dia acho mais válido o uso da História da Física, até porque não se faz Física/Ciência sem história”* (Q.12), ressaltando sua relevância para compreensão da física. Complementando, o/a estudante **E4** afirmou: *“Houve um reforço da ideia de que a natureza da ciência e a história da física são essenciais na formação do físico”* (Q.12), enfatizando a importância da História da Ciência para uma formação científica mais abrangente. Por sua vez, fazendo referência aos conceitos de internalismo e externalismo, o que aponta para um engajamento com temas mais avançados do curso e indica uma evolução na compreensão crítica sobre os fundamentos da ciência, o/a estudante **E11** escreveu: *“Sim, pois anteriormente parecia algo que não precisava ser aprofundado, mesmo sabendo dos problemas. Tinha a impressão de que seria mais um recurso para fugir da mesmice teórico-matemática das aulas, mas agora vejo que, para entender o internalismo e o externalismo da ciência, a História da Ciência é muito necessária”* (Q.12).

Na categoria “Aplicações Didáticas da História da Ciência”, os estudantes refletiram sobre como aspectos históricos podem ser efetivamente abordados em sala aula. O/A estudante **E7** destacou: *“A didática da história da física é muito importante. A disciplina mostrou como*

a história da física pode tornar a aula mais dinâmica e didática” (Q.13), sugerindo que a História da Ciência pode enriquecer a prática pedagógica. Além disso, o/a estudante **E6** observou: *“Um simples ajuste na aula ou o uso da História da Ciência pode melhorar o conteúdo e evitar ideias erradas”* (Q.12), sugerindo que sua aplicação pode trazer mais clareza e profundidade ao aprendizado dos estudantes. O/A estudante **E12**, por sua vez, apresentou uma análise crítica ao reconhecer os potenciais benefícios e limitações da abordagem histórica: *“Sim, sofreu mudanças. Hoje noto mais benefícios para empregar a História da Ciência em sala de aula. E também percebo desvantagens, como o risco de cair em um ‘relativismo exacerbado’, algo que eu não havia considerado anteriormente”* (Q.13). Por último, vale a pena ressaltar a resposta do/a estudante **E12** que menciona uma transformação em sua percepção acerca do uso didático da História da Ciência: *“Sim, sofreu mudanças. Antes, os benefícios da História da Ciência estavam mais voltados à estratégia válida para o aprendizado. No entanto, notei que existem questões mais profundas que dizem respeito ao próprio modo de fazer ciência”* (Q.12). Essa resposta demonstra uma transição de uma visão instrumental para uma abordagem mais ampla, envolvendo reflexões sobre o processo científico e seus aspectos epistemológicos.

Em relação ao “Impacto na Formação Acadêmica e Profissional”, as repostas revelam que a disciplina parece ter incentivado os estudantes a refletirem sobre suas práticas docentes futuras. O/A estudante **E13** afirmou: *“Sim, acredito que serei um professor melhor, sabendo como contribuir para uma construção mais fiel da natureza da ciência”* (Q.13), enfatizando a importância da História da Ciência para uma docência mais crítica e fundamentada. De forma semelhante, o/a estudante **E17** declarou: *“Sim, pude perceber que posso ser uma docente melhor e não apenas passar o conteúdo”* (Q.13), enquanto o/a estudante **E15** observou: *“Sim, a partir desta disciplina, pude perceber o cuidado que devemos ter no papel de professores ao abordar a Física e suas diversas teorias e leis científicas, para não acabar transmitindo uma visão errada acerca da ciência”* (Q.13). Essas respostas indicam uma ampliação em sua percepção sobre o papel do docente dos estudantes, especialmente em relação ao uso de narrativas (pseudo)históricas.

Essas respostas revelam diferentes aspectos da influência da História da Ciência na formação dos estudantes, seja na ampliação da compreensão crítica sobre a ciência, seja na aplicação no ensino e na reflexão sobre a futura prática profissional. A disciplina parece ter contribuído para uma compreensão mais ampla da ciência e suas implicações, preparando os estudantes para enfrentar desafios tanto na docência quanto na pesquisa científica.

(h) *Avaliação Geral*¹³⁴

A análise das respostas acerca do item “*Avaliação Geral*” da disciplina obteve uma predominância de respostas positivas, com 10 estudantes classificando-a como “*Muito Satisfatória*” e 12 como “*Satisfatória*”. A ausência de avaliações negativas sugere que a disciplina atingiu seus objetivos pedagógicos principais.

Além disso, comentários adicionais registrados na Questão 15 oferecem perspectivas variadas sobre a experiência dos discentes. O/A estudante **E8** destacou: “*Eu gosto dessa abordagem. Para mim, se retirassem física-matemática do currículo e dessem 10 horas para HC, seria muito melhor, já que, para a licenciatura, física-matemática não tem utilidade, e HC é suficientemente denso para ter 120 horas na licenciatura. Para o bacharelado, isso é mais complicado*” (Q. 15). Essa observação evidencia a percepção de relevância da disciplina, sugerindo uma ampliação de sua carga horária (talvez esse formato de disciplina como optativa, somada à abordagem tradicional da História da Ciência), ainda que reconheça os desafios de implementação no contexto do bacharelado.

A relevância do curso para a formação acadêmica foi enfatizada por outros discentes. O/A **E10** afirmou: “*Acredito que o curso de HC foi muito importante para a minha formação como cientista. Nunca esquecerei algumas das reflexões que fiz durante a disciplina, e elas serão importantes no desenvolvimento do meu trabalho*” (Q. 15). De forma similar, o/a estudante **E11** acrescentou: “*Estou bastante satisfeita com a disciplina. Se dependesse de mim, teria HC II na grade. Vocês são professores fantásticos*” (Q. 15).

Em contrapartida, o/a estudante **E9**, apesar de ter avaliado positivamente a disciplina, fez uma ressalva: “*Na minha opinião, a ideia do curso foi muito interessante. Porém, é necessário atualizar o plano de ensino, pois os discentes podem acabar criando certas expectativas ao ler o plano de aula antigo, o que acaba sendo um ponto negativo*” (Q. 15). Esse comentário reforça a necessidade de uma comunicação clara e atualizada sobre os objetivos e conteúdo do curso para alinhar as expectativas dos estudantes.

Em síntese, apesar de alguns momentos específicos de sobrecarga de atividades e os prazos apertados, os quais geraram um volume considerável de críticas e sugestões de modificações, a maioria dos estudantes reconheceu a qualidade do curso como um todo. A

¹³⁴ **Questão 8.** No geral, como você avalia a qualidade da disciplina de História das Ciências 2023-1? Considere a clareza dos conteúdos apresentados, a qualidade das atividades propostas, o engajamento dos professores, a relevância dos materiais didáticos utilizados e a contribuição da disciplina para a sua formação acadêmica.

disciplina demonstrou impacto positivo na formação acadêmica dos discentes, com sugestões pontuais que podem orientar aprimoramentos futuros.

4.3.2 Análise das *Memórias & Reflexões*

Os registros semanais intitulados *Memórias & Reflexões* destacam-se por incentivar a liberdade criativa dos estudantes, permitindo-lhes expressar percepções, reflexões e críticas sobre cada encontro. Esses relatos revelam uma diversidade de experiências e perspectivas, contribuindo para a compreensão da influência da disciplina em sua formação acadêmica, além de evidenciar interações com os conteúdos e as reações às abordagens pedagógicas adotadas.

Como o *Questionário de Avaliação Geral* foi aplicado no último encontro, ele tende a reproduzir percepções sobre a etapa final da disciplina (“viés de resposta”), enquanto as *Memórias & Reflexões* registram impressões do início e do meio do cronograma. Assim, ao articular as reflexões espontâneas das *Memórias & Reflexões* com os temas estruturados do *Questionário de Avaliação Geral*, buscamos identificar convergências e divergências, destacando com mais precisão os pontos fortes, os desafios e as possíveis melhorias no processo de ensino e de aprendizagem. De outro modo, objetiva-se identificar nos relatos das *Memórias & Reflexões* as possíveis razões e justificativas para os posicionamentos específicos dos estudantes no *Questionário de Avaliação Geral*.

Como estratégia de análise de dados, nos concentramos em informações específicas e relevantes (não em dados aleatórios), que correspondem aos sete temas abordados no *Questionário de Avaliação Geral*: (a) Participação Discente; (b) Qualidade dos Textos Seleccionados; (c) Volume e Prazos das Atividades; (d) Condução das Discussões e Reflexões; (e) Estrutura e Sequência Lógica; (f) Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência e (g) Influência na Formação Crítica. Sendo assim, para cada um desses temas, cada relato semanal foi analisado buscando identificar se havia alguma manifestação espontânea que poderia ser caracterizada como uma *menção explícita* em relação ao tema de interesse. Para todos os fins, considera-se uma *menção explícita* quando os estudantes fazem referências diretas ao tema analisado, utilizando palavras-chave de maneira clara e inequívoca¹³⁵.

¹³⁵ Devido à diversidade dos temas analisados, constatou-se no decorrer do processo de análise que trechos inicialmente classificados como *menção implícita* a um determinado tema, muitas vezes, estavam mais alinhados

Ao todo, foram analisadas 111 *Memórias & Reflexões*, elaboradas por 20 estudantes, abrangendo oito encontros semanais (S1, S3, S4, S7-10 e S12)¹³⁶. Para facilitar a referência aos autores dos registros, adotamos nomes fictícios para identificar os estudantes¹³⁷. Por exemplo, a notação **Pedro - S12** ou **Pedro (S12)** indica que o estudante **Pedro** fez uma *menção explícita* sobre o tema investigado na atividade referente à **Semana 12**.

(a) *Participação Discente*

A participação discente foi definida na Questão 1 do *Questionário de Avaliação Geral* com base em critérios como assiduidade, pontualidade, contribuição nas discussões e reflexões, entrega das atividades, leituras e comprometimento ao longo da disciplina. Logo, a análise quantitativa da entrega da atividade *Memórias & Reflexões* constitui um dado relevante.

Em primeiro lugar, desde as semanas iniciais, observou-se uma ausência significativa na entrega da atividade *Memórias & Reflexões*: dez estudantes não entregaram na S3, oito na S4, seis entre S7 e S10 e, novamente, dez na S12. Apenas três estudantes (14%) submeteram todas as oito atividades, enquanto nove (41%) não entregaram sequer metade. No entanto, no *Questionário de Avaliação Geral*, apenas dois estudantes a autoavaliaram sua participação como “*Insatisfatória*”, o que sugere uma discrepância entre a percepção subjetiva dos estudantes e os dados objetivos de participação.

Essa divergência pode estar associada a vieses e limitações inerentes ao questionário fechado, incluindo o “viés de desejabilidade social” (o respondente não quer admitir baixo desempenho), o “viés de memória” (esquecimento das faltas e da não entrega das atividades) e “viés de fadiga” (respostas menos críticas devido ao cansaço), especialmente considerando que

a uma *menção explícita* de outro. Para garantir maior precisão e evitar interpretações ambíguas, priorizamos as *menções explícitas* como critério central na categorização dos dados.

¹³⁶ Nas demais semanas, os estudantes tinham outras atividades a realizar (leituras, relatórios ou seminários). Além disso, após a Semana 12 (S12), optou-se por não solicitar a entrega das *Memórias & Reflexões*, com o objetivo de reduzir a sobrecarga de atividades dos estudantes.

¹³⁷ A alteração na identificação dos estudantes se faz necessária porque o *Questionário de Avaliação Geral* foi respondido de forma anônima, enquanto a atividade *Memórias & Reflexão* era identificada nominalmente. Isso garante a coerência na análise dos dados, respeitando o anonimato dos participantes no questionário e permitindo a comparação entre percepções registradas nas diferentes etapas da disciplina. Contudo, essa comparação só pode ser feita de maneira geral, considerando a turma como um todo, e não individualmente, já que o anonimato impede a identificação das respostas de cada estudante no questionário.

o instrumento foi aplicado no final de semestre, período de alta sobrecarga acadêmica. Além disso, em sua autoavaliação, os estudantes podem ter atribuído pesos diferentes aos diversos aspectos da participação discente. É possível que alguns tenham dado maior ênfase ao engajamento nas discussões em sala, à organização de seminários ou às leituras prévias, em detrimento da entrega das *Memórias & Reflexões*, ainda que esta fosse uma atividade obrigatória e com prazo definido para ser entregue.

A participação irregular dos estudantes ao longo do semestre sugere dificuldades como sobrecarga acadêmica, desengajamento e desafios relacionados à organização dos prazos. Não parece ser mera coincidência que o número de *menções explícitas* à queda brusca na assiduidade tenha surgido exatamente entre as semanas S8 e S12 – período no qual havia provas agendadas de outras disciplinas. Essa relação pode ser ilustrada pelos seguintes trechos:

"Na aula em questão, eu senti a turma cansada, ninguém falou muito e tiveram breves comentários, como também foi a aula com menos alunos até agora (...). Como estão chegando as provas, os alunos ficam mais ansiosos e sinto que a produtividade durante a aula vai diminuindo, porque os discentes estão esgotados mentalmente e fisicamente" (Amanda - S10).

"A sala em si não estava certamente vazia, mas tinha poucos alunos, e acho que só eu interagi com o professor nessa aula, assim como foi a mesma coisa na última aula da semana 8" (Marta - S9). "Nesse dia, eu não pude ficar até o fim da aula, mas também havia pouquíssimos alunos presentes" (Marta - S10).

"A aula contemplou uma turma bem reduzida em número quando comparado a normalidade (baseado nas outras aulas que tivemos)" (Suzana - S10).

"Devido à grande demanda de matérias e conteúdos durante o semestre, seria interessante dar um tempo a mais para realização de atividades que envolvem a leitura, compreensão e reflexão de textos" (Lara - S12).

A análise mostrou que, enquanto alguns estudantes mantiveram ou até aumentaram sua participação (estudantes Amanda, Pedro, Maria, Gustavo e Jorge), outros apresentaram um declínio progressivo, seja pela ausência de entregas das atividades ou por uma assiduidade cada vez mais reduzida (estudantes Lídia, Matias, Luiz e Tadeu). Entre as semanas S8 e S10, também foi identificada uma tendência de reflexões padronizadas e mecânicas, como no caso dos estudantes Tiago, Matheus e Estevão. Um caso específico foi o do estudante Estevão, cujos relatos tornaram-se mais vagos ou inexistentes, até que, a partir da semana S8, limitando-se a respostas negativas e monossilábicas, ele passou a afirmar não se recordar dos conteúdos das aulas (*"Eu nem lembro mais"*), indicando uma mudança drástica e um nítido distanciamento do processo de aprendizagem. De fato, já nas reflexões do estudante **Estevão (S1)**, é possível notar uma baixa predisposição ativa em relação à disciplina, possivelmente decorrente de suas dúvidas sobre a relevância dos conteúdos de História da Física para sua futura atuação docente. Ele

questiona se esse conhecimento histórico, por vezes profundo e complexo, seria realmente proveitoso, considerando o tempo limitado destinado à disciplina no ensino médio (três aulas semanais):

"Outro aspecto sobre esse aprofundamento de conteúdo diz respeito do quanto tempo temos em aula no ensino médio para trabalhar isso? Para aprofundar todos os temas? [...] mas será que as perdas de não saber o contexto de maneira ampla da história compensa a especialização de um docente sobre um conteúdo que deve ser visto no máximo três semanas no ensino médio?" (Estevão - S1).

Essas considerações revelam que o estudante ainda não reconhece as habilidades formativas que um ensino mais qualificado de História da Física pode promover — como a compreensão crítica da ciência, o pensamento histórico-epistemológico e a articulação entre conceitos e contextos científicos.

Em outros momentos, foi possível identificar trechos com *menções explícitas* de que a dinâmica das aulas e a didática dos professores-pesquisadores poderiam estar impactando negativamente a participação ativa dos estudantes, destacando que uma aula mais enxuta, direta e focada nos pontos essenciais tornaria o conteúdo mais acessível e eficiente para o aprendizado, conforme demonstram os seguintes relatos:

"[...] e o professor Ronivan ainda demonstra certa resistência em dar intervalos mais longos, mas vamos refletir sobre isso, quem consegue ficar 4 horas ininterruptas prestando atenção em algo? Ainda mais em uma aula de uma disciplina que precisa de muita atenção, que você precisa estar presente nos debates, nas conversas, para que assim entenda de fato o conteúdo que está sendo ministrado, os comentários dos meus colegas, as opiniões de cada um deles também fazem parte do meu crescimento como ser humano e como profissional" (Amanda - S4).

"A meu ver a aula foi apresentada de forma sucinta, não havendo tantas discussões mediante aos discentes, devido a ser uma análise histórica. [...] A aula acabou mais cedo do que o previsto nas aulas que as antecederam, no período das 21h, isso acabou por ser um fator positivo para essa aula expositiva, visto que fico muito cansada quando ocorrem apresentações muito longas fazendo com que perca o foco muito rapidamente" (Suzana - S8).

"A aula foi boa para a execução das reflexões em relação ao artigo de Hertz sobre o efeito fotoelétrico, os levantamentos mediante a natureza da ciência e os questionamentos como 'A ciência foi descoberta ou construída?'" [...] Mas acredito que em questão ao tempo, acabou se estendendo muito em alguns aspectos (Suzana - S12).

"A tentativa de expor todos os argumentos levantado pelo autor, deixou essa parte da atividade cansativa ao longo do tempo, onde teria sido melhor discutir somente os argumentos mais importantes levantados pelo autor" (Tiago - S1).

"Em geral a aula contemplou de forma satisfatória todos os conteúdos previstos, porém acredito que a duração da mesma contribuiu de maneira não positiva e ocasionou numa certa dificuldade de foco pelo menos da minha parte para com a aula" (Helena - S12).

Embora alguns desses *feedbacks* tenham sido atendidos – como a necessidade de um maior intervalo de descanso e prazos mais flexíveis –, é razoável inferir que a organização da disciplina em um único dia, com quatro aulas seguidas, no período noturno, representa um desafio a ser reconsiderado. Assim, devido à recorrência de menções à fadiga e à queda na participação durante aulas longas e concentradas em um único dia, a distribuição da carga-horária da disciplina em dois dias poderia mitigar esse efeito.

Já em relação ao problema da sobrecarga acadêmica no curso talvez a solução não seja tão simples. Embora os professores-pesquisadores tenham ajustado o formato da aula conforme o ritmo e os interesses dos estudantes, reduzindo as demandas e o tempo de aula entre as semanas S7 e S12 – limitando-se, nesse período, à solicitação exclusiva das *Memórias & Reflexões* –, não foi observado maior envolvimento ou maior participação ativa. Pelo contrário, de forma geral, observou-se que, diante de períodos avaliativos mais exigentes, os estudantes tendem a atribuir uma importância secundária à disciplina de História da Ciência, com objeções à realização de atividades e redução significativa da frequência às aulas (50%). Esse fenômeno se repetiu no final do semestre, entre as semanas S14 e S17, indicando que a participação discente sofre oscilações previsíveis, ligadas ao calendário acadêmico mais amplo¹³⁸.

Por outro lado, um dos principais pontos fortes das escolhas didáticas, no que diz respeito à participação discente, foi a valorização do ambiente de interação entre os colegas promovido em sala de aula, com momentos de discussão, argumentação e reflexão, como evidenciado nos seguintes trechos:

“O contato introdutório com a disciplina de História das Ciências ressalta uma convicção prévia: a empolgação se justifica. Temas centrais sobre a natureza da Ciência florescem naturalmente num ambiente rico de reflexões” (Pedro - S1).

“O mais interessante durante estas aulas está sendo o fato de estarmos questionando muitos temas e conceitos antes não explorados, como o Método Científico, por exemplo. [...] Questionar tal fato não significa tentar mudá-lo ou invalidá-lo, mas sim permitir que seja estudado e analisado desde sua concepção até o modo como o conhecemos atualmente” (Maria - S7).

“Em minha opinião o formato da aula proposto pelos docentes foi interessante e levantou discussões extremamente relevantes, e essa discussão impactou na forma em que eu penso, e me fez refletir sobre qual é o posicionamento científico” (Gabriel - S12).

“Não vejo a necessidade de nenhuma grande mudança na aula, já que a mesma busca desenvolver o pensamento crítico, incentivando os alunos a fazer perguntas, desafiar ideias protegidas e explorar diferentes perspectivas. A aula proporcionou um espaço para que a gente pudesse expressar nossas opiniões e ideias, além de permitir debates e discussões a partir de diferentes pontos de vista” (Jorge - S12).

¹³⁸ Mais à frente, retornaremos a essa discussão na subseção “Volume e Prazo de Entrega das Atividades”.

"Achei adequadas as atividades da aula ministrada da Semana 12. Não acho adequado aulas que possuam apenas discussões, a exposição teórica é fundamental no enriquecimento do conteúdo. Na aula da Semana 12, ocorreu a exposição do conteúdo a ser discutido, acompanhada da discussão, o que tornou muito eficiente o processo de entendimento do conteúdo" (Matheus - S12).

Para finalizar a análise do aspecto “Participação Discente”, vale a pena ressaltar que muitas das *Memórias & Reflexões* evidenciam uma abordagem predominantemente focada no conteúdo nas discussões, os quais foram observados por meio de uma postura reflexiva, análise crítica dos temas abordados, envolvimento intelectual ativo e o desenvolvimento das habilidades propostas pela disciplina, mas sem o reconhecimento explícito de sua própria atuação nas interações em sala de aula. Diferenciar essas formas de engajamento é fundamental para compreender as nuances da participação discente. Há, portanto, a necessidade de distinção entre participação crítica/reflexiva (introspectiva) e participação interativa/prática (comunicativa). Nesses casos específicos, a presença do estudante nas dinâmicas da disciplina é relatada de forma indireta, sem menções diretas à assiduidade, pontualidade, contribuições nas discussões, leituras ou entrega de atividades.

Isso sugere que, embora o engajamento cognitivo possa ser evidente e observável em algumas *Memórias & Reflexões*, a participação nas atividades e debates nem sempre é explicitada nas reflexões escritas. Dessa forma, a participação se manifesta de maneira implícita, refletindo o aprendizado construído a partir das aulas, mesmo sem uma autoavaliação direta sobre seu papel nas atividades acadêmicas. Essas *menções implícitas*, como veremos, encaixam-se melhor como *menções explícitas* em outros temas.

(b) *Qualidade dos Textos*

Inicialmente, é importante recordar que no *Questionário de Avaliação Geral*, a qualidade dos textos selecionados foi avaliada com base na adequação da linguagem, profundidade do conteúdo, acessibilidade, compatibilidade com o tempo disponível para leitura e relevância para a formação crítica (Questão 2). Na ocasião, as respostas dos estudantes indicaram uma avaliação “*Muito Satisfatória*” (41%) e “*Satisfatória*” (51%). Nesse contexto, a análise das manifestações espontâneas nas *Memórias & Reflexões* pode apontar as principais razões e justificativas para essa percepção positiva da qualidade dos textos.

As percepções dos estudantes sobre os textos selecionados foram registradas nas *Memórias & Reflexões* até a semana S12, pois, devido a reclamações em relação à sobrecarga acadêmica e prazos curtos, essa atividade deixou de ser exigida após esse período. As menções à qualidade dos textos concentram-se nas semanas S1, S4, S10 e S12, quando foram solicitadas leituras obrigatórias prévias ou em sala de aula. Como resultado, observou-se um número significativamente menor de *menções explícitas* à qualidade dos textos (13) em comparação com outros temas, como, por exemplo, a participação discente (26).

De fato, nas *Memórias & Reflexões*, em geral, os estudantes comentam sobre a temática da aula, as estratégias didáticas dos professores-pesquisadores, as discussões em sala e os conceitos científicos abordados, além da relação entre História, Filosofia e Sociologia das Ciências. Eles raramente fazem referência à qualidade dos textos selecionados. Ou seja, embora os textos sejam reconhecidos como instrumentos úteis no processo de ensino, eles não são o foco principal de suas reflexões, mesmo nas semanas com leitura obrigatória.

Quando os estudantes analisam a qualidade dos textos, as avaliações variam. Alguns destacam o impacto desses materiais na formação crítica, enquanto a maioria faz comentários superficiais ou sem critérios claros. A estudante **Amanda (S4)**, por exemplo, afirmou: *"Na aula em questão, a leitura do texto foi bem divertida. Eu que amo ler, gostei bastante do envolvimento dos outros alunos na leitura e gostei de ler para a minha turma"*. Esse tipo de comentário sugere que, mesmo quando os textos são avaliados positivamente, a apreciação espontânea tende a ser mais intuitiva e baseada no envolvimento pessoal, sem uma análise estruturada de aspectos como clareza, acessibilidade, estrutura formal ou relevância.

Nos poucos momentos em que os estudantes fizeram uma avaliação mais aprofundada, destacam-se três ideias-chave principais. Primeiro, eles valorizam, sobretudo, a utilidade prática dos textos selecionados. Eles reconhecem o papel dos textos e sua relevância para a formação acadêmica, a construção de um conhecimento científico mais aprofundado e o desenvolvimento de uma leitura crítica, especialmente para a análise histórica e metodológica da ciência, mais do que por uma análise de aspectos de linguagem e estrutura. Além disso, veem esses materiais como guias práticos para identificar equívocos na escrita sobre história da ciência, fornecendo diretrizes que enriquecem tanto a análise conceitual quanto a prática pedagógica no ensino de física. Algumas reflexões exemplificam essa percepção:

"O artigo de Martins (2001) ['Como não Escrever sobre a História da Física'] aborda erros comuns ao escrever sobre a história da ciência. O autor destaca a importância de evitar anacronismos, considerar as influências culturais na produção científica, não exagerar a importância dos indivíduos, contextualizar a história da ciência e

evitar perspectivas teleológicas. Este texto serve como um guia para aqueles que desejam escrever com precisão e rigor sobre a história da ciência" (Pedro - S4).

"Acredito que o artigo 'Como não Escrever sobre a História da Física', de Martins (2001), é um bom texto para começar a desenvolver a capacidade nossas como alunos sobre a leitura de forma mais analítica e crítica sobre os textos que abordam a história da ciência" (Tiago - S4).

"Através da leitura do texto e das discussões que ocorrem em sala de aula, foi possível compreender como o uso da História da Ciência pode influenciar positivamente tanto no ensino como na aprendizagem da Física" (Matheus - S1).

"Achei a análise realizada do texto [Martins (2001)] super interessante, pois conseguimos analisar em cada um dos parágrafos fatores importantes na escrita de textos da história das ciências e quais fatores não podem ser ignorados na hora de selecionar um texto" (Júlia - S4).

Em segundo lugar, a análise das *menções explícitas* revela que as avaliações mais detalhadas surgem de maneira ocasional, especialmente quando provocadas por questões específicas ou atividades ligadas aos textos, como discussões em sala de aula ou questionários – isso ocorreu nas semanas S4 e S12, nas quais foram identificadas 10 das 13 *menções explícitas*. Esse tipo de avaliação não envolve uma análise sistemática da qualidade dos textos (linguagem ou estrutura), mas uma reflexão mais ampla sobre questões conceituais ou problemas que emergiram ao longo das atividades.

Essa dinâmica é ilustrada nos exemplos a seguir, em que os estudantes refletem criticamente sobre os textos com base nas questões levantadas durante as atividades propostas pelos professores-pesquisadores. O estudante **Pedro (S7)**, por exemplo, critica o modelo empírico-indutivista da ciência após discussões com professores-pesquisadores, enquanto **Maria (S4)** aprofunda sua compreensão do contexto histórico da "descoberta" do efeito fotoelétrico ao responder questões direcionadas. Já a estudante **Lídia (S4)** faz uma análise crítica do texto, destacando aspectos como o "favoritismo" de um cientista e a falta de referências, motivada por questões discutidas em sala de aula. Da mesma forma, o estudante **Luiz (S4)** reflete sobre a responsabilidade do professor na escolha dos materiais didáticos, e o estudante **Gustavo (S12)** questiona a maneira como o texto aborda o "descobrimento" do efeito fotoelétrico, após o contato com textos históricos sobre o tema.

"Considero válido mencionar que frequentemente percebo (e agora ficou mais claro) a distorção da concepção empírico-indutivista e ateórica da ciência, que enfatiza o papel neutro da observação e experimentação, desconsiderando o papel fundamental das hipóteses e teorias na orientação da investigação científica. [...] Outra classe de aspectos que meu grupo pecou em não apresentar (faço esse julgamento após apresentação e conversas com os professores) foi a perspectiva rígida e algorítmica contida no livro didático analisado, onde notou-se a negligência à criatividade na investigação científica" (Pedro - S7).

"Após realizar o questionário sobre o texto 'Heinrich Rudolph Hertz e a 'descoberta' do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula' e também o texto 'Natureza da Ciência por meio de narrativas históricas: Os debates sobre a natureza da luz na primeira metade do século XIX', ficou mais claro todo o contexto que envolve a então considerada 'descoberta' do efeito fotoelétrico" (Maria - S4).

"Foi possível reparar no texto [Lawson (2000) - A Generalidade do Pensamento Hipotético-Dedutivo] que apareceu uma espécie de 'favoritismo' para um dos cientistas, quase sendo tratado como 'aquele que fez tudo ser diferente', como se ninguém antes dele tivesse pensado nisso. [...] Ainda sobre o texto do sangue, não é possível encontrar muitas referências, ou seja, de onde ele retirou essas informações. [...] Outra coisa interessante discutida em sala de aula, foi o fato de que como nós alunos como futuros professores, devemos ter muito cuidado com os textos que escolhemos, sempre analisando-o de forma crítica" (Lídia - S4)

"Além disso acredito que foi importante a discussão do olhar do professor para o uso desses materiais, pois se reclamamos da falta de responsabilidade na publicação de trabalhos científicos, é necessário também a responsabilidade do professor como profissional e conhecedor de sua área analisar também seus materiais que usará como apoio para sua aula, claro que levando em conta sempre o contexto em que ele quer apresentar o artigo" (Luiz - S4).

"Na aula onde tivemos o contato com o texto original do Hertz, sobre o suposto 'descobrimento' do efeito fotoelétrico, podemos verificar que ele não realizou uma 'descoberta' e muito menos foi acidental, onde no texto deixa bem claro a série de testes feitos para estudar e tentar entender aquela 'anomalia' que naquele momento ele havia observado e não sabia explicar o que de fato ele estava observando" (Gustavo - S12).

Esses exemplos demonstram que a análise crítica pelos estudantes ocorre, notadamente, quando são estimuladas por questões específicas. De outro modo, observa-se que os estudantes se envolvem mais intensamente com os textos quando são exigidos a responder questões problematizadoras, levando-os a reflexões mais cuidadosas. Ressalta-se, portanto, que o papel didático dos professores-pesquisadores é crucial, e que vai além de selecionar textos de “boa qualidade”; ele envolve também mediar o processo de análise e instigar a reflexão crítica, provocando questionamentos e ampliando o entendimento de temas complexos.

Por último, em terceiro lugar, a análise das *menções explícitas* evidencia alguns momentos de equilíbrio entre o reconhecimento de qualidades dos textos e a identificação de problemas relacionados à estrutura, clareza e objetividade. Os trechos a seguir ilustram essas diferentes perspectivas:

"A leitura deste artigo [Martins (2001)] não é fácil, e isso não se deve à sua gramática, mas sim ao vasto conhecimento do autor em elencar de maneira organizada seus argumentos, de modo a demonstrar sua propriedade ao escrever sobre o assunto. [...] Posso dizer que gostei muito deste artigo, pois a ideia e objetivos são claros e precisos, sem delongas. [...] Um ponto em que não concordo com o autor, entretanto, é quando ele cita sobre estudantes bons e estudantes fracos. Neste ponto, creio que o autor usou de palavras extremamente equivocadas para expor suas ideias" (Maria - S4).

"Em aspectos relacionados ao texto [Mangili (2012)], acabei por tomar mais atenção em aspectos aos quais geralmente não tomamos atenção, como a apresentação do objetivo central do texto no resumo e na introdução, que no caso não acabou respondendo às questões iniciais apresentadas, que seriam as problemáticas acerca da história e filosofia da ciência. Sem contar que em muitos casos foi dissertada uma visão anacrônica e com erros históricos" (Suzana - S12).

"Sobre o formato da aula acredito que o material didático poderia ser mais condensado" (Gabriel - S12).

Observa-se que esses estudantes demonstram um olhar crítico ao avaliar tanto a estrutura argumentativa e a clareza dos textos quanto suas limitações conceituais e históricas. Enquanto a estudante **Maria (S4)** destaca a organização e objetividade dos textos, a estudante **Suzana (12)** apontam falhas estruturais, como resumos e introduções desalinhados com as questões centrais, uso inadequado de terminologia ou até anacronismos na abordagem histórica¹³⁹. Além disso, o estudante **Gabriel (S12)** faz sugestões concretas para aprimorar a concisão dos textos e a organização das atividades acadêmicas. Esses aspectos revelam um engajamento reflexivo dos estudantes, que não apenas absorvem o conteúdo, mas também questionam a forma como ele é apresentado, demonstrando um nível mais aprofundado de análise crítica.

(c) *Volume e Prazos de Entrega das Atividades*

Já mencionamos que a constatação da queda brusca de assiduidade dos estudantes é um indicativo de dificuldades relacionadas à sobrecarga acadêmica, ao desengajamento e à organização dos prazos. Esse fenômeno tornou-se mais evidente após a semana S8, período que coincidiu com as provas de outras disciplinas. Contudo, observamos também que, desde o início do semestre, o número de entregas das *Memórias & Reflexões* já se mostrava reduzido — nas semanas S3 e S4, por exemplo, apenas metade dos estudantes realizou a atividade.

A análise das *Memórias & Reflexões* revela que, até a semana S10, a maioria dos estudantes não menciona explicitamente preocupações com o volume ou os prazos das

¹³⁹ É importante deixar claro que os diversos problemas identificados pela estudante Suzana – S12 eram, na verdade, o objetivo principal dos professores/pesquisadores ao selecionarem o trabalho de Mangili (2012) para leitura e análise crítica na semana S12. A comparação entre o artigo original de Hertz (1888) e o estudo de Mangili (2012) revela um número significativo de contradições e problemas metodológicos (cf. Seção 2.2.1).

atividades extraclasse, seja porque conseguiram administrar bem essas demandas, seja porque não sentiram necessidade de registrar dificuldades. Nesse período, apenas uma única menção explícita foi identificada. A estudante **Maria (S4)** expressa sua preocupação com o tempo insuficiente para preparação do Seminário 1 – “*Abordagem Histórica do Efeito Fotoelétrico nos Livros Didáticos*” – e sugere que atividades dessa complexidade sejam comunicadas com maior antecedência:

"O único ponto que tenho a levantar, é que o seminário de análise de livros didáticos teve um período muito curto para ser realizado, pois, apesar de já estar inserido no cronograma desde o início das aulas, este só foi ser explicado durante o final da última aula que tivemos. Como sugestão, caso isto me seja permitido, gostaria de pedir que trabalhos deste tipo fossem explicados com um pouco mais de antecedência (caso isto também seja possível), pois requer uma atenção maior do que outros e também considero de um nível de dificuldade mais intenso" (Maria - S4).

Assim, até a semana S10, não há indícios generalizados de preocupação com a organização do cronograma ou com a sobrecarga de atividades. A maioria dos estudantes direciona suas reflexões para o conteúdo das aulas, enfatizando discussões conceituais sobre aspectos epistemológicos, históricos e filosóficos da disciplina, sem mencionar dificuldades relacionadas ao planejamento das tarefas.

Entretanto, esse cenário se altera nitidamente a partir da semana S12, quando foram identificadas quatro reclamações explícitas sobre o volume de atividades e os prazos¹⁴⁰. Essas reflexões sugerem um impacto indireto, especialmente relacionado ao cansaço mental e físico durante o final de semestre, à densidade e à duração das aulas:

"Como estão chegando as provas os alunos ficam mais ansiosos e sinto que a produtividade durante a aula vai diminuindo, porque os discentes estão esgotados mentalmente e fisicamente" (Amanda - S12).

"A aula acabou mais cedo do que o previsto nas aulas que as antecederam, no período das 21h, isso acabou por ser um fator positivo para essa aula expositiva, visto que fico muito cansada quando ocorrem apresentações muito longas fazendo com que perca o foco muito rapidamente. [...] Por ser uma aula mais histórica gera certo cansaço, como disse anteriormente, acredito que pelo tempo de 1h30 mais ou menos, seja bem aproveitado" (Suzana - S8). "Mas acredito que em questão ao tempo, acabou se estendendo muito em alguns aspectos" (Suzana - S12).

"Devido à grande demanda de matérias e conteúdos durante o semestre, seria interessante dar um tempo a mais para realização de atividades que envolvem a leitura, compreensão e reflexão de textos" (Lara - S12).

"Em geral a aula contemplou de forma satisfatória todos os conteúdos previstos, porém acredito que a duração da mesma contribuiu de maneira não positiva e

¹⁴⁰ Somente 10 estudantes entregaram as *Memórias & Reflexões* referente à aula da Semana 12.

ocasionou numa certa dificuldade de foco pelo menos da minha parte para com a aula" (Gustavo - S12).

Essas manifestações sugerem que, embora a preocupação explícita com prazos e volume de atividades tenha sido mínima até a semana S10, o acúmulo de demandas nas últimas semanas do semestre passou a impactar significativamente o engajamento, a assiduidade e a qualidade das atividades. Assim, a sobrecarga acadêmica, portanto, parece ter sido um fator pontual no final do semestre, intensificada pelo acúmulo de provas e outras exigências.

Além disso, ainda que poucos estudantes tenham abordado diretamente a questão do tempo para realização das atividades extraclasse, houve registros sobre a duração das aulas e seu impacto na produtividade e no foco, o que pode refletir uma preocupação indireta com a gestão do tempo e, conseqüentemente, com a efetiva participação discente na disciplina, conforme discutido anteriormente.

Esses dados corroboram as percepções registradas no *Questionário de Avaliação Geral*, em que a maioria dos estudantes classificou o volume e os prazos das atividades como “*Insatisfatórios*” (10) ou “*Muito Insatisfatórios*” (3).

(d) *Condução das Discussões e Reflexões*

A análise das *Memórias & Reflexões* indica que a maioria dos estudantes reflete não apenas sobre o conteúdo das aulas, mas também sobre as estratégias didáticas adotadas pelos professores-pesquisadores. Como resultado expressivo, no total, foram identificadas 50 *menções explícitas* e 20 *menções implícitas* à condução das discussões em sala de aula pelos professores-pesquisadores. Todos os estudantes fizeram pelo menos duas menções a esse aspecto ao longo das semanas, enquanto alguns o abordaram de forma recorrente (Pedro e Helena). Essas manifestações espontâneas enfatizam elementos diversos que possibilitam uma avaliação qualitativa da dinâmica das discussões em sala de aula.

Em primeiro lugar, é essencial enfatizar o zelo pela preservação de um “*ambiente democrático e plural*”, pautado na valorização da troca de perspectivas, na liberdade de expressão e na construção coletiva do conhecimento. Nesse contexto, os estudantes se sentem à vontade para expor suas ideias e questionar conceitos, nos quais não apenas recebem informações, mas também constroem suas compreensões de maneira colaborativa. Em particular, as reflexões dos estudantes **Gustavo (S1)** e **Helena (S7)**, em diferentes momentos

da disciplina, evidenciam que o incentivo a um espaço seguro e respeitoso para o debate de ideias fortalece a participação discente e amplia a complexidade das discussões.:

"O tema que eu mais considerei pertinente foi o debate que ocorreu sobre 'O que é a ciência?', pois houve uma conversa concisa e justa, onde várias pessoas tiveram espaço para apresentar opiniões, mesmo que divergentes" (Gustavo - S1).

"Por fim, enfatizo a importância de se manter aberto ao diálogo e ao debate, especialmente quando se trata de questões científicas. A troca de ideias e perspectivas pode nos ajudar a expandir nossos horizontes na hora de ensinar ciência e até mesmo aprimorar nosso entendimento sobre o mundo que nos cerca" (Helena - S7).

"A aula proporcionou um espaço para que a gente pudesse expressar nossas opiniões e ideias, além de permitir debates e discussões a partir de diferentes pontos de vista" (Gustavo - S12).

Além disso, a adoção de uma abordagem contextual explícita, privilegiando momentos de discussão, argumentação e reflexão em sala de aula – seja após as aulas expositivas ou a leitura de textos históricos (primários e secundários) – foi mencionada como um fator importante no interesse e na participação ativa dos estudantes. O trecho a seguir exemplifica essa percepção: *"Mas em sala de aula o desenvolvimento do conteúdo e as discussões abertas com a sala se tornam interessantes e mais dinâmicas [...]" (Maria - S12).* A análise das *"Memórias & Reflexões"* mostra que o engajamento dos estudantes (em sala de aula) tende a ser maior quando suas diferentes opiniões são valorizadas e há espaço para o diálogo democrático e colaborativo. Ressalte-se, por exemplo, a queixa recorrente ao predomínio das aulas expositivas nas reflexões da estudante **Maria (S8-S10)**, que expressam seu desejo por mais momentos de discussão em sala de aula:

"De forma geral, creio que não houve grandes participações em aula [...], porém, considero que as discussões que realizamos na maior parte das aulas também é extremamente necessária, pois além de estimular nosso senso crítico, também acaba por se tornar uma maneira de 'fixar' certos conceitos e ideias" (Maria - S8).

"De forma geral, creio que nesta aula foi mais necessário prestar atenção a certos detalhes históricos que serão importantes durante as próximas aulas, porém, considero que as discussões que realizamos na maior parte das aulas também é extremamente necessária, pois além de estimular nosso senso crítico, também acaba por se tornar uma maneira de 'fixar' certos conceitos e ideias" (Maria - S9).

"Contudo, durante a aula desta semana seguiu-se um roteiro semelhante ao das semanas anteriores, dando continuidade às aulas expositivas" (Maria - S10).

A condução das discussões e reflexões, portanto, não se limitou à transmissão de conhecimento, mas se configurou como um processo interativo, que respeitou e estimulou o

interesse e as ideias dos estudantes, favorecendo a construção de significados e um aprendizado mais dinâmico e participativo.

Em segundo lugar, o “*estímulo ao pensamento crítico*” se destaca como um dos mais reconhecidos pelos estudantes. Eles destacam a provocação de debates sem respostas prontas, o uso de questionamentos instigantes e desafios às suas concepções prévias, especialmente sobre aspectos da NdC e o papel da História da Ciência na formação e futura atuação docente. Eis alguns exemplos dessas manifestações:

"Um questionamento presente na sala de aula e que não foi satisfatoriamente respondido (justamente para fomentar a busca por respostas) foi sobre a natureza científica ou não da Filosofia. [...] Esta curiosidade gritante (implantada em muito pela atuação do Prof. Me. Ronivan) faz parte integrante da 'fagulha inicial' a qual me refiro, um start extasiante" (Pedro - S1).

"Na aula realizada no dia 28 de março de 2023, foram levantadas algumas questões mediante à algumas das respostas contidas no primeiro item da aula da semana anterior... Eu particularmente concordo com o Prof. Caluzi na perspectiva de que, quando pensamos na elaboração de um modelo científico seguimos algumas etapas. (...) Com essas discussões, um dos objetivos centrais da aula era trazer a ideia de que as argumentativas e pensamentos utilizados e apresentados na resolução do questionário, nos traga a reflexão de como atuaremos como futuros professores" (Suzana - S3).

"O que mais me causou reflexões nessa aula foi a respeito do método científico. Os professores disseram que não existe um método fundamental e universal que seja único para todas as ciências. Isso me causa um certo desconforto..." (Ronaldo - S7).

"Logo após isso, os professores apresentaram algumas respostas (de modo a não mostrar o responsável) referentes ao questionário de Natureza das Ciências... A partir da análise destas respostas registradas pela turma, foi iniciada uma discussão sobre o processo de investigação científica. (...) O mais interessante durante estas aulas está sendo o fato de estarmos questionando muitos temas e conceitos antes não explorados, como o Método Científico, por exemplo. Com base nisso, nota-se a importância em saber e analisar o que nós, no papel de futuros professores, iremos propor em sala de aula ao abordar a Natureza das Ciências e a metodologia científica" (Maria - S7).

"Na aula achei também muito importante uma discussão que remeteu um assunto que anteriormente já havíamos discutido um pouco sobre, que foi, se no processo de criação ou produção científica a imaginação estaria presente. O professor fez a pergunta 'Nas análises de dados envolve a criatividade do autor?', eu acho interessante que a gente sempre tende a achar que não, ainda mais quando estamos trabalhando dentro de uma ciência exata em que acreditamos estar tudo desenvolvido e temos sim muita coisa desenvolvida. No entanto na discussão o professor Caluzi se referiu a 'retórica' e como um autor precisava desenvolvê-la para convencer um leitor e especialista de que a ideia discutida era realmente válida" (Estevão - S7).

Outro elemento amplamente reconhecido pelos estudantes foi a “*influência das discussões na construção do conhecimento*”. Ao longo da disciplina, os debates conceituais sobre aspectos epistemológicos, históricos e filosóficos foram valorizados como fundamentais para estimular questionamentos, investigações e aprofundamentos. Além de favorecer a

incorporação/assimilação ausubeliana dos conceitos científicos e metacientíficos conteúdos, promovendo a aprendizagem significativa, essas discussões podem ter tido um efeito direto sobre a autonomia intelectual. Eis as três citações mais representativas dessa ideia-chave:

"Quando os professores citaram aspectos sobre palavras que seriam problemáticas para serem utilizadas em artigos, acredito que houve grande ajuda na compreensão de como isso acaba por implicar na natureza da ciência. [...] os professores apresentaram o texto original do Hertz, de tal modo que nos fez analisar que este em seu desenvolvimento sobre o suposto 'efeito fotoelétrico', não realizou uma descoberta e muito menos foi accidental. [...] A aula foi boa para a execução das reflexões em relação ao artigo de Hertz sobre o efeito fotoelétrico, os levantamentos mediante a natureza da ciência e os questionamentos como 'A ciência foi descoberta ou construída?'" (Suzana - S12).

"A partir destas questões iniciais propostas pelos professores, foi possível compreender melhor a dinâmica planejada para esta aula, fazendo com que as expectativas de nós como alunos fossem de encontro ou se contrastavam com as expectativas dos professores e dos próprios objetivos por trás do ensino de História da Ciência". (Maria - S1).

"Acredito que a aula desta semana se desenvolveu de modo adequado e pertinente, não sendo necessárias grandes modificações. O modo como se deu a dinâmica da aula foi eficiente e contribuiu para um maior entendimento sobre o tema a ser abordado e também para nossa formação crítica em História das Ciências" (Maria - S12).

"A discussão me possibilitou pensar o que constitui de fato a ciência e que é possível que para outras pessoas o modo que eu classifico como ciência seja diferente ou mais incrementado. [...] A história da ciência é uma ferramenta importante não só para o ensino, mas também para o cientista, para construção do entendimento e aprender como identificar aspectos da história nos contado como no uso de anedotas que muito servem para nos prender a atenção mas que podem trazer questões errôneas que precisam ser evitadas" (Estevão - S1).

"A discussão gerou uma construção positiva de ideias, na qual chegou-se ao objetivo central de como nós futuros professores devemos estar atentos para que o material didático usado seja analisado, em específico sobre história da ciência, pois os mesmos servem como base para as aulas ministradas e como visto no texto podem conter equívocos grosseiros que podem conduzir a propagação de fatos inverídicos". (Estevão - S4).

"A aula da semana 12 contribuiu para ampliação de compreensões relacionadas à história do efeito fotoelétrico. A discussão sobre o texto que a qual foi proposta a leitura, ajudou a refletir sobre as palavras mais adequadas que devem ser utilizadas quando falamos a respeito do efeito fotoelétrico. [...] Na aula da Semana 12, ocorreu a exposição do conteúdo a ser discutido, acompanhada da discussão, o que tornou muito eficiente o processo de entendimento do conteúdo" (Jorge - S12).

A “complementaridade entre os professores-pesquisadores”, abrangendo seus diferentes conhecimentos históricos, estilos didáticos e perspectivas, mostrou-se ser um elemento enriquecedor nos momentos de discussão, argumentação e reflexão. Os estudantes mencionaram que os dois professores-pesquisadores, com suas diferentes perspectivas e experiências trabalham juntos, complementando suas abordagens, proporcionando uma visão

mais ampla e diversificada da matéria de ensino. Essa interação entre docentes não apenas aumenta a profundidade das discussões, mas também promove uma aprendizagem mais rica, pois os estudantes têm acesso a diferentes pontos de vista e métodos de ensino. Além disso, a complementaridade entre os docentes pode incentivar uma abordagem mais colaborativa e dinâmica no ambiente de ensino, o que beneficia tanto os estudantes quanto os professores.

"As falas do Professor Caluzi foram muito boas e deram um diferencial para a aula, sinto que deixaram o conteúdo até mais leve e explicativo, em minha opinião o professor poderia falar mais. Os dois professores da disciplina complementam um ao outro, por esse motivo acho que o tempo de fala do Professor Caluzi poderia ser maior, porque seus comentários encaixam muito bem nos do Ronivan e assim a aula fica completa (Amanda - S1).

"Os assuntos abordados em sala de aula tiveram grande relevância para o entendimento da ("História da Ciência vs Histórias das Ciências"), tendo em vista os debates realizados em sala de aula, levando em conta os aspectos apresentados pelos docentes Prof. Me. Ronivan Sousa da Silva Suttini e Prof. Dr. João José Caluzi que após a leitura do (Texto 01: Sobre o Papel da História da Ciência no Ensino), levantaram novamente um debate visando buscar o nível de compreensão de cada discente no assunto" (Gabriel - S1).

No *Questionário de Avaliação Geral*, foi observado que 21 dos 22 estudantes consideraram a condução das discussões e reflexões pelos professores-pesquisadores como “Satisfatória” (15) ou “Muito Satisfatória” (6). Em síntese, a análise das *Memórias & Reflexões* fornece um apoio robusto a essa percepção, indicando como razões principais para a avaliação positiva a construção de um ambiente democrático e plural, o estímulo ao pensamento crítico, a influência das discussões na construção do conhecimento e complementaridade entre os professores-pesquisadores.

(e) *Estrutura e Sequência Lógica*

A análise das *Memórias & Reflexões* revela que aproximadamente dois terços dos estudantes comentaram – ainda que de forma implícita – sobre a estrutura e sequência lógica adotadas na disciplina. De modo recorrente, essa organização foi percebida de forma positiva, intencional e eficaz, estando fortemente conectada à própria identidade da disciplina História da Ciência 2023-1. Essa percepção converge com os dados obtidos no *Questionário de Avaliação Geral*, que indicaram predominantemente avaliações “Muito Satisfatória” (8) e “Satisfatória” (12), com apenas dois registros de “Insatisfatória”.

Com base na recorrência e consistência das manifestações explícitas dos estudantes, foi possível identificar duas razões principais que ajudam a explicar a avaliação positiva da estrutura e sequência lógica da disciplina, organizadas aqui como categorias interpretativas: (i) o reconhecimento da progressão histórica e temática dos conteúdos; e (ii) a coerência e a continuidade entre os tópicos abordados ao longo das semanas.

A primeira categoria – “reconhecimento da progressão histórica e temática como estratégia estrutural coerente” – destaca-se pela frequência e profundidade com que foi mencionada. As manifestações espontâneas evidenciam, de maneira explícita, que a organização cronológica e o encadeamento temático dos conteúdos foram percebidos pelos estudantes não apenas como estratégicos para a compreensão dos processos históricos e científicos (aprendizagem significativa), mas também como elementos que proporcionaram uma visão mais ampla e contextualizada do desenvolvimento da Física no século XIX (a partir da semana S8).

Essa percepção positiva manifesta-se, por exemplo, nos registros da estudante **Suzana (S8 e S12)**, que valorizou a abordagem cronológica adotada nas aulas sobre o efeito fotoelétrico e o eletromagnetismo:

"Na aula realizada no dia 02 de maio, foi feita uma aula expositiva apresentada pelo professor Caluzi, mediante ao conteúdo do efeito fotoelétrico, apresentando por meio de ordem cronológica essa análise, mostrando as principais discussões mediante ao efeito fotoelétrico" (Suzana - S8).

"[...] assim como na aula da semana 08, foram apontados levantamentos cronológicos sobre o experimento de Oersted, por meio de outras perspectivas como as análises e levantamentos de Faraday, Biot-Savart chegando até Maxwell" (Suzana - S12).

O estudante **Gustavo (S8 e S9)**, por sua vez, realça a eficácia da progressão histórica, ao destacar como a sequência de contribuições científicas – por meio de experimentos e descobertas – proporcionou uma compreensão mais profunda dos fenômenos:

"A análise cronológica feita pelo professor me ajudou a entender melhor como cada um desses cientistas contribuiu para o avanço do conhecimento sobre a luz, e como as diferentes teorias foram se complementando ao longo do tempo." (Gustavo - S8).

"O professor nos levou através da jornada de Michael Faraday, que expandiu o trabalho de Ørsted... Foi fascinante ver como os cientistas construíram conhecimento ao longo dos anos, desde os experimentos pioneiros de Ørsted até as equações unificadoras de Maxwell." (Gustavo - S9).

A mesma valorização da progressão histórica é encontrada nos relatos dos estudantes **Jorge (S9 e S10)** e **Matheus (S10)**, que enfatizam a importância de conhecer o encadeamento do desenvolvimento científico, evidenciando a intencionalidade da estruturação dos conteúdos para facilitar a assimilação do avanço das ideias científicas:

“Estudar essas teorias possibilita a oportunidade de se familiarizar com o processo de desenvolvimento científico e as etapas pelas quais as teorias passaram para alcançar seu estado atual” (Jorge - S9).

“Essas descobertas das novas radiações no final do século XIX estabeleceram as bases para o estudo da física nuclear e tiveram um impacto significativo em muitas áreas...” (Jorge - S10).

“Embora o conteúdo seja bem denso foi possível ter uma ideia geral das partes mais importantes do assunto que foi abordado.”. [...] “Sendo possível conhecer a cronologia com que os estudos e experimentos foram realizados e a contribuição de cada físico nessa parte da Física.” (Matheus - S10).

Já a estudante **Marta (S9)** demonstra claramente a percepção de que a evolução das teorias – marcadas por suas reformulações, refutações e aceitações ao longo do tempo – reforça o valor da abordagem histórica na construção do conhecimento:

“Teve um bom aprofundamento sobre as interpretações sobre o experimento de Oersted, citando Faraday, Thomson até chegar no Maxwell, que ‘fez’ as leis do eletromagnetismo e óptica.” “Fato é, como citei no início, que foi muito interessante poder olhar, o quanto as teorias foram criadas e destruídas, ou aceitas por influência de quem tinha a influência da comunidade acadêmica das épocas” (Marta - S9).

As citações selecionadas evidenciam que os estudantes reconhecem que a apresentação dos conteúdos de maneira cronológica contribui para a compreensão da evolução histórica e do desenvolvimento do conhecimento científico. A abordagem adotada, ao conectar eventos, teorias e realizações de diversos cientistas, favoreceu a construção de sentidos e a formação de uma visão integrada da história da ciência – condição fundamental para uma aprendizagem significativa e coerente, em conformidade com os princípios e processos da TAS, conforme propostos por Ausubel (2003).

Para além da valorização da progressão histórico-temática dos conteúdos, a segunda categoria interpretativa diz respeito às manifestações que evidenciam uma *Percepção Positiva da Coerência e da Continuidade entre os Tópicos* trabalhados ao longo das semanas. Em seus relatos, os estudantes demonstram entender que os temas abordados em aula não foram tratados como blocos isolados, aleatórios e desconexos, mas sim como partes de uma trajetória histórico-evolutiva, marcada por conexões, lacunas e desdobramentos que impulsionaram coletivamente

o avanço do conhecimento científico em áreas centrais da Física (eletromagnetismo, termodinâmica, estrutura da matéria e novas radiações).

Esse olhar mais localizado e analítico, revela que os estudantes conseguiram identificar ligações temáticas entre os conteúdos, mesmo quando não organizados segundo uma cronologia explícita. Essa percepção se alinha princípio da *reconciliação integrativa*, proposto por Ausubel (2003), segundo o qual a aprendizagem significativa é favorecida quando novas informações são relacionadas, de forma lógica e substantiva, ao conhecimento pré-existente.

Um exemplo claro dessa valorização aparece no relato de **Matheus (S7)**, que destaca a clareza na exposição e o modo como as ideias foram apresentadas interligadas:

“O assunto abordado foi compreendido de maneira rápida e eficiente, visto que os assuntos foram discutidos com muita clareza e com uma boa relação estabelecida entre os conteúdos. [...] Os assuntos foram apresentados em uma ordem de forma com que foi possível estabelecer a conexão entre os diferentes pensamentos.” (Matheus - S7).

De modo semelhante, **Helena (S10)**, reconhece uma lógica de continuidade ao mencionar o esforço da disciplina em revelar o processo entrelaçado de construção das teorias científicas:

“...tendo como objetivo contextualizar e demonstrar o progresso científico alcançado nas áreas de eletromagnetismo, das descobertas das novas radiações no final do Séc. XIX e da radiação do corpo negro, mostrando o processo entrelaçado de construção dessas teorias científicas...” “...entendendo mais como o processo ocorre ao decorrer dos anos e o impacto que cada trabalho realizado gera.” (Helena - S10).

Essa percepção de encadeamento entre os conteúdos também é observada no relato de **Pedro (S8)**, que valoriza as conexões entre modelos explicativos e aspectos epistemológicos. Seu relato evidencia uma compreensão da estrutura interna da disciplina, revelando uma percepção clara de relações conceituais e temáticas entre os conteúdos:

“A presente aula fez uma mescla muito importante de aspectos da Natureza da Ciência com os modelos explicativos vigentes em determinadas épocas, expondo assim muitas interconexões interessantes em ângulos que eu não havia notado até então” (Pedro - S8).

A estudante **Maria (S9 e S10)**, por sua vez, destaca com precisão a lógica interna da disciplina ao apontar que as teorias e descobertas não são apresentadas como elementos isolados, mas como partes de uma rede de relações. Essa ênfase nos “*pontos em comum*” e nas “*lacunas*” demonstra, com clareza, uma percepção ativa do vínculo entre os tópicos, bem como da construção progressiva de significados:

"Deste modo, assim como na semana anterior, foi possível notar que as teorias produzidas não estão isoladas entre si, pois estão relacionadas a partir de pontos em comum e pontos em que se nota uma 'lacuna' a ser preenchida por novas ideias e propostas que estejam de acordo" (Maria - S9).

"Deste modo, assim como nas duas semanas anteriores, foi possível notar que as 'descobertas' trazidas para a discussão em sala não estão isoladas entre si, pois estão relacionadas a partir de pontos em comum e pontos em que se nota uma 'lacuna' a ser preenchida por novas ideias e propostas que estejam de acordo" (Maria - S10).

Por fim, **Gabriel (S10)** amplia essa percepção ao apontar relações entre diferentes áreas da Física. Sua fala revela que o encadeamento dos temas favoreceu uma compreensão articulada entre saberes, característica central de uma organização didática coerente:

"Nessa aula consegui ligar os conhecimentos ensinados em Termodinâmica com os conhecimentos que foram apresentados nas disciplinas de física I, II, III e IV e como as teorias do Eletromagnetismo e Termodinâmica estão ligadas de forma intrínseca" (Gabriel - S10).

Tais manifestações explícitas evidenciam que a clareza na articulação entre os conteúdos – mesmo sem seguir uma ordem cronológica explícita – foi decisiva para a construção de sentidos ao longo da disciplina. Os estudantes não apenas perceberam conexões entre os temas trabalhados semana a semana, como também valorizaram o modo como essas conexões foram estabelecidas, favorecendo o raciocínio articulado e uma compreensão mais integrada dos processos científicos e epistemológicos.

Não foram observadas críticas contundentes à lógica organizacional da disciplina. Quando aparecem críticas, são pontuais e construtivas (por exemplo, sobre os prazos para entrega das atividades). Isso reforça que, mesmo com sugestões específicas, o panorama geral é de satisfação com a estrutura e sequência lógica adotada pelos professores-pesquisadores.

Assim, a coerência e continuidade entre os tópicos contribuíram de forma decisiva para a fluidez das discussões, a assimilação progressiva de conceitos e a consolidação de uma aprendizagem significativa. Essa abordagem revela-se em plena sintonia com os princípios ausubelianos da *diferenciação progressiva* e da *reconciliação integrativa*, ambos orientados à construção de subsunçores que possibilitam organizar, expandir e integrar o conhecimento de forma lógica, estruturada e duradoura.

(f) *Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência*

Os dados coletados no *Questionário de Avaliação Geral* mostram que, com 12 respostas classificando a contribuição da disciplina como "*Muito Satisfatória*" e 10 como "*Satisfatória*", a disciplina teve um impacto significativo ao estimular os estudantes a refletir e atribuir significados aos conteúdos abordados. **Esses resultados são corroborados pela análise de 130 menções explícitas à influência da disciplina na compreensão sobre a NdC identificadas nas *Memórias & Reflexões*.** Esse número expressivo de manifestações espontâneas – substancialmente maior do que nos outros temas analisados – está em consonância com os objetivos centrais previamente estabelecidos no planejamento da disciplina: contribuir para a construção de uma imagem mais bem informada sobre a NdC entre os estudantes (professores em formação inicial).

Diante do volume e densidade dos dados coletados, a análise foi organizada em torno de três eixos temáticos, identificados a partir da leitura dos relatos dos estudantes: **(i) *Fundamentos Epistemológicos***; **(ii) *Processos Científicos***; e **(iii) *Dimensões Sociais-Ética-Crítica***. Esses eixos temáticos estão alinhados e articulam-se diretamente com os “Princípios Heurísticos Representativos da NdC” (cf. Capítulo 1, subseção 1.3.2). Além disso, para cada um desses eixos, foram construídas entre duas e quatro “*Categorias Interpretativas*”, formuladas de modo indutivo com base na recorrência e densidade semântica das ideias-chave expressas pelos estudantes.

(i) Eixo Temático 1: *Fundamentos Epistemológicos*

O eixo temático *Fundamentos Epistemológicos* reúne reflexões que evidenciam um aprofundamento conceitual dos estudantes sobre a própria NdC, tanto ao reconhecerem sua diversidade histórica, cultural e epistêmica, quanto ao questionarem definições rígidas ou universalizantes. Trata-se de um campo de aprendizagem marcado por posturas críticas e investigativas, em que a ciência é compreendida como uma construção plural, situada e sujeita a revisões, disputas e redefinições ao longo do tempo. Ademais, observou-se que todas as *menções explícitas* classificadas nesse eixo temático representam concepções da NdC que estão

plenamente alinhadas com a visão bem informada descrita no Princípio Heurístico Representativo da NdC que trata das “*Influências Histórico-Sociais-Culturais na Ciência*” (cf. Capítulo 1 – subseção 1.3.2).

Categoria 1 – Reconhecimento da Pluralidade Epistêmica e Histórica da Ciência

Essa categoria abrange reflexões que expressam o reconhecimento da ciência como um fenômeno historicamente situado e socioculturalmente moldado, cujas formas de produção e validação de conhecimento variam conforme os contextos em que se desenvolve. Em vez de interpretá-la como uma entidade única, neutra e universal, os estudantes demonstram o entendimento de que a ciência é um conjunto de saberes e práticas marcadas por disputas conceituais e critérios culturalmente definidos.

O foco principal recai sobre a diversidade epistêmica — ou seja, sobre as múltiplas formas de se fazer ciência ao longo do tempo, em diferentes épocas, culturas e tradições. Essa abordagem amplia a visão tradicional da história da ciência, desafiando narrativas lineares e homogêneas, ao mesmo tempo em que valoriza contribuições que, muitas vezes, foram marginalizadas nos discursos dominantes. Importa destacar, contudo, que essa compreensão plural da NdC não implica, necessariamente, a negação da sua neutralidade (temática, metodológica ou conceitual). Em muitos casos, os estudantes reconhecem a diversidade histórica e cultural da ciência sem aprofundar discussões sobre interesses de poder, valores subjetivos ou ideologias subjacentes — elementos mais característicos do eixo “*Dimensões Sociais-Ética-Crítica*” (**Categoria 6: Reflexão Crítica e Responsabilidade Social na Ciência**). Do mesmo modo, as interdependências entre ciência, economia, política e tecnologia, embora tangenciadas, não são aqui o foco principal, sendo mais bem exploradas na **Categoria 8: Ciência como Sistema Complexo Interdependente**.

A pluralidade epistêmica e histórica constitui, portanto, a ideia-chave central dessa categoria, fortemente articulada aos campos da filosofia e da sociologia da ciência. Trata-se, portanto, de uma aprendizagem de natureza *metaepistêmica e crítica*, na qual os estudantes demonstram uma compreensão ampliada, contextualizada e reflexiva sobre o que se entende por “ciência”.

Ao longo da disciplina, alguns estudantes demonstraram uma elaboração crescente sobre a dimensão histórica e temática da ciência como eixo estruturador da disciplina. Um exemplo notável é a aluna **Marta**. Ela reconhece explicitamente a visão distorcida de neutralidade científica como um mito e defende que os indivíduos (até mesmo os cientistas) são

moldados por valores socioculturais. A escolha de três momentos distintos de sua trajetória — no início (S1), no meio (S9) e meio-final (S12) — visa não apenas evidenciar a recorrência da temática em sua fala, mas também ilustrar como suas reflexões se tornaram progressivamente mais complexas e integradas:

“Na minha compreensão que tive do assunto que abordamos, parece que todo mundo aqui sabe que a Ciência tem inúmeras visões distorcidas, que volta-e-meia sempre ocorrerá a pseudo-história e a falsa história onde quer que olhemos na história ao longo do tempo (...) porque talvez seja até interessante para a Ciência possuir essas visões distorcidas (principalmente a de ser neutra, linear e cumulativa) [...] Óbvio, todo mundo é carregado dos seus valores socioculturais e acho impossível essa indissociação, então pra mim seria bom trazer à tona a todo momento a não neutralidade das coisas e das pessoas” (Marta – S1).

“Foi muito interessante poder olhar, o quanto as teorias foram criadas e destruídas, ou aceitas por influência de quem tinha a influência da comunidade acadêmica das épocas... não pude deixar de notar [...] além disso, mostra-se que a comunidade científica não era neutra há bastante tempo” (Marta – S9).

“...ampliar o olhar de que realmente tudo é bem mais complexo do que parece, pois por mais que saibamos que o trabalho científico não é fácil, cada vez que temos uma aula assim, onde vemos erros (às vezes muitos erros) e acertos dos cientistas e todo o contexto histórico e social envolvido, eu pelo menos acabo humanizando muito mais as ciências, onde nada é perfeito, sempre está se construindo e destruindo” (Marta – S12).

Ronaldo (S4) sintetiza a importância de considerar os diferentes contextos históricos e culturais que moldam a ciência, reforçando a ideia de pluralidade epistêmica e a necessidade de uma compreensão contextualizada do conhecimento científico:

“A necessidade de se considerar diferentes contextos históricos e culturais [...], considerando as influências sociais, políticas e culturais que moldam a ciência” (Ronaldo – S4).

Maria (S4), por sua vez, traz uma reflexão crítica sobre a construção das narrativas históricas, sugerindo que muitas histórias da ciência são escritas para glorificar uma única versão dos fatos, desconsiderando outras perspectivas. Ela destaca a importância dos historiadores da ciência em desmistificar essas "idolatrias" e analisar os fatos de maneira objetiva:

“...isso implica em um cenário assustador, pois, nos leva a pensar em quantas histórias já não foram escritas com a intenção de idolatrar apenas uma versão dos fatos? E como saber quais seriam as outras versões e os indivíduos envolvidos nestas? Talvez a resposta para isso possa se encontrar nos especialistas em História da Ciência, que passam a ‘carregar’ uma responsabilidade imensa e de extrema importância: analisar os fatos assim como eles são, sem banalizações ou distorções” (Maria – S4).

Gabriel (S9) contextualiza o desenvolvimento da teoria eletromagnética como um processo de avanços e reformulações, influenciado pelas necessidades e valores do contexto científico de cada época, evidenciando a evolução das teorias. Além disso, ele evidencia a pluralidade de abordagens para o mesmo fenômeno e como contexto epistêmico daquela época moldou os critérios de aceitabilidade científica:

“A aula teve como objetivo contextualizar e mostrar como foi realizado o avanço científico na área do eletromagnetismo e como diversos cientistas tiveram contribuição, tanto na parte teórica como também na parte experimental, propondo experimentos, esses que por sua vez que desafiaram vários cientistas pois no contexto científico daquela época se buscava simetrias nas teorias e isso fez com que o eletromagnetismo passasse por diversas fases sendo propostos diversos modelos para explicar um mesmo fenômeno” (Gabriel – S9).

Matheus (S10) destaca a divergência na interpretação teórica entre cientistas de diferentes contextos nacionais, o que ilustra como a ciência é moldada por diferentes abordagens, valores e influências culturais, refletindo a ideia pluralidade epistêmica e condicionalidade histórica do conhecimento científico:

“Foi muito pertinente a divergência entre ingleses e alemães quanto ao entendimento sobre os raios catódicos. William Crookes e pesquisadores ingleses defendiam que os raios canais eram cargas elétricas em movimento, enquanto pesquisadores alemães como Goldstein, Hittorf, Wiedmann e Lenard defendiam que eram ondas eletromagnéticas capazes de serem desviadas em campos magnéticos” (Matheus – S10).

Gustavo (S8) observa como o progresso científico é influenciado pelas visões culturais e históricas dos cientistas de sua época, refletindo as diferentes abordagens teóricas da luz, conforme as influências filosóficas e culturais prevalentes em cada contexto:

“Percebi como o progresso científico é marcado pelas influências históricas e culturais, destacando a natureza humana da ciência. [...] A teoria corpuscular da luz proposta por Newton refletia sua visão de mundo mecanicista, enquanto a teoria ondulatória proposta por Huygens estava mais em sintonia com a visão holística que predominava na época” (Gustavo – S8).

Foram identificadas 33 *menções explícitas* associadas a essa categoria, distribuídas de maneira quase equilibrada ao longo das oito semanas analisadas. Os trechos destacados – considerados exemplos paradigmáticos – evidenciam a mobilização de fundamentos da filosofia e da história da ciência por parte dos estudantes, indicando um percurso de aprendizagem significativa, conceitualmente denso e com forte amadurecimento intelectual.

Categoria 2 – Problematização da Definição Unívoca de Ciência

Essa categoria interpretativa reúne manifestações em que os estudantes expressam dúvidas reflexivas e questionamentos epistemológicos diante de perguntas como: “*Afinal de contas, o que é essa coisa chamada ciência?*” ou “*Será que todas as áreas científicas precisam seguir o mesmo método de investigação?*”. Em vez de aceitarem como universais e imutáveis os critérios definidos pela filosofia da ciência clássica, como os critérios de falsificabilidade de Karl Popper ou a exigência de métodos empíricos rígidos, os estudantes manifestam desconfortos com definições únicas, rígidas ou reducionistas. Isso revela uma postura reflexiva e crítica que questiona limites conceituais e fronteiras entre diferentes formas de conhecimento.

O foco central recai sobre a instabilidade epistêmica construtiva, que se manifesta como um processo contínuo de reavaliação e revisão dos pressupostos prévios dos estudantes, permitindo-lhes uma abertura para novas perspectivas epistemológicas. Em vez de reproduzirem certezas consolidadas, os estudantes passam a enxergar a ciência como uma construção situada, interpretativa e sujeita a redefinições. Esse processo indica uma aprendizagem conceitual significativa, marcada por dúvida genuína e disposição para enfrentar complexidades.

Ainda que esse tipo de problematização dialogue com outros aspectos da NdC — como a historicidade ou as dimensões sociais —, o eixo predominante aqui é o epistemológico: trata-se de um questionamento direto sobre os fundamentos conceituais do que é considerado ciência, sua diversidade interna e suas fronteiras com outros saberes – como exemplifica o chamado “*Problema da Demarcação*” de Karl Popper. Nos casos mais elaborados, essa crítica também implica o reconhecimento da exclusão histórica das ciências humanas e sociais em modelos mais restritivos de cientificidade, evidenciando um olhar atento às hierarquias entre diferentes formas de saber.

A ideia-chave central, portanto, é a recusa da ideia de ciência como conceito estável, universal e neutro, em favor de uma visão plural, inclusiva e aberta à diversidade de práticas, objetos e métodos. Essa aprendizagem se destaca por seu potencial transformador, ao desafiar certezas aparentemente consolidadas e fomentar uma compreensão mais complexa, crítica e contextualizada da própria noção de “ciência”.

Alguns estudantes ilustram de forma particularmente clara o processo de problematização conceitual. A estudante **Suzana (S7)**, por exemplo, explicita o colapso de uma definição tradicional de ciência (baseada em comprovação e método) e a abertura para uma revisão conceitual. Há um movimento de dúvida conceitual, uma interrogação ativa sobre o que

é ciência, e uma insegurança epistemológica honesta diante da possibilidade de definições únicas ou universalistas. A própria frase “*Não tenho mais certeza ...*” é emblemática de um processo de desconstrução e reconstrução conceitual:

“Acho que volto a me questionar novamente, o que é ciência?” [...] “Questiono se poderia dar uma resposta para a pergunta como, por exemplo, a ciência é uma atividade produzida pelos seres humanos a qual apresenta estudos aprofundados e metodologias para sua ‘comprovação’? Não tenho mais certeza sobre tais levantamentos próprios” (Suzana – S7).

Já o estudante **Ronaldo (S7)** revela uma tensão entre uma expectativa de unificação da ciência (visão reducionista) e a constatação da diversidade metodológica (visão pluralista). Trata-se de um exemplo paradigmático do confronto entre uma visão de senso comum e uma visão epistemológica mais sofisticada. O fato de ele dizer “*deve haver algo que as unifique*” mostra que ele está justamente debatendo a ausência dessa unificação unívoca:

“Os professores disseram que não existe um método fundamental e universal que seja único para todas as ciências. Isso me causa um certo desconforto, pois tenho a ideia de que as ciências são diferentes faces da mesma coisa. [...] Então deve haver algo que as unifique e as torne uma coisa só” (Ronaldo – S7).

O estudante **Gustavo (S1)** demonstra uma inquietação genuína sobre os limites e definições da ciência, reconhecendo sua complexidade conceitual e a multiplicidade de entendimentos possíveis:

“A questão que mais me fez refletir na aula foi ‘o que é Ciência?’, percebi que mesmo estando em contato com a ciência no nosso dia a dia é muito abstrato e causa uma certa dificuldade de conseguirmos definir de maneira simples o que é ou o que não é ciência. Existem várias possibilidades de respostas e entendimentos” (Gustavo - S1).

Enquanto **Luiz (S1)** mostra a transformação de um julgamento impulsivo em uma avaliação crítica dependente de critérios e referenciais. Seu relato ilustra a instabilidade de critérios e a relatividade das fronteiras do conceito de ciência:

“Logo sem hesitação respondi em meus pensamentos... que sim!! claro que é ciência... mas logo depois com os questionamentos levantados sobre o que é ciência, fiquei claramente em dúvida, pois concordava com o ponto de que a ciência tinha que ser algo que tivesse uma regra, um roteiro de teste a ser seguido e comprovado... então se me perguntassem de novo se filosofia era ciência diria que dependerá do referencial e padrões que queremos pôr à prova” (Luiz - S1).

Ao todo, foram identificadas 20 *menções explícitas* associadas a essa categoria, com destaque para a primeira semana (S1), que concentrou metade dessas manifestações. Esse dado sugere que as reflexões iniciais foram estimuladas pelas perguntas propostas provocativas lançadas pelos professores-pesquisadores com o intuito de explorar o conhecimento prévio epistemológico da turma. Questões como “*Afinal de contas, o que é essa coisa chamada ciência?*”, “*A matemática é uma disciplina científica?*”, “*E a filosofia?*”, ou ainda, “*O que determina se uma disciplina é científica ou não?*”, atuaram como disparadores conceituais potentes, abrindo espaço para o surgimento de dúvidas autênticas, reposicionamentos e tensões conceituais. A frequência e a intensidade dessas manifestações sinalizam o quanto os estudantes foram desafiados a repensar definições que antes pareciam estáveis, revelando um movimento importante de desnaturalização da ciência como conceito unívoco.

(ii) **Eixo Temático 2: *Processos Científicos***

No âmbito do Eixo 2 – *Processos Científicos*, emergem reflexões que revelam um amadurecimento progressivo na compreensão dos estudantes sobre o funcionamento interno da ciência e seus modos próprios de construir conhecimento. A partir da análise das três categorias reunidas nesse eixo, observa-se que os estudantes começam a reconhecer a ciência não como um corpo fixo de verdades, mas como uma prática investigativa metódica, dinâmica e representacional. Por um lado, destacam-se compreensões sobre a estrutura e a dinâmica da metodologia científica, com ênfase nos ciclos de observação, formulação de hipóteses, testagem e revisão — seja em versões mais rígidas e normativas, seja em concepções mais flexíveis e informadas sobre a pluralidade dos métodos científicos. Por outro, observa-se um avanço significativo na percepção do papel epistêmico de modelos, analogias e representações, com estudantes reconhecendo que o conhecimento científico não reflete diretamente a realidade, mas opera com construções simbólicas e interpretativas que permitem pensar o invisível, formular inferências e estruturar explicações. Por fim, ganha relevo também a consciência de que a ciência avança historicamente por meio da identificação e superação de lacunas conceituais, reforçando a ideia de que o progresso científico não ocorre de maneira contínua ou cumulativa, mas por meio de reestruturações profundas nas formas de compreender os fenômenos. Assim, o Eixo 2 – *Processos Científicos* evidencia um movimento formativo importante: o de levar os estudantes a refletirem sobre os próprios processos de produção do

conhecimento científico, reconhecendo sua complexidade, historicidade e caráter representacional.

Categoria 3 – Estrutura e Dinâmica da Metodologia Científica

Essa categoria abrange reflexões que indicam uma compreensão da ciência como um processo racional, sistemático e metódico, sustentado por etapas como observação, formulação de hipóteses, experimentação, revisão e validação. A ideia-chave central é o reconhecimento de que o conhecimento científico não avança de forma linear ou por descobertas pontuais e isoladas, mas por processos investigativos contínuos, marcados por tentativas, erros e aperfeiçoamentos sucessivos, nos quais hipóteses são constantemente testadas, corrigidas e aperfeiçoadas com base em erros e revisões sucessivas.

A centralidade da metodologia científica é percebida como elemento estruturador da prática científica, conferindo legitimidade às explicações produzidas. Os estudantes valorizam tanto a dimensão imaginativa e criativa da ciência quanto sua organização formal, seu compromisso com o rigor empírico e sua capacidade de gerar conhecimento confiável.

Essa categoria não trata das influências externas à ciência (como fatores políticos, econômicos ou sociais), tampouco discute a evolução histórica das teorias científicas — aspectos abordados mais adiante em outras categorias. Aqui, o foco recai sobre o funcionamento interno da investigação científica: como se estruturam as perguntas, os testes e as validações. Trata-se, portanto, de uma aprendizagem de natureza epistêmica formal, vinculada à epistemologia clássica e à prática científica concreta.

A seguir, destacamos trechos de *menções explícitas* que capturam, com clareza e profundidade, a essência da metodologia científica como processo estruturado, contínuo e sujeito a revisões e validações.

A estudante **Amanda (S3)** elabora uma reflexão que se alinha bem com a ideia de que o método científico envolve criatividade e imaginação. Embora ela reconheça as fases essenciais da metodologia científica, como formulação de hipóteses e experimentação, sua abordagem enfatiza mais a flexibilidade e o aspecto humano da ciência, o que está em sintonia com a ideia de uma metodologia não rígida:

“A Ciência é uma atividade humana que requer o uso da ‘imaginação e da criatividade’ de seus profissionais para categorizar conhecimento adquirido através de pesquisa e estudos seguindo a metodologia científica. [...] De um modo resumido, entendo que o método científico nasce da observação dos fatos da realidade [...] a formulação de hipóteses [...] a fase de verificação [...] sendo a experimentação uma

grande condutora [...] hipóteses ‘sobrevivem’ ou são descartadas [...]. Outro ponto que julgo importante para o progresso da ciência é a comunicação dos resultados obtidos [...]” (**Amanda – S3**).

A estudante **Marta (S7)**, por sua vez, reafirma com ênfase a centralidade do método científico como pilar absoluto da ciência, expressando uma visão objetivista e normativa do fazer científico, alinhada com uma visão tradicional e mais rígida, sugerindo que o “*método científico*” é único, algorítmico e que deve ser aplicado de maneira infalível. Seus comentários revelam uma concepção alinhada a uma leitura reducionista e parcialmente distorcida sobre a NdC, em que a validação do conhecimento está intrinsecamente vinculada à neutralidade, à testabilidade e à decomposição metódica dos fenômenos. Em sua argumentação, o método não é apenas uma ferramenta técnica, mas o próprio critério de existência e legitimidade da ciência:

“O que eu estou discordando, na verdade, é puramente no sentido de alguém que está analisando a imaginação como se fosse um cientista hoje que carrega o Método Científico na hemoglobina do sangue. Por esse viés, um cientista discorda do uso da imaginação e criatividade para explicar seus dados e o método pelo qual ele utilizou para testar sua hipótese, afinal, na comunidade científica, a Ciência deve ser objetiva, neutra, e claro, sem as percepções pessoais do pesquisador. [...] Assim como discutimos em aula, temos que a ciência só se encaminha, evolui e se replica por causa do método científico e, por consequência, da metodologia científica que está lá para validar todo conhecimento científico testável e comprovável. [...] Basicamente, descrever qualquer fenômeno, por menor que seja, utilizar um método que o faça se partir em micro partes de verdade para que ele seja ao final completamente verdadeiro, é imprescindível para a tal da investigação científica” (**Marta – S7**).

O estudante **Tiago (S7)** também revela uma leitura reducionista e parcialmente distorcida da NdC. Sua concepção da metodologia científica é explicitamente normativa: trata-se de um conjunto de regras, técnicas e procedimentos que asseguram a validade e confiabilidade nos resultados. A atividade científica, nessa perspectiva, depende da aplicação rigorosa de protocolos que legitimam o conhecimento produzido. Assim como **Marta (S7)**, sua visão está em contraposição a uma imagem bem informada sobre a NdC, que enfatiza a pluralidade metodológica e a ideia de que o processo científico não é infalível, mas sim sujeito a erros, ajustes e revisões:

“A metodologia científica desempenha um papel fundamental nas pesquisas e investigações científicas, pois fornece um conjunto de regras, técnicas e procedimentos que garantem a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos” (**Tiago – S7**).

Por outro lado, a estudante **Helena (S9)** expressa uma visão que se aproxima de uma concepção mais bem informada sobre a NdC, reconhecendo a jornada empírica e experimental necessária para atingir teorias amplamente aceitas (em certa medida, uma visão ainda que

debatível do ponto de vista epistemológico). Ela valoriza o esforço contínuo da comunidade científica e o caráter cumulativo da ciência, o que está em harmonia com a ideia de que a ciência é um processo dinâmico e revisável:

“Compreendi melhor o processo até alcançar uma teoria firmemente aceita, embasada em evidências empíricas e experimentais, isso garantiu minha compreensão de como a construção do conhecimento pode ser uma jornada árdua, porém seus resultados refletem o esforço de cada cientista e pesquisador que se submeteram a continuar explorando” (Helena – S9).

O estudante **Jorge (S12)** expressa uma concepção sofisticada sobre a dinâmica metodológica da ciência, ao reconhecer o caráter contínuo, revisável e baseado em evidências do processo de construção do conhecimento. Sua reflexão enfatiza a estrutura iterativa do método científico, articulando com clareza o ciclo de formulação, testagem e ajuste teórico diante de novas informações empíricas, destacando a pluralidade e a necessidade de revisões constantes no processo científico:

“Essa investigação também ilustrou a dinâmica da construção do conhecimento científico, essa dinâmica faz parte do processo científico contínuo, onde as teorias são desenvolvidas, testadas e ajustadas à medida que novas informações são evidenciadas, e a possibilidade de revisão e modificação das teorias existentes com base em novas evidências” (Jorge – S12).

Ao todo, foram identificadas 28 *menções explícitas* associadas a essa categoria, com destaque para a sétima semana (S7), que concentrou metade dessas manifestações. A frequência e a intensidade observadas nesse encontro específico refletem a centralidade do tema abordado em sala de aula, voltado à análise do papel e das limitações da “metodologia científica experimental hipotético-dedutivo” nas práticas científicas. Também foram fomentadas discussões e reflexões sobre conceitos metacientíficos, como “observação”, “neutralidade” e “objetividade” no contexto da investigação científica experimental, além das concepções prévias dos estudantes expressas na Questão 8 do “*Questionário Inicial VOSE-RCN*”. Esses elementos ajudaram a catalisar reflexões mais aprofundadas sobre a dinâmica e a estrutura da metodologia científica.

No entanto, como exemplificam e evidenciam os trechos dos estudantes **Marta (S7)** e **Tiago (S7)**, algumas concepções distorcidas – alinhadas a uma visão de método científico rígido, algorítmico e infalível – mostraram-se persistentes, mesmo após as discussões e reflexões em sala de aula. Essas concepções distorcidas reforçam a interpretação dos dados quantitativos iniciais, em que itens como 8aA, 8aF e 8aG (com $Md = 4$ e $\Delta = 3$ em relação ao

referencial especialista) revelaram uma tendência à valorização pragmática do “método científico”, indicando que visões rígidas sobre validação científica se manifestam consistentemente em diferentes instrumentos e momentos de coleta.

Categoria 4 – O Papel Epistêmico das Analogias, Modelos ou Representações na Ciência

Essa categoria abrange reflexões que revelam o reconhecimento de que a ciência opera com representações indiretas da realidade, utilizando analogias, modelos e outras formas de representação como instrumentos epistêmicos fundamentais para compreender, explicar e prever fenômenos naturais. Em vez de tomar o conhecimento científico como um reflexo direto e exato do mundo, as reflexões dos estudantes que se enquadram nessa categoria demonstram perceber que as teorias científicas são construções interpretativas que dependem de imagens mentais, estruturas simbólicas e linguagens específicas.

O foco principal recai sobre a importância das analogias e modelos na formulação do pensamento científico — não apenas como recursos didáticos ou ilustrativos, mas como verdadeiros dispositivos criativos e cognitivos que permitem imaginar o que não se vê, formular hipóteses, estruturar explicações e construir inferências. Essa compreensão aproxima-se de uma visão da ciência como prática modeladora e criativa, na qual o uso de representações (físicas, matemáticas, conceituais ou simbólicas) ocupa um papel central no processo de construção do conhecimento.

Trata-se, portanto, de uma perspectiva que ressalta a natureza epistêmica operatória da aprendizagem: os estudantes demonstram estar atentos aos modos pelos quais o conhecimento científico é produzido, percebendo o papel ativo da imaginação, da linguagem e da representação nesse processo. A ênfase está na compreensão de que “*analogias ajudam a criar modelos científicos que explicam fenômenos científicos*”, revelando uma consciência mais refinada sobre a dinâmica interna do trabalho científico.

Essa categoria não implica, necessariamente, um domínio técnico dos modelos específicos utilizados nas diferentes áreas da ciência, mas sim uma sensibilidade epistemológica para a ideia de que toda teoria ou explicação científica envolve uma dose de abstração, analogia e construção simbólica. Nesse sentido, aproxima-se dos debates contemporâneos sobre a NdC, especialmente aqueles que reconhecem seu caráter interpretativo, provisório e representacional. Vejamos, a seguir, alguns trechos destacados como exemplos paradigmáticos dessa categoria.

O estudante **Tiago (S7)**, por exemplo, explora como a imaginação é uma ferramenta epistêmica central para a construção de modelos mentais — um conceito essencial para entender como os cientistas podem representar fenômenos que não podem ser observados diretamente. Sua reflexão sugere a compreensão de que a ciência não é um reflexo direto da realidade, mas se constrói por meio de representações indiretas (modelos, analogias ou representações), indo além da visão didática e ilustrativa:

"A imaginação serve como ferramenta para um cientista para formar imagens mentais de objetos ou situações que não estão presentes na realidade. Na ciência, os cientistas usam a imaginação para criar modelos mentais abstratos de fenômenos naturais e para visualizar processos que não podem ser vistos diretamente" (Tiago – S7).

A estudante **Lara (S7)**, por sua vez, ressalta o papel da imaginação na formulação de hipóteses e modelos teóricos. Sua reflexão revela uma compreensão da ciência como uma prática representacional e interpretativa, na qual a criatividade e o raciocínio por analogia funcionam como ferramentas epistêmicas fundamentais. Ao sugerir que o “*raciocínio por analogia*” é usado como ferramenta epistêmica tanto para a criação quanto para a validação de teorias – e não apenas como recurso didático e ilustrativo –, ela aproxima-se de uma visão da ciência como atividade modeladora, baseada em representações indiretas e abstratas da realidade:

"Apesar de que a ciência seja frequentemente vista como uma disciplina lógica e baseada em fatos, [...] em muitas vezes é a criatividade e a imaginação que levam a novas descobertas e avanços científicos. [...] A imaginação é fundamental na formulação de hipóteses e na criação de modelos teóricos que podem ser testados experimentalmente. [...] O raciocínio por analogia é outra ferramenta importante na prática científica. [...] O raciocínio por analogia também pode ser usado para testar hipóteses e validar teorias..." (Lara - S7).

O estudante **Jorge (S7)** também reconhece a imaginação, a criatividade e o raciocínio por analogia como componentes centrais da construção do conhecimento científico. Sua reflexão sugere uma compreensão da ciência como atividade interpretativa e inventiva, baseada em representações que articulam intuições perceptivas com formulações abstratas:

"A imaginação e a criatividade, acompanhada do raciocínio por analogia, são habilidades importantes que viabilizam uma percepção intuitiva da realidade, possibilitando 'saltos criativos' que ligam as percepções aos conhecimentos gerais e as deduções às verificações" (Jorge – S7).

Ao todo, foram identificadas 12 *menções explícitas* associadas a essa categoria, com destaque novamente para a sétima semana (S7), que concentrou oito dessas manifestações. Esse

resultado reforça a conclusão anterior a respeito da relevância do tema discutido em aula, focado na análise do papel e das limitações da “metodologia científica experimental hipotético-dedutiva” nas práticas científicas.

Categoria 5 – Rede Histórica de Reformulações Motivadas por Lacunas Conceituais

Essa categoria abrange reflexões que expressam uma compreensão bem informada da ciência como um sistema dinâmico de teorias interconectadas, que evolui por meio da identificação e do enfrentamento de lacunas, tensões e insuficiências conceituais. Em vez de conceber o progresso científico como uma simples acumulação linear de descobertas, os estudantes que se enquadram nesta categoria demonstram perceber a ciência como uma rede estruturada historicamente, na qual o desenvolvimento do conhecimento ocorre com base em reformulações sucessivas, orientadas por problemas ainda não resolvidos.

O foco principal recai sobre o papel das lacunas epistêmicas — isto é, os pontos cegos, contradições internas e limites explicativos das teorias existentes — como motores do avanço científico. Nessa visão, cada nova teoria emerge como resposta a um problema ou impasse deixado por estruturas conceituais anteriores. Em vez de serem completamente abandonadas, muitas ideias científicas acabam sendo reelaboradas, reinterpretadas ou integradas a novos modelos mais abrangentes, num processo contínuo de reconstrução conceitual.

Trata-se, portanto, de uma perspectiva que reconhece a ciência como um empreendimento historicamente construído, falível e permanentemente inacabado. A ênfase está na percepção da interdependência entre as teorias, do papel ativo da crítica conceitual e da criatividade intelectual na superação de limites explicativos. As reflexões dos estudantes revelam um tipo de aprendizagem epistemológica significativa, marcada por uma compreensão metacientífica/histórica da ciência como estrutura relacional, isto é, que se transforma ao longo do tempo mediante tensões internas e respostas construtivas. Em outras palavras, os estudantes percebem que a ciência avança quando suas explicações para um determinado fenômeno deixam de ser suficientes. Tal concepção aproxima-se das abordagens contemporâneas da NdC, especialmente aquelas que valorizam a historicidade, a falibilidade e a lógica de redes teóricas como elementos centrais na compreensão da atividade científica.

A seguir, destacamos três trechos de *menções explícitas* que são considerados exemplos paradigmáticos dessa categoria. No primeiro, a estudante **Maria (S10)** apresenta uma síntese da perspectiva histórica e epistemológica da ciência. Sua reflexão articula vários elementos centrais da categoria: a falibilidade da ciência, a superação de limites explicativos, o caráter

histórico e cumulativo (por reelaboração) das teorias e a importância das lacunas como motores do desenvolvimento:

"[...] conforme as ideias e modelos eram desenvolvidos ao longo do tempo, conceitos eram abandonados por outros que explicassem de maneira mais satisfatória determinados fenômenos físicos. (...) podemos notar que o conhecimento científico não é infalível ou irreduzível, de modo que é sempre necessário apresentações de análises mais detalhadas e a proposição de novos fenômenos de estudo, a exemplo da questão do Raio X, que inicialmente fora divulgado como algo não nocivo à população, de modo que foi-se percebendo as consequências desta exposição a partir do momento em que as pessoas começaram a adoecer. Muitos trabalhos não tiveram tanto reconhecimento logo de início, mas isso não significa que não tiveram importância na evolução do conhecimento científico, pelo contrário, contribuíram para diversos estudos que se desenvolveram gradativamente" (Maria – S10).

No segundo, a estudante **Lara (S8)** aponta diretamente para o dinamismo da ciência como rede histórica, destacando refutações, reformulações e reaproveitamento conceitual. A ênfase nas "*lacunas a serem preenchidas*" e na evolução das ideias ao longo do tempo reflete claramente essa categoria:

"Com todas essas transformações ao longo do ano, vendo que os cientistas encontravam uma solução, mas era rebatida e teriam que reformular, descartando as ideias totalmente ou parcialmente, nos mostra que a ciência não é infalível. Ela pode ser mudada, restaurada, reformulada, as ideias podem acabar sendo refutadas e cheia de lacunas a serem preenchidas. Muitas ideias científicas que tiveram um bom reconhecimento no começo, tiveram que ser mudadas pois algumas ideias não condiziam com a realidade dos fenômenos físicos, mas acabaram se tornando uma base para novos pensamentos a serem estudados e desenvolvidos ao passar dos anos" (Lara – S8).

No último, o estudante **Gabriel (S8)** destaca o impacto das lacunas epistemológicas e das dificuldades em aceitar novos modelos, ressaltando como a ciência evolui por meio da superação de impasses e resistências. Além disso, a ideia de "*novo modelo*" em oposição ao "*modelo vigente*" sugere um processo de ruptura e substituição teórica que ecoa reformulações paradigmáticas:

"A aula teve como objetivo combater as distorções acerca da história das ciências e mostrar como a influência de um cientista como autoridade pode ter impacto." [...] Conseguimos identificar diversos pontos onde os cientistas tiveram dificuldades em aceitar um novo modelo e ideias diferentes ao modelo que estava em vigor" (Gabriel – S8).

Ao todo, foram identificadas 15 *menções explícitas* associadas a essa categoria, enfatizando a natureza mutável e reestruturante do conhecimento científico, evidenciando uma concepção bem informada sobre a NdC alinhada à ideia de que o processo científico está sempre em construção e sujeito a revisões à medida que novas evidências e interpretações surgem.

(iii) **Eixo Temático 3:** *Dimensões Sociais-Ética-Crítica.*

As reflexões reunidas neste eixo revelam uma compreensão ampliada da ciência enquanto prática social, ética e historicamente situada. Longe de ser percebida como uma atividade técnica neutra, a ciência emerge, nas vozes dos estudantes, como um empreendimento permeado por valores, escolhas, relações e interdependências. Os resultados evidenciam quatro formas complementares de reconhecer essa inserção da ciência no tecido social: como prática crítica e responsável diante de dilemas éticos e ambientais (**Categoria 6**); como construção colaborativa, dialógica e intersubjetiva (**Categoria 7**); como sistema complexo entrelaçado a contextos políticos, econômicos e tecnológicos (**Categoria 8**); e como atividade atravessada por disputas interpretativas e reavaliações sucessivas em resposta a tensões teóricas e conceituais (**Categoria 9**). Em conjunto, essas categorias desenharam um panorama rico e multifacetado da aprendizagem sobre a ciência, marcado por uma valorização crescente de sua dimensão social, epistêmica e crítica.

Categoria 6 – Reflexão Crítica e Responsabilidade Social na Ciência

Esta categoria reúne reflexões que reconhecem a ciência como uma prática indissociável de questões sociais, éticas, políticas e ambientais. Os estudantes que se expressam nessa linha demonstram sensibilidade quanto aos efeitos do conhecimento científico, percebendo que suas realizações têm impactos concretos na vida das pessoas e no meio ambiente. Essa compreensão transcende o domínio técnico ou teórico, valorizando a análise dos propósitos, valores e consequências da ciência.

O foco central recai sobre a crítica externa à ciência — uma avaliação que parte da perspectiva da sociedade, questionando os limites éticos e a responsabilidade envolvida na produção e uso do conhecimento. Os estudantes ponderam se todo avanço científico representa, de fato, um progresso, refletindo sobre dilemas éticos, desigualdades sociais ampliadas por tecnologias e impactos ambientais a curto e longo prazo.

Importa destacar que essa postura crítica não implica rejeição da ciência, mas sim valorização de uma visão mais reflexiva e situada. A ciência é compreendida como uma atividade humana inserida em contextos sociais específicos, permeada por valores, interesses e escolhas éticas que não podem ser ignorados.

Essa ideia central dialoga com princípios heurísticos da NdC, ao destacar sua não neutralidade, seu caráter valorativo e seu entrelaçamento com demandas sociais. As manifestações agrupadas nesta categoria evidenciam uma aprendizagem reflexiva e valorativa, que amplia a compreensão conceitual e promove o desenvolvimento de uma postura crítica e socialmente responsável diante da ciência e de suas implicações. Foram identificadas somente quatro reflexões diretamente associadas a essa categoria:

“A necessidade de reflexão crítica sobre a produção científica [...] e as implicações da produção científica para a sociedade e o meio ambiente.” (Ronaldo – S4).

“Durante as discussões em sala de aula, também foi abordado e questionado se o Prêmio Nobel deveria levar em consideração não só as contribuições para a área específica, mas também o caráter da pessoa.” (Gustavo – S3).

“Entendo que a ciência tem um papel fundamental na construção de um futuro mais justo, equitativo e sustentável.” (Gustavo – S7).

“A irresponsabilidade na produção de uma pesquisa e na aprovação de uma pesquisa não são levados em conta, a rigidez e análise não é uma mera formalidade que pode ser feita de qualquer maneira, mas com olhar sempre de responsabilidade (Luiz – S4).

Os trechos destacados revelam uma preocupação central com a reflexão ética e crítica sobre a ciência e suas implicações sociais, políticas e ambientais. Há uma ênfase na responsabilidade ética na prática científica, seja na reflexão sobre as consequências sociais e ambientais da produção científica (como indicado por **Ronaldo – S4**), ou na análise do papel da ciência em promover um futuro mais justo e sustentável, como aponta **Gustavo (S7)**. Além disso, há questionamentos sobre a importância dos valores éticos na seleção de reconhecimentos científicos, como o Prêmio Nobel, e uma crítica à irresponsabilidade na produção e avaliação de pesquisas, conforme apontado por **Luiz (S4)**. Em conjunto, esses trechos destacam a necessidade de uma ciência mais reflexiva, responsável e comprometida com a sociedade e o meio ambiente, indo além de uma simples busca por progresso técnico.

Categoria 7 – Ciência como Prática Social Colaborativa, Dialógica e Intersubjetiva

Esta categoria enfoca a ciência como um processo coletivo e interativo, em que o conhecimento é construído por meio de trocas de ideias e colaboração entre pares. Os estudantes que se expressam nessa categoria reconhecem que o avanço científico ocorre por meio de um diálogo contínuo, no qual divergências construtivas e críticas mútuas são essenciais para a evolução do conhecimento.

A ciência é vista como uma rede de interações, em que o progresso surge da capacidade dos cientistas de ouvir, criticar e reformular suas ideias em diálogo com outros. Esse processo de construção coletiva e reinterpretação constante é visto como crucial para o desenvolvimento do conhecimento. Os estudantes compreendem que a produção de conhecimento é uma atividade socialmente construída, não um esforço isolado.

Essa abordagem se alinha com uma perspectiva sociológica da ciência, na qual as controvérsias e o debate são fundamentais para a construção de novas teorias e para o avanço do processo científico. As manifestações dessa categoria refletem uma aprendizagem epistemológica, em que os estudantes ampliam sua compreensão sobre como o conhecimento é gerado, valorizando o diálogo, a crítica e a colaboração como componentes essenciais da prática científica.

Essa nova categoria compartilha pontos de convergência com a **Categoria 1** (*Reconhecimento da Pluralidade Epistêmica e Histórica da Ciência*) ao reconhecer a diversidade de perspectivas e a importância do diálogo entre diferentes formas de saber, contribuindo para a construção coletiva e intersubjetiva do conhecimento. Além disso, ela também se alinha à **Categoria 3** (*Estrutura e Dinâmica da Metodologia Científica*), ao reconhecer que a prática científica é construída por meio de um processo dinâmico e interativo, em que as metodologias não são fixas, mas evoluem conforme as interações entre cientistas e suas diversas abordagens. No entanto, ela se diferencia da **Categoria 6** (*Reflexão Crítica e Responsabilidade Social na Ciência*), que se concentra nas implicações sociais e éticas da ciência, questionando suas responsabilidades e impactos no mundo. Em resumo, a **Categoria 7** enfatiza a dinâmica interna da prática científica, a importância das interações colaborativas e dialógicas dentro da comunidade científica, sem focar diretamente nos dilemas éticos ou nas consequências externas da ciência.

Foram identificadas somente seis *menções explícitas* diretamente associadas a essa categoria, das quais separamos dois trechos como exemplos paradigmáticos. O estudante **Ronaldo (S8)** exemplifica de maneira clara a importância das interações e da troca de ideias para o avanço científico, destacando como a colaboração entre diferentes cientistas, como Kepler e Brahe, levou a novas descobertas. Já o estudante **Jorge (S8)** destaca que a produção científica não é um processo isolado, mas sim um esforço coletivo, refletindo a essência do diálogo e da crítica construtiva no processo científico:

“A aula em questão parece ter enfatizado a importância das interações e da troca de ideias na produção científica. É fundamental que a comunidade científica esteja em sintonia e que haja apoio e opiniões contrárias para que nossos argumentos e ideias

sejam reordenados e reelaborados. [...] Um exemplo interessante disso é o caso das observações de Kepler dos dados coletados por Tycho Brahe. Kepler observou algo que Brahe não tinha pensado, mostrando como a interação entre diferentes perspectivas pode levar a novas descobertas e avanços científicos” (Ronaldo – S8).

“Outro fator crucial é a ideia de que as teorias científicas são produzidas a partir de um processo colaborativo e crítico de construção de conhecimento” (Jorge – S8).

Esses dois trechos são representativos da **Categoria 7**, pois capturam tanto a ideia de colaboração contínua entre cientistas quanto a importância das interações para a construção e evolução do conhecimento, alinhando-se com a visão sociológica da ciência que destaca o papel do diálogo e das críticas construtivas no avanço científico.

Categoria 8 – Ciência como Sistema Complexo Interdependente

Esta categoria reúne manifestações em que os estudantes demonstram compreender a ciência como uma prática profundamente entrelaçada com outros domínios da vida social, como a política, a economia e a tecnologia. O desenvolvimento científico é visto não como uma atividade autônoma, mas como parte de um sistema interdependente, condicionado por múltiplos fatores externos e, simultaneamente, capaz de influenciá-los.

O foco recai sobre a ciência como elemento de um ecossistema sociotécnico mais amplo. Avanços tecnológicos, políticas públicas e transformações sociais são compreendidos tanto como moldadores da prática científica quanto como impactados por ela. Essa visão rompe com a ideia de neutralidade ou racionalidade pura, situando a ciência em contextos históricos, materiais e institucionais específicos.

Trata-se, portanto, de uma aprendizagem de natureza sistêmica e contextualizada, em que o conhecimento científico passa a ser entendido como parte de uma rede dinâmica de relações sociais, permeada por interesses, estratégias e condições concretas. Financiamento, agendas políticas e prioridades econômicas são reconhecidos como elementos que influenciam o que se pesquisa, como se pesquisa e com que finalidade.

Esta categoria dialoga com diversos princípios heurísticos da NdC, especialmente no que se refere à interdependência entre ciência e sociedade, à condicionalidade histórica e política, e à inserção da ciência num sistema sociotécnico. Ao reconhecer que fatores como financiamento, interesses estratégicos e contextos históricos influenciam o que se pesquisa, como e com quais objetivos, os estudantes demonstram uma visão integrada da atividade científica.

Ainda que dialogue com aspectos da **Categoria 1** — como a rejeição da visão da ciência como uma entidade única, neutra e universal —, não há sobreposição entre ambas. A **Categoria 1** enfatiza a pluralidade epistêmica e histórica da ciência, destacando a diversidade de modos de produção e validação do conhecimento em diferentes culturas e períodos. Já a **Categoria 8** desloca a atenção para a estrutura interdependente que condiciona o fazer científico, enfocando como forças externas — políticas, econômicas, tecnológicas — moldam e são moldadas pela ciência. Enquanto a **Categoria 1** é predominantemente metaepistêmica, voltada à diversidade interna da ciência, a **Categoria 8** é sociotécnica e sistêmica, voltada às redes e interações externas. O que as aproxima é o rompimento com visões simplificadoras da ciência; o que as distingue é o eixo analítico que cada uma privilegia.

Foram identificadas apenas quatro *menções explícitas* associadas a essa categoria, das quais separamos dois exemplos representativos:

“Defino apadrinhamento como o papel assumido por uma entidade, organização ou indivíduo em prol do desempenho de financiar, apoiar ou promover a pesquisa científica [...] reconheci em minhas pesquisas três tipos de apadrinhamentos [...]” (Pedro – S8).

“Senti que foi um acréscimo à imagem geral que eu já tinha sobre o tema dos ‘raios’, da radiação de corpo negro e da mecânica quântica geral. Isso me faz pensar que uma disciplina da história da ciência deveria ser obrigatória nos cursos de física [...] sempre vai faltar peças para a formalização da física completa. [...] Gostei muito de ver como a ciência e o modelo que temos de mundo necessitam diretamente do desenvolvimento tecnológico. [...] podemos observar que nossa visão científica de mundo depende de uma rede complexa e embolada entre a ciência, a política e a economia [...]” (Ronaldo – S10).

O estudante **Pedro (S8)** demonstra uma compreensão em informada dos mecanismos institucionais e sociais que sustentam a produção científica. Mais do que reconhecer a influência de atores externos — como indivíduos e organizações — sobre a ciência, ele conceitua o "apadrinhamento" como uma estrutura complexa de apoio, financiamento e direcionamento da pesquisa. Já o estudante **Ronaldo (S10)** explicita, com clareza e profundidade, a interdependência entre ciência, política, economia e tecnologia, ao afirmar que a nossa visão científica de mundo emerge desse entrançado sociotécnico. Há, em ambos os comentários, um nítido reconhecimento da não-neutralidade da ciência e da forma como ela se articula com múltiplos domínios da vida social.

Categoria 9 – Desconstrução da Ideia de Neutralidade Científica

Esta categoria reúne reflexões em que os estudantes confrontam criticamente a ideia de que a ciência é uma prática objetiva, imparcial, autônoma, livre de valores socioculturais de influências externas. Ao longo dessas manifestações, evidencia-se uma aprendizagem significativa de natureza epistemológica, voltada para o questionamento dos pressupostos tradicionais que sustentam a visão clássica da ciência como neutra.

O foco central dessas falas não está apenas na identificação de fatores sociais ou históricos que acompanham a ciência, mas na problematização direta da noção de objetividade científica, reconhecendo que o conhecimento científico é atravessado por valores, interesses, escolhas subjetivas e condicionantes contextuais. A crítica parte de dentro da própria estrutura epistêmica da ciência, revelando que seus métodos, teorias e práticas são moldados por dinâmicas de poder, instituições, cenários políticos e valores socioculturais predominantes.

Importa sublinhar que essa categoria não equivale automaticamente às categorias que tratam da pluralidade de vozes (**Categoria 1**), da ética (**Categoria 5**) ou dos sistemas sociotécnicos (**Categoria 7**), ainda que dialogue com elas. Aqui, a desconstrução da neutralidade é o núcleo da aprendizagem do estudante, sendo frequentemente acompanhada de expressões como “a ciência não é neutra”, “há interesses por trás”, ou “a objetividade da ciência pode ser colocada em xeque”.

As manifestações agrupadas nesta categoria revelam uma visão mais bem informada da NdC, demonstrando que os estudantes compreendem o conhecimento científico como uma produção social situada, permeada por disputas, valores e limites. Isso representa um estágio avançado de letramento científico, pois desafia concepções estereotipadas da ciência e estimula uma postura mais reflexiva e engajada.

Foram identificadas nove *menções explícitas* associadas a essa categoria, das quais ressaltamos dois trechos como exemplos paradigmáticos:

“Torna-se necessário no meio acadêmico, principalmente em cursos de licenciatura destinados ao ensino de ciências, a inserção da discussão acerca da ‘natureza do conhecimento científico’ e sua relação com fatores ideológicos, políticos, econômicos e culturais” (Jorge - S7).

“Uma perspectiva que eu possuía antes da vigente disciplina e que se reforçou muito após o início dos trabalhos foi a noção de que a ciência não é neutra. Desde modo, vejo uma cadeia de fatores que influenciam no ‘fazer ciência’. Listo brevemente alguns deles: [...]” (Pedro – S8).

O estudante **Jorge (S7)** nomeia diretamente o debate sobre a *natureza do conhecimento científico* e liga esse conhecimento a múltiplos fatores de influência externa (ideológicos, políticos, econômicos e culturais). Ele demonstra clareza epistemológica, ao não apenas afirmar que "*a ciência não é neutra*", mas articular essa não neutralidade como uma *necessidade formativa* — ou seja, a crítica está inserida num contexto pedagógico e curricular. Por fim, ele posiciona-se de maneira ativa, reivindicando um espaço para o debate crítico da neutralidade científica no ambiente acadêmico.

Já o estudante **Pedro (S8)** apresenta indícios de aprendizagem significativa — o estudante mostra que já possuía uma intuição crítica e que esta foi "*fortemente consolidada*" com a disciplina. Ele usa a expressão "*cadeia de fatores que influenciam no fazer ciência*", o que indica uma visão sistêmica e relacional, bem alinhada à ideia de que a objetividade científica está imersa em contextos sociais. Ademais, o termo "*fazer ciência*" revela uma concepção processual e prática, uma imagem bem informada da NdC, que se opõe diretamente à visão idealizada da ciência como pura, neutra e objetiva

Ambos os trechos articulam com mais profundidade conceitual, reflexividade e posicionamento crítico os elementos centrais da Categoria 9. Eles não apenas mencionam que "*a ciência não é neutra*", mas exploram *por que* ela não é e *como* isso se manifesta na prática científica.

(g) *Influência na Formação Crítica*

A análise das *Memórias & Reflexões* revela um conjunto expressivo – embora não majoritário – de 25 menções explícitas e articuladas que defendem a centralidade do ensino de aspectos NdC (ou da disciplina História da Ciência) na formação docente. Esses estudantes afirmam não ver a disciplina apenas como um conteúdo acessório ou periférico, mas como um instrumento epistemológico essencial para qualificar “Educação para a Ciência” e promover, entre futuros professores de Física, uma postura crítica diante do ensino de ciências.

Essa dimensão evidencia os efeitos da abordagem contextual explícita da NdC sobre a maneira como os estudantes compreendem o papel do professor de Física, sua atuação didática e os desafios de ensinar temas historicamente densos e epistemologicamente complexos. Em outras palavras, não apenas aprenderam *sobre* ciência, mas refletiram sobre formas mais críticas

informadas e sensíveis de ensiná-la, considerando suas dimensões históricas, filosóficas e socioculturais.

Trata-se, portanto, de uma aprendizagem epistemológica didático-crítica, na qual a NdC é reconhecida como um recurso formativo indispensável para que os professores atuem como mediadores do saber científico e como agentes de resistência frente aos discursos simplistas e pseudocientíficos que ameaçam a integridade do ensino de ciências.

Os estudantes que integram essa dimensão categórica foram capazes de formular ideias-chave próprias, articulando a NdC à formação crítica do professor e ao enfrentamento ativo de distorções e simplificações indevidas da ciência. Suas reflexões revelam um esforço consistente de integrar teoria, epistemologia e prática docente, consolidando uma perspectiva de ensino que valoriza a complexidade do conhecimento científico e denuncia os riscos da desinformação.

As *menções explícitas* a essas questões, ainda que distribuídas de maneira pontual ao longo do semestre, concentram-se sobretudo nas semanas S1, S4, S7 e S12. Esses encontros abordaram, respectivamente: o uso pedagógico da História da Ciência (S1); as narrativas pseudo-históricas nos livros didáticos e imagens distorcidas sobre a NdC (S4); a crítica ao modelo hipotético-dedutivo de “metodologia científica” e os conceitos metacientíficos de “observação”, “neutralidade” e “objetividade” (S7); e, por fim, a análise do texto original de Hertz (1887) e os elementos de pseudo-história envolvendo a descoberta do efeito fotoelétrico nos livros didáticos do ensino superior, especialmente no que diz respeito à contribuição de Heinrich Hertz (S12).

Alguns exemplos paradigmáticos ilustram o potencial formativo da NdC – ou da disciplina História da Ciência – na constituição de uma prática docente crítica e epistemologicamente qualificada. Gabriel (S7) destaca sua função curricular e normativa, afirmando ser “*necessário no meio acadêmico a aplicação da inserção da discussão acerca da ‘natureza do conhecimento científico’ nos cursos de licenciatura*”, pois ela “*pode beneficiar o ensino e pode melhorar para o combate das pseudociências*”. Ao identificar o modelo “empírico-indutivista” como raiz da visão simplista da NdC, ele articula domínio conceitual e clareza sobre os efeitos formativos do ensino sobre aspectos da NdC. Já Marta (S1) adota uma abordagem postura interrogativa e filosófica. Questiona a persistência das visões distorcidas como a ideia de uma “ciência neutra, linear e cumulativa”, sugerindo que tais imagens não são apenas equívocos ingênuos, mas construtos ideológicos: “*talvez seja até interessante para a Ciência possuir essas visões distorcidas*”. Sua análise desloca o foco do enfrentamento direto às pseudociências para o exame das estruturas que as legitimam. Ao dizer que a História da

Ciência pode englobar tais questões e prepará-la para “*dar essa devolutiva aos meus alunos*”, ela parece entender as discussões e reflexões sobre a NdC como um espaço de formação crítica, com implicações diretas sobre sua prática docente futura:

"Como foi debatido em aula podemos observar de como a ideia da ciência simplista se enquadra em um pensamento da categoria empírico-indutivista e como é necessário no meio acadêmico a aplicação da inserção da discussão acerca da 'natureza do conhecimento científico' nos cursos de licenciatura destinados ao ensino de ciências. [...] Achei a aula muito interessante pois conseguimos identificar como a natureza das ciências pode beneficiar o ensino e pode melhorar para o combate das pseudociência" (Gabriel – S7).

"Na minha compreensão que tive do assunto que abordamos, parece que todo mundo aqui sabe que a Ciência tem inúmeras visões distorcidas, que volta-e-meia sempre ocorrerá a pseudo-história e a falsa história onde quer que olhemos na história ao longo do tempo, mas de novo eu insisto: por qual motivo? [...] talvez seja até interessante para a Ciência possuir essas visões distorcidas (principalmente a de ser neutra, linear e cumulativa). [...] Se de alguma forma a História da Ciência puder englobar esses meus questionamentos, eu sinto que vou estar mais preparada para analisar o mundo ao meu redor e poder dar essa devolutiva aos meus alunos" (Marta – S1).

Do mesmo modo, Júlia (S4) concebe a docência como prática crítica e vigilante, na qual o professor precisa desconfiar das “*narrativas prontas*” — até mesmo daquelas disfarçadas de neutralidade nos materiais didáticos. Ao expor elogios exagerados e distorções conceituais, revela uma postura epistemológica sensível, que entende o ensino como campo de disputa simbólica e resistência intelectual. Já Jorge (S7) denuncia o empobrecimento epistemológico da ciência no ensino e propõe o ensino da NdC como eixo de reconstrução formativa. Ao defender que professores devem “*contestar verdades científicas*”, desloca o papel docente da simples transmissão para uma insurgência pedagógica, na qual o compromisso maior é com o pensamento crítico e a desnaturalização dos dogmas:

"[...] como nós futuros professores devemos estar atentos para que o material didático usado seja analisado, em específico sobre história da ciência, pois os mesmos servem como base para as aulas ministradas e podem conter equívocos grosseiros que podem conduzir a propagação de fatos inverídicos.[...] fica explícito o posicionamento da pessoa, quanto a teoria que ela aceita e até mesmo a admiração que identificamos na 'puxação de saco', elogios exagerados, que por vezes estão implícitos também" (Júlia – S4):

"Existe uma ideia, simplista do que é ciência, quais são os seus objetivos e finalidades, fundamentada em um pensamento da categoria empírico-indutivista. Torna-se necessário no meio acadêmico, principalmente em cursos de licenciatura destinados ao ensino de ciências, a inserção da discussão acerca da 'natureza do conhecimento científico' e sua relação com fatores ideológicos, políticos, econômicos e culturais. [...] Entendo que a inserção de uma percepção contemporânea da ciência no ensino superior pode permitir a formação de futuros docentes que contestam a

existência de ‘verdades científicas’ e que estejam conscientes dos valores veiculados ao mundo científico” (Jorge - S7).

Em certos momentos, observam-se reflexões mais específicas, algumas voltadas à formação crítica e a prática docente. Nesses casos, os estudantes realçam **o papel da NdC como instrumento epistemológico para o exercício profissional crítico**, associando-a diretamente ao papel do professor, à sua formação crítica e à necessidade compreender os modos de produção do conhecimento científico. Essa concepção ultrapassa a valorização genérica da ciência, ao reconhecer que o ensino de ciências exige preparo epistemológico para lidar com os desafios contemporâneos — como a pseudociência, a pseudo-história e visões distorcidas do fazer científico ainda presentes no ambiente escolar.

A reflexão de Estevão (S4) expressa com clareza essa postura. Para ele, a docência deve ser investigativa e crítica, exigindo do professor a habilidade de identificar erros conceituais e distorções historiográficas. Ao discutir e problematizar pseudociências, anacronismos e falhas em textos acadêmicos, ele antecipa a NdC como eixo formador: o bom professor deve desconfiar, analisar e intervir, munido de critérios históricos e epistemológicos:

“Trabalhamos principalmente sobre erros em artigos e outras divulgações acadêmicas, [...] Depois entramos mais afundo em pseudociências e pseudo-história. [...] “Acabou reforçando a ideia de que nem todos os textos são ‘corretos’. [...] Alguns argumentos que só vieram depois são vistos como se fosse antes, sendo que algumas vezes o cientista não teve acesso a essa fonte pois ainda não existia. [...] Esses temas são extremamente pertinentes para a matéria e uma boa formação de um professor, já que um bom professor deve ser capaz de ver os erros conceituais e historiográficos relativos à sua matéria” (Estevão – S4).

Em outros momentos, também de reflexões mais específicas, surgem menções explícitas ao **enfrentamento da pseudociência, de equívocos conceituais e do reducionismo** presente na forma como a ciência é ensinada e percebida socioculturalmente. Essas manifestações sugerem uma compreensão de que a ausência de fundamentos epistemológicos na formação inicial favorece a reprodução de ideias equivocadas e fragiliza a autoridade epistêmica da ciência no espaço escolar. Nesse sentido, como exemplo, podemos observar que Suzana (S4) expressa preocupação com discursos escolares que mitificam a ciência e naturalizam erros conceituais, o que fomenta a pseudociência. Ao reivindicar o papel crítico da História da Ciência, ela defende uma prática docente comprometida com o rigor epistemológico e a superação de narrativas simplistas, demonstrando apropriação reflexiva da NdC como eixo formativo:

"Para mim, a resposta pode ser afirmativa, pois, utilizando-se de livros didáticos, por exemplo, pode-se notar que são pouquíssimos que apresentam uma teoria ou postulado muito bem desenvolvido, muitas vezes limitando-se a trazer determinada

ideia revolucionária surgida 'do zero' e concebida por um 'gênio incompreendido e diferenciado'. Tal narrativa se encontra presente em diversas fontes, o que acaba por banalizar certos erros que estimulam a propagação da pseudociência, principalmente na área das ciências." [...] "Talvez a resposta para isso possa se encontrar nos especialistas em História da Ciência, que passam a 'carregar' uma responsabilidade imensa e de extrema importância: analisar os fatos assim como eles são, sem banalizações ou distorções." [...] Contudo, posso dizer que esta disciplina se torna cada vez mais difícil, pois nos leva a perceber detalhes antes nunca 'levados a sério' mas que podem ter consequências imensuráveis quando não analisados e discutidos de forma correta." (Suzana – S4).

Por fim, identifica-se um terceiro enfoque específico, centrado na disciplina de **História da Ciência como ferramenta epistemológica**. Os estudantes reconhecem explicitamente seu valor pedagógico e formativo, não apenas como conteúdo histórico, mas como metodologia capaz de fomentar uma visão crítica sobre a atividade científica. Atribuem-lhe um papel estratégico na superação de visões dogmáticas, na compreensão da dinâmica real do processo de construção do conhecimento científico e na formação de professores com sensibilidade histórica, filosófica e epistemológica. A História da Ciência é valorizada não por seu caráter decorativo ou anedótico – como infelizmente ocorre muitas vezes – mas como espaço de análise de controvérsias, tensões, rupturas e reconstruções que marcam o avanço da ciência — elementos fundamentais para enfraquecer visões dogmáticas e pseudocientíficas.

Nesse contexto, Pedro (S7) demonstra uma postura crítica consolidada ao reconhecer os limites da visão empírico-indutivista da ciência, ainda predominante nos materiais didáticos. Ao destacar as categorias propostas por Daniel Gil-Pérez e colaboradores (2001) como ferramenta analítica para identificar imagens distorcidas do trabalho científico, ele transforma a disciplina História das Ciências 2023-1 – articulada à anterior, Metodologia e Prática de Ensino IV – em recurso formativo essencial para qualificar a prática docente e enfrentar visões estereotipadas da atividade científica.

“Considero válido mencionar que frequentemente percebo (o agora ficou mais claro) a distorção da concepção empírico-indutivista e ateórica da ciência, que enfatiza o papel neutro da observação e experimentação, desconsiderando o papel fundamental das hipóteses e teorias na orientação da investigação científica. [...] As 7 categorias presentes na obra Daniel Gil Perez e colaboradores (2001), [...] foram ótimas classificações a se analisar do ponto de vista da História das Ciências nos materiais didáticos e afins” (Pedro – S7).

Esses resultados qualitativos reforçam de forma consistente os dados quantitativos obtidos no *Questionário de Avaliação Geral* sobre a influência da disciplina para formação docente, no qual 64% dos estudantes a avaliaram como “*Muito Satisfatória*” e 36% como “*Satisfatória*”.

Esse tipo de registro de *Memórias & Reflexões* ganha relevância especial no contexto da formação inicial de professores, muitas vezes caracterizada por currículos fragmentados e práticas pedagógicas excessivamente tecnicistas, que deixam pouco espaço para discussões epistemológicas sobre o que é ciência, como ela funciona e por que deve ser ensinada. Essa última subseção, portanto, permite dar visibilidade a essas vozes dissonantes, que escapam ao escopo tradicional da formação e, ao fazê-lo, revelam o potencial da NdC como instrumento de autorreflexão pedagógica e transformação crítica da prática docente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo está inserido na conjuntura atual de desafios da educação científica contemporânea, os quais exigem o desenvolvimento não apenas de um saber *de* ou *em* ciências (conhecimento teórico, conceitual e procedimental), mas também uma compreensão mais precisa e bem informada *sobre* diversos aspectos da chamada Natureza da Ciência (NdC), especialmente no contexto de formação de professores de física.

Ao longo desta tese de doutorado, examinamos as contribuições de uma proposta de ensino baseada em uma abordagem contextual explícita acerca do processo não linear de construção do conhecimento científico do efeito fotoelétrico no início do século XX. Utilizamos como referência teórico-metodológica a visão consensual sobre a Natureza da Ciência (NdC), explorando e problematizando seus respectivos princípios heurísticos representativos, bem como as principais visões distorcidas sobre a trabalho científico. E, como referencial de ensino, adotou-se a TAS proposta por Ausubel (2003).

A motivação inicial deste estudo surgiu a partir da análise de revisões bibliográficas, nas quais observou-se a escassez de trabalhos na literatura brasileira em ensino de ciências – com exceção de Rodrigues (2021) – que investiguem modificações nas concepções de NdC dos estudantes por meio de uma abordagem explicitamente contextualizada na história da explicação, validação e aceitação da teoria quântica da radiação proposta por Albert Einstein, com ênfase no fenômeno das emissões fotoelétricas.

Uma vez que outros recursos didáticos são comumente empregados para o ensino do efeito fotoelétrico (e.g. simulação computacional e aparatos experimentais), inferimos que a ausência, até o presente momento, de trabalhos abrangentes sobre a história não linear do efeito fotoelétrico, no período entre 1887 e 1927, em língua portuguesa brasileira, possa ter dificultado algumas iniciativas de pesquisas nesse sentido. Portanto, o recorte histórico adotado assegura a originalidade desta tese de doutorado

Na primeira etapa desta investigação, foi conduzida uma pesquisa historiográfica sobre gênese e desenvolvimento do conhecimento científico a respeito do fenômeno do efeito fotoelétrico, desde sua primeira observação (em 1887) até a aceitação geral da teoria quântica da radiação (por volta de 1927). A partir da leitura e análise documental de fontes primárias e secundárias, buscamos colaborar para a redução do problema da escassez de materiais históricos acessíveis em língua portuguesa no ensino de física.

Assim, foi construída uma narrativa histórica com ênfase na influência dos contextos histórico, sociocultural, político, econômico e científico-tecnológico para o desenrolar dos

eventos. Essa narrativa estruturada em sete episódios históricos, é, portanto, um recurso didático de caráter histórico que agora poderá ser utilizado por outros professores e pesquisadores. Esse material não apenas apoia abordagens investigativas sobre temas e questões relacionadas ao ensino de aspectos da NdC, mas também facilita discussões sobre os fundamentos teóricos, conceituais e procedimentais do desenvolvimento inicial da teoria quântica da radiação no início do século XX. Adicionalmente, as informações apresentadas viabilizam a identificação e a problematização as narrativas pseudo-históricas sobre o efeito fotoelétrico presentes em livros didáticos, contribuindo para a desconstrução de mitos, omissões e distorções históricas que visam, acima de tudo, transmitir uma visão estereotipada do processo de construção do conhecimento científico.

As narrativas pseudo-históricas comumente encontrada nos livros didáticos de física nem sempre reflete com precisão os eventos históricos em todas as suas complexidades e nuances. Conforme aponta Franklin (2016), em seu trabalho intitulado “Livros de Física Nem Sempre Dizem a Verdade”, isso pode não ser uma coisa necessariamente ruim do ponto de vista pedagógico, desde que os professores estejam atentos e cientes dessas discrepâncias. A exploração e problematização integrada, contextualizada e explícita de narrativas pseudo-históricas pode ajudar a explicar conceitos científicos e metacientíficos aos estudantes, levando-os a compreenderem que o processo de construção do conhecimento científico não é de forma alguma uma sequência linear e ininterrupta de etapas bem sucedidas.

Com efeito, deseja-se ressaltar a importância de uma melhor compreensão das bases filosóficas que sustentam os debates científicos de uma determinada época, a fim de alcançar um entendimento mais profundo do processo de construção do conhecimento científico. A análise das diversas visões acerca do papel da experimentação, das hipóteses, dos modelos científicos, das analogias e da matemática, especialmente no contexto científico-tecnológico britânico/norte-americano e alemão do início do século XX, contribuiu significativamente para uma visão mais refinada dos esforços empreendidos pelos cientistas daquele período nas investigações sobre a natureza da luz e da matéria. Além disso, foi possível observar a influência de diferentes perspectivas teórico-metodológicas e filosóficas ao longo do complexo processo de aceitação da teoria quântica da radiação.

Ainda sobre a pesquisa historiográfica (cf. Capítulo 2), consideramos que as informações discutidas nos sete episódios históricos suficientes e adequadas para explorar e problematizar todos os nove princípios heurísticos representativos da visão consensual da NdC selecionados pelos autores, incluindo discussões e reflexões sobre questões políticas, éticas e morais. Informamos que outros textos de caráter histórico foram produzidos ao longo desse

período de investigação, ainda que eles não tenham sido incorporados nesta tese. Destaca-se, no contexto de análise das tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico, em Suttini, Caluzi e Errobidart (2025) o ensaio histórico sobre a “*hipótese h*” proposta por Sommerfeld-Debye. Neste momento, aguardamos a avaliação do ensaio sobre a “*teoria da ação fotoelétrica*” formulada pelo físico britânico Owen W. Richardson. Ademais, estamos em fase de organização do livro “*Ensaio Históricos: o efeito fotoelétrico*”, no qual reuniremos todos os resultados de nossa pesquisa historiográfica.

A avaliação acerca das contribuições de nossa proposta de ensino foi realizada com base em um conjunto de informações obtidas durante a organização e implementação da disciplina História da Ciência 2023-1, em um curso de graduação em Física (licenciatura e bacharelado).

No que diz respeito à coleta e análise das concepções prévias dos estudantes sobre a NdC, empregamos o instrumento denominado “*Questionário VOSE-RCN*”, abordando nove aspectos sobre a NdC, na perspectiva da visão consensual da NdC, são interpretados como princípios heurísticos representativos da sobre o processo de construção do conhecimento. Trata-se de um longo questionário fechado, com respostas itens tipo-Likert de cinco pontos, resultante de contínuas reformulações, discussões e críticas ao “*Questionário VOSE*”, proposto inicialmente por Chen (2006). Para analisar as concepções posteriores dos estudantes sobre a NdC, foi empregado o “*Questionário VOSE-EF*”, similar ao anterior, porém com suas perguntas e itens contextualizados com informações sobre a história do efeito fotoelétrico.

O tratamento dos dados mostra que as informações coletadas por meio desses dois questionários possibilitaram a análise comparativa das concepções prévias e posteriores dos estudantes sobre os nove aspectos da NdC pré-estabelecidos. Nesse sentido, os dois instrumentos mostraram-se viáveis para avaliar a possível influência das estratégias didáticas adotadas na disciplina com vistas à aprendizagem significativa de conceitos metacientíficos, isto é, ao desenvolvimento de uma compreensão mais precisa e bem informada sobre a NdC.

Embora a pesquisa na área de ensino de ciências tenha destacado que professores de disciplinas científicas, tanto em formação inicial quanto em prática efetiva, frequentemente possuem concepções distorcidas, estereotipadas e simplificadas sobre o trabalho científico, nossos resultados indicam que a ampla maioria das concepções epistemológicas prévias dos estudantes estava alinhada com os princípios defendidos pela visão consensual da NdC. Em outras palavras, observou-se que os estudantes já dispunham de subsunçores relevantes e relativamente elaborados, o que favoreceu a ancoragem de novos conhecimentos e possibilitou a ocorrência de uma aprendizagem significativa, no sentido ausubeliano, por meio da

diferenciação progressiva e da *reconciliação integrativa* entre suas ideias prévias e os novos conteúdos abordados.

Segundo os relatos dos próprios estudantes, esse resultado favorável parece ser, em grande medida, atribuído às discussões e reflexões realizadas durante a disciplina de “Metodologia e Prática de Ensino IV”, ministrada no semestre anterior à pesquisa, que enfatizou a importância da abordagem de aspectos históricos, filosóficos e sociológicos no ensino de ciências.

No entanto, como ressalva, vale a pena destacar que, em alguns momentos específicos, identificou-se indícios de uma visão experimentalista crédula e de uma perspectiva falsificacionista ingênua, que está articulada à “*visão empírico-indutivista e a-teórica*” e, sobretudo, à “*visão rígida, algorítmica e infalível*” do trabalho científico. Isso sugere que, nestas situações, os estudantes equivocadamente acreditam que a resolução de controvérsias científicas se baseia unicamente na disponibilidade de observações empíricas conclusivas e irrefutáveis, as quais, por si só, demonstrariam a veracidade absoluta de uma das teorias concorrentes. Tais indícios revelam a presença de alguns subsunçores mal estruturados ou conceitualmente limitados, que dificultam a integração significativa de novos conhecimentos.

No que se refere ao aspecto da NdC “*Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas*”, nossos resultados confirmam achados de estudos anteriores no ensino de ciências, evidenciando que os estudantes possuem alguma familiaridade com a ideia de que a ciência é influenciada por contextos históricos, sociais e culturais. No entanto, essa compreensão ainda é parcial e pouco articulada, refletindo um entendimento fragmentado dessa dimensão. De modo geral, os estudantes reconhecem que a ciência está entrelaçada com a vida cotidiana e é moldada por valores socioculturais e relações de poder dentro de um sistema complexo e interdependente. Contudo, a análise das medianas das respostas após a intervenção didática revela que muitos ainda permanecem no nível “*parcialmente informados*”. Embora aceitem a que a ciência é influenciada socialmente, tendem a restringir essa influência a usos práticos ou manipulações políticas, sem reconhecer que todo o processo científico — desde a formulação dos problemas até a análise dos dados — está permeado por contextos históricos, sociais e valores culturais.

Por outro lado, os dados qualitativos, especialmente extraídos das *Memórias & Reflexões*, evidenciam um avanço significativo: muitos estudantes ultrapassam essas noções superficiais e passam a valorizar a ciência como uma prática pluralista, situada historicamente e imersa em redes complexas que envolvem aspectos culturais, políticos, econômicos e tecnológicos. As reflexões demonstram um reconhecimento crescente da ciência como um

sistema sociotécnico, que tanto é influenciado pelo seu contexto social mais amplo quanto exerce influência sobre ele. Essas trajetórias de aprendizagem indicam uma ruptura emergente com concepções ingênuas e idealizadas de “*neutralidade científica*”, avançando para um entendimento mais sofisticado, crítico e epistemicamente pluralista da interdependência dinâmica entre ciência e sociedade. Esses avanços, ainda que parciais, reforçam a possibilidade de uma mudança indispensável no ensino de ciências, que promova perspectivas sistêmicas e contextualizadas, evidenciando como a ciência funciona dentro e em resposta a uma teia inter-relacionada de forças sociais, políticas, econômicas e tecnológicas, e não como uma atividade isolada e objetiva.

Em relação ao aspecto da NdC “*Sobre a Natureza do Conhecimento Científico*”, a análise dos dados sugere avanços relevantes nas concepções epistemológicas dos estudantes, ainda que marcados por nuances e contradições. Assemelhando-se aos achados de Teixeira (2003), observou-se que a maioria dos estudantes reconhece, de forma bem ou parcialmente informada, que leis e teorias científicas são provisórias e sujeitas a revisões ou substituições, o que está alinhado com a perspectiva contemporânea da epistemologia da ciência, que valoriza a falibilidade e historicidade do conhecimento científico. No entanto, tal reconhecimento não se distribui de maneira homogênea: a comparação entre respostas relativas à “lei da inércia” (1ª lei de Newton) e à “lei do efeito fotoelétrico” indica maior abertura à mudança no segundo caso, sugerindo uma influência favorável da intervenção didática. Contudo, persiste, entre parte dos estudantes, uma *visão empírico-indutivista e ateórica*, centrada quase exclusivamente na acumulação de evidências empíricas como critério de validação, o que reforça tanto a absolutização acrítica de certas leis clássicas quanto um relativismo excessivo frente à “verdade científica”. Essa coexistência de concepções bem informadas e distorcidas pode ser interpretada, à luz da TAS, como indicativa de um processo de *reconciliação integrativa* entre significados novos e estruturas cognitivas prévias ainda não completamente integrados. A presença de ideias como rupturas paradigmáticas, transformações graduais e critérios teóricos de avaliação aponta para indícios promissores de mudança conceitual, mas também evidencia a necessidade de continuidade no trabalho pedagógico. Assim, reafirma-se a importância de outras intervenções educativas historicamente contextualizadas, capazes de problematizar visões ingênuas e estereotipadas — tanto dogmáticas quanto céticas — e promover a construção de compreensões mais amplas, críticas e epistemologicamente informadas sobre a natureza contingente, dinâmica e evolutiva da ciência.

No que se refere ao aspecto da NdC “*Sobre a Natureza das Observações Experimentais*”, os dados obtidos indicam que as concepções iniciais e finais dos estudantes

permaneceram relativamente próximas dos posicionamentos epistemológicos defendidos pelos estudos contemporâneos da HFSC, evidenciando, de maneira geral, uma compreensão “*parcialmente informada*” da subjetividade nas observações científicas. Ainda que não se tenham verificado mudanças significativas nas medianas de resposta em quase todos os itens avaliados, destaca-se um movimento conceitual importante no que diz respeito à rejeição da ideia de que os relatos das observações devam ser necessariamente idênticas. Tal recusa foi particularmente evidente perante a concepções que sustentam que “*as observações experimentais são exatamente aquilo que vemos e nada mais*” ou que consistem numa “*reprodução objetiva e exata do mundo exterior*”, isenta de interpretações divergentes. Essa mudança pontual sugere um início de amadurecimento da percepção dos estudantes sobre o carácter teórico-mediado, contextual e potencialmente subjetivo das práticas observacionais em ciência, rompendo, ao menos parcialmente, com visões empiristas centradas na neutralidade do observador. Sob a perspectiva da TAS (Ausubel, 2003), esse processo aponta para uma construção gradual de estruturas cognitivas mais integradas, nas quais o novo conhecimento se conecta de forma significativa às concepções anteriores, sem que estas sejam simplesmente descartadas ou substituídas.

Em relação ao aspecto da NdC “*Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias*”, as respostas aos questionários VOSE-RCN e VOSE-EF revelam que os estudantes possuem uma compreensão *bem informada* sobre o papel indispensável desses elementos na inovação científica e na construção do conhecimento. A maioria reconhece sua importância tanto para físicos teóricos quanto para experimentais, afastando-se da visão ultrapassada da ciência como um processo puramente empírico e mecânico. Isso está alinhado ao referencial teórico que enfatiza que o conhecimento científico como um processo dinâmico e criativo, no qual o engajamento cognitivo e as conexões significativas entre conhecimentos novos e prévios são cruciais (Lederman *et al.*, 2002; Koyré, 1982). A análise das *Memórias & Reflexões* dos estudantes, como as do Tiago, Lara e Jorge, confirmam que eles entendem que a imaginação e o raciocínio por analogia como ferramentas cognitivas centrais para inovar e compreender, e não apenas recursos didáticos. Percebem que a ciência usa modelos e analogias para explicar fenômenos não observáveis diretamente. Isso reforça o afastamento da visão simplista e puramente empírica da ciência, reconhecendo seu carácter interpretativo e criativo. De acordo com a TAS (Ausubel, 2003), os resultados indicam que os estudantes já integram esses aspectos ao seu conhecimento prévio, especialmente na física teórica. Contudo, a compreensão da física experimental ainda é mais limitada. Isso indica a possibilidade de estratégias pedagógicas que

promovam conexões mais profundas entre os aspectos criativos e técnicos da física experimental, ampliando a compreensão científica de forma mais abrangente.

No que tange ao aspecto da Natureza da Ciência (NdC) “*Sobre a Metodologia Científica*”, nossos resultados indicam uma clara falta de definição epistemológica e conceitual entre os estudantes acerca da diversidade metodológica no fazer científico. Essa indefinição manifesta-se sobretudo na tendência de muitos estudantes em associar o método científico a uma sequência única, linear, rígida e universal de etapas, como se houvesse um único “caminho certo” para produzir conhecimento científico. Tal visão simplificada e restritiva não reflete a complexidade do trabalho científico real, que envolve múltiplas abordagens e estratégias adaptadas ao contexto e aos objetivos da investigação. Essa realidade ficou evidente na análise dos dados quantitativos, em que algumas situações os valores da mediana inicial (Md(i)) foram muito próximos ou iguais ao índice de referência (S) (itens 8aA, 8aE e 8aF), indicando alinhamento com a visão tradicional. Em outros casos, a distribuição percentual apontou para uma divisão quase equilibrada de opiniões (itens 8aB, 8aC e 8aD), revelando a coexistência de concepções variadas. Por fim, houve itens nos quais a mediana inicial divergiu significativamente do índice especialista (item 8aG), demonstrando discordância crítica dos estudantes. Apesar dessa pluralidade e dessas lacunas iniciais, a comparação entre as duas coletas revelou uma leve, porém consistente, evolução em direção a concepções mais informadas, que reconhecem a pluralidade e a dinâmica das metodologias científicas. Essa mudança positiva foi especialmente perceptível em três dos cinco itens originalmente classificados como “*concepções distorcidas*” ou “*divergência equilibrada*”, sinalizando um avanço na compreensão dos estudantes sobre a natureza plural e flexível do método científico.

Os dados qualitativos extraídos das *Memórias & Reflexões* corroboram e aprofundam os achados quantitativos, revelando nuances importantes sobre as concepções dos estudantes. A diversidade de perspectivas fica clara, com casos que confirmam a persistência de visões rígidas e lineares, como observado nos relatos dos estudantes Marta e Tiago, cujas reflexões evidenciam uma compreensão normativa e pouco crítica do método científico, alinhada às concepções inicialmente classificadas como “*distorcidas*”. Em contrapartida, há relatos que demonstram um entendimento mais sofisticado e reflexivo, como nos casos de Amanda, Helena e Jorge, que já captaram a pluralidade metodológica e o caráter dinâmico da ciência, refletindo a mudança positiva detectada na análise quantitativa. Além disso, essas reflexões qualitativas enriquecem a compreensão do fenômeno ao revelar aspectos pouco perceptíveis nos dados numéricos, como a valorização da criatividade e da imaginação no processo científico (destacada por Amanda), e a resistência expressa por alguns estudantes em aceitar a

subjetividade e a historicidade da ciência (exemplificada por Marta). A análise detalhada dessas posições individuais mostra a complexidade da “falta de clareza epistemológica” mencionada anteriormente, expondo o contraste entre visões normativas tradicionais e abordagens mais críticas e contextualizadas. Importante destacar que a manutenção de concepções rígidas mesmo após as discussões em sala reforça que a mudança conceitual na compreensão da metodologia científica é um processo lento, gradual e parcial, que demanda estratégias pedagógicas específicas para aprofundar o entendimento crítico dos estudantes sobre a natureza plural, criativa e socialmente construída do conhecimento científico.

A análise dos dados, à luz da TAS (Ausubel, 2003), evidencia que a mudança conceitual observada entre os estudantes depende da integração ativa dos novos conhecimentos às estruturas cognitivas preexistentes. A persistência de concepções rígidas não invalida os avanços substanciais já alcançados, mas evidencia a complexidade intrínseca ao processo de reorganização dos subsunçores prévios diante de temas epistemologicamente denso, muitas vezes baseados em concepções tradicionais e simples sobre o método científico, com raízes profundas. Portanto, é necessário reconhecer que, para alguns estudantes, a aprendizagem significativa não ocorreu plenamente, revelando resistência à reestruturação cognitiva. Esse fenômeno não desmerece o impacto da mediação pedagógica, mas ressalta que o processo de internalização crítica demanda tempo, engajamento contínuo e estratégias pedagógicas diversificadas. O avanço para compreensões mais sofisticadas e pluralistas confirma o dinamismo da aprendizagem significativa, que só se consolida mediante reflexão crítica e contínua reorganização das estruturas cognitivas.

No que concerne ao aspecto da NdC “*Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico*”, os resultados indicam que, diante da tarefa de avaliar os diferentes critérios utilizados por cientistas na escolha entre teorias concorrentes, as concepções prévias dos estudantes apresentaram distribuição equilibrada entre as categorias “*distorcida*” e “*bem informada*”, sem ocorrência de concepções “*parcialmente informadas*”. Em relação às concepções posteriores, observou-se uma aproximação expressiva entre os valores da mediana final [$Md(f)$] e o índice de referência especialista (S), com sete dos oito itens sendo classificados como compreensão “*bem informada*” da NdC. Apenas um item manteve-se como “*compreensão distorcida*”. Tais resultados evidenciam um avanço relevante na compreensão dos estudantes sobre a multiplicidade de critérios que orientam a validação e a aceitação de teorias científicas, indo além de uma visão simplificada ou dogmática da ciência. Esse avanço também se manifesta qualitativamente nas *Memórias & Reflexões*, sobretudo nas 15 menções explícitas à rede histórica de reformulações motivadas por lacunas conceituais (Categoria 5).

As reflexões dos estudantes Maria, Lara e Gabriel demonstram que eles passaram a reconhecer a falibilidade e a natureza reconstrutiva do conhecimento científico, percebendo as lacunas epistêmicas, as tensões conceituais e as limitações explicativas como elementos centrais no processo de validação e reformulação teórica. As evidências qualitativas, sob a ótica da TAS (Ausubel, 2003), sugerem que houve uma clara ancoragem de novos significados em estruturas cognitivas prévias relevantes (*subsunçores*), resultando em uma *diferenciação progressiva* e uma *reconciliação integrativa* de conceitos relacionados à prática científica. Em vez de simples memorização ou mudança superficial, observa-se uma aprendizagem significativa genuína, na qual os novos conhecimentos foram incorporados de forma substantiva e não arbitrária, promovendo uma reorganização estrutural do pensamento dos estudantes sobre como o conhecimento científico é construído, avaliado e validado ao longo do tempo.

Quanto ao aspecto da NdC “*Sobre Leis e Teorias Científicas*”, nossos resultados, de maneira geral, diferem de outros encontrados na literatura de pesquisa em ensino de ciências, os quais têm relatado obstáculos e dificuldades em relação à aprendizagem desse aspecto da NdC na formação inicial de professores de disciplinas científicas. Observou-se que as concepções prévias dos estudantes foram classificadas como “*bem informadas*”, “*parcialmente informadas*” ou constatou-se uma “*divergência equilibrada*” de opiniões. Entretanto, ao término da disciplina de História da Ciência 2023-1, foi observado que, em todos os itens declarativos avaliados sobre esse tema, os valores da mediana final ($Md(f)$) se aproximaram ou igualaram aos valores do índice referência especialista (S). Essa evolução pode ser atribuída à implementação de uma abordagem contextual explícita, fundamentada na TAS (Ausubel, 2003), permitindo que os estudantes relacionem conceitos metacientíficos complexos a seus conhecimentos prévios, favorecendo uma aprendizagem mais profunda e estruturada.

Por fim, no que se refere ao aspecto da NdC “*Sobre a Natureza dos Modelos Científicos*”, a análise das concepções dos estudantes sobre o papel epistêmico das analogias, modelos e representações na ciência revelou um reconhecimento generalizado de que o conhecimento científico opera por meio de construções indiretas da realidade, mediadas por linguagens, símbolos, imagens e estruturas teóricas. Os dados dos questionários VOSE-EF (Quadro 17 e Figura 39) evidenciam que, embora todas as respostas tenham sido classificadas como “*parcialmente informadas*”, houve forte adesão às concepções mais bem informadas sobre a função representacional dos modelos científicos, sobretudo nos itens que enfatizam a impossibilidade de representar a realidade de forma autêntica e o papel ativo da criatividade e da imaginação na construção dos modelos científicos. Esse entendimento foi reforçado nas *Memórias & Reflexões* escritas durante a sétima semana, em que 12 menções explícitas à

natureza representacional da ciência foram identificadas. Os estudantes Tiago, Lara e Jorge demonstraram compreender que os modelos científicos não são cópias fiéis da realidade, mas construções interpretativas, permeadas por analogias, hipóteses e elementos criativos. Eles ressaltaram o papel da imaginação na formação de imagens mentais e na construção de inferências sobre fenômenos não diretamente observáveis, reconhecendo a função operatória dos modelos tanto na explicação quanto na previsão científica. Esse conjunto de evidências sugere que a abordagem contextual explícita favoreceu a aprendizagem significativa sobre a função epistêmica dos modelos, aproximando os estudantes de uma visão contemporânea da ciência como atividade modeladora, representacional e criativa.

As respostas ao *Questionário de Avaliação Geral* e das *Memórias & Reflexões* revelaram limites e potencialidades da organização e implementação da disciplina de História da Ciência 2023-1 para formação de futuros professores de física. A análise da “*Participação Discente*”, apontou uma discrepância entre a percepção dos estudantes e os dados objetivos. Enquanto poucos se autoavaliaram como “*participação insatisfatória*”, a entrega das atividades foi irregular, com muitos estudantes ausentes em várias semanas, especialmente entre S8 e S12, período de maior sobrecarga acadêmica e provas. Relatos apontam fadiga e queda na frequência, indicando impacto da carga horária concentrada e da organização das aulas em um único dia. Alguns estudantes mantiveram participação ativa, enquanto outros demonstraram desengajamento progressivo, com reflexões cada vez mais superficiais. Críticas pontuais sobre a duração das aulas sugerem necessidade de ajustes, como intervalos maiores e divisão da carga horária em dias distintos. Por outro lado, o ambiente de debate e reflexão foi valorizado, estimulando o pensamento crítico. Contudo, muitas *Memórias & Reflexões* focaram no conteúdo, sem reconhecer explicitamente a própria participação nas dinâmicas. Isso evidencia diferentes formas de engajamento: cognitivo e comunicativo, com o primeiro mais presente nas reflexões escritas. Portanto, a participação discente e, conseqüentemente, a predisposição ativa (no sentido ausubeliano), parece demandar uma compreensão em suas múltiplas dimensões, indo além da mera presença e entrega de atividades.

As análises sobre a “*Qualidade dos Textos*” selecionados mostram uma percepção majoritariamente positiva dos estudantes, confirmada pelos dados do questionário (92% avaliações “*satisfatórias*” ou “*muito satisfatórias*”) e pelas manifestações espontâneas nas *Memórias & Reflexões*. Apesar de pouco frequentes (13 menções até a semana S12), indicam três tendências principais. Primeiro, há reconhecimento da utilidade prática dos textos para a formação crítica, especialmente na análise da escrita historiográfica ou leitura cuidadosa da ciência. Exemplos são Pedro (S4) e Tiago (S4), que consideram o texto de Martins (2001) um

“guia” para escrita precisa e analítica. Segundo, avaliações mais profundas surgem quando os textos são acompanhados por atividades problematizadoras, como questionários e discussões em sala, conforme relatos de Lídia (S4), Luiz (S4) e Gustavo (S12). Por fim, há equilíbrio entre elogios e críticas à estrutura dos textos, como a valorização da organização e clareza do artigo de Martins (2001), mesmo com sua complexidade. Em resumo, os estudantes não analisam tecnicamente os textos, mas valorizam sua relevância formativa, especialmente com mediação didática que estimula reflexão crítica. O papel mediador do professor é, portanto, essencial na seleção e na criação de situações que potencializam a leitura ativa e significativa.

A dimensão “*Volume e Prazos das Atividades*” concentrou as avaliações mais críticas do curso, com 13 estudantes indicando insatisfação. O acúmulo de tarefas e os prazos curtos geraram estresse, desmotivação e queda na qualidade das entregas, especialmente nas últimas semanas. Os relatos de E1, E9 e E21 reforçam o impacto negativo dessa sobrecarga sobre o engajamento e o bem-estar dos estudantes. A análise das *Memórias & Reflexões* corrobora essa percepção: ainda que até a semana S10 a preocupação com prazos tenha sido pontual (Maria, S4), houve um aumento notável nas queixas a partir da S12, associadas ao cansaço e à dificuldade de foco (Amanda, Lara, Suzana, Gustavo). Esses dados indicam que a sobrecarga foi particularmente sentida no fim do semestre, comprometendo a aprendizagem significativa (Ausubel, 2003). Ajustes no cronograma, com prazos mais flexíveis e atividades estratégicas, são essenciais para garantir engajamento, saúde mental e uma aprendizagem mais profunda e bem integrada.

A “*Condução das Discussões e Reflexões*” pelos professores-pesquisadores foi amplamente reconhecida como um dos principais méritos da disciplina. No *Questionário de Avaliação Geral*, 21 dos 22 estudantes atribuíram avaliações “*Satisfatória*” ou “*Muito Satisfatória*” a esse aspecto, sinalizando que a abordagem dialógica e participativa adotada favoreceu o engajamento crítico e a construção de sentidos. Essa valorização está em consonância com o princípio da *reconciliação integrativa* (Ausubel, 2003), pois contribuiu para articular saberes prévios e novos significados. Estudantes enfatizaram o papel das leituras, apresentações e debates na promoção de reflexões mais profundas sobre a natureza da ciência.

A análise das *Memórias & Reflexões* revelou consenso sobre a relevância da condução das discussões em sala: todos os estudantes, em diferentes momentos, abordaram esse aspecto, totalizando 50 menções explícitas e 20 implícitas. Os registros demonstram reconhecimento qualitativo das estratégias adotadas, sobretudo na construção de um ambiente plural, democrático e acolhedor. Muitos destacaram que as discussões permitiram a expressão de múltiplas perspectivas, a escuta respeitosa e a valorização da colaboração. Também foi

recorrente a associação entre momentos de debate e maior engajamento discente — ao passo que a ausência desses momentos, como relatado por Maria, foi alvo de crítica. A abordagem dos professores estimulou o pensamento crítico por meio de provocações conceituais, ausência de respostas fechadas e incentivo à confrontação de ideias prévias, como apontam Pedro, Suzana e Estevão. Tais dinâmicas favoreceram não apenas a aprendizagem de conteúdos científicos e metacientíficos, mas também o desenvolvimento da autonomia intelectual. Apesar da avaliação majoritariamente positiva, surgiram sugestões pontuais: maior clareza nos objetivos das atividades, melhor gestão do tempo de fala dos discentes e retorno mais consistente por meio de feedbacks formativos. Essas observações não comprometem a avaliação geral, mas indicam possibilidades de aprimoramento. Em síntese, a atuação docente foi central para o desenvolvimento das aprendizagens significativas, ao criar um ambiente aberto ao pensamento crítico e à participação ativa dos estudantes no processo formativo.

A avaliação da “*Estrutura e Sequência Lógica*” da disciplina foi majoritariamente positiva, refletindo o reconhecimento explícito e implícito dos estudantes sobre a organização coerente e intencional do curso. Dos 22 estudantes, 20 classificaram-na como “*Muito Satisfatória*” (8) ou “*Satisfatória*” (12), enquanto apenas dois a consideraram “*Insatisfatória*”. Essa percepção positiva está diretamente ligada aos princípios da *diferenciação progressiva* e *reconciliação integrativa* de Ausubel (2003), evidenciada pelo avanço gradual dos conteúdos do geral ao específico. Já a análise das *Memórias & Reflexões* revelam duas categorias interpretativas principais que sustentam essa avaliação: primeiro, o reconhecimento da progressão histórica e temática, que permitiu aos estudantes compreender a evolução das ideias científicas dentro do contexto histórico da Física do século XIX, destacando, por exemplo, a cronologia do efeito fotoelétrico e do eletromagnetismo; segundo, a percepção da coerência e continuidade entre os tópicos, que foram apresentados como partes interligadas de um processo evolutivo do conhecimento científico, facilitando a integração conceitual e epistemológica. Embora a “*Estrutura e Sequência*” tenha sido amplamente elogiada, algumas críticas pontuais indicaram a limitação temática devido ao foco aprofundado no efeito fotoelétrico, sugerindo a inclusão de outros fenômenos para ampliar a abrangência histórica. Também foi apontada a necessidade de maior articulação curricular para evitar redundâncias, sem comprometer a revisão de conceitos fundamentais para a construção dos subsunçores cognitivos. Em suma, a disciplina apresentou planejamento e organização pedagógica alinhados à promoção de uma aprendizagem significativa e integrada.

Finalmente, a análise da categoria interpretativa “*Influência [da Disciplina] na Formação Crítica*” revelou que, embora não majoritária, uma parcela expressiva dos estudantes

manifestou, de forma clara e articulada, a valorização da História da Ciência e dos aspectos da NdC como instrumentos formativos essenciais. Para esses futuros professores, tais elementos não são meros complementos curriculares, mas fundamentos epistemológicos que qualificam o ensino de ciências e o papel docente. As reflexões expressam uma aprendizagem didático-epistemológica crítica, em que a NdC é mobilizada como ferramenta para enfrentar distorções conceituais, pseudociências e narrativas dogmáticas. Os estudantes demonstraram capacidade de integrar teoria, epistemologia e prática, formulando ideias próprias que reconhecem a complexidade e historicidade da ciência.

As contribuições mais densas emergiram em momentos específicos do semestre, especialmente nas semanas em que se discutiram distorções em livros didáticos, a crítica ao modelo hipotético-dedutivo e o papel da História da Ciência na formação docente. Destacam-se, ainda, três subenfoques: (1) a NdC como eixo crítico da formação docente; (2) a denúncia de visões reducionistas e equívocos conceituais como desafio escolar contemporâneo; e (3) a valorização da História da Ciência como ferramenta metodológica e epistemológica. Estudantes como Gabriel, Marta, Júlia, Jorge, Estevão, Suzana e Pedro apresentaram reflexões profundas e coerentes, denunciando a persistência de mitos científicos e defendendo uma formação que capacite o professor a atuar como agente crítico e transformador, consciente dos desafios socioculturais e epistemológicos que permeiam o ensino de ciências na atualidade.

Quais modificações devem ser implementadas em uma nova pesquisa empírica?

Para uma nova pesquisa empírica que vise aprimorar a estrutura e a organização da disciplina História da Ciência 2023-1 (abordagem contextual explícita da história do efeito fotoelétrico e aspectos da NdC), com base em nossa experiência anterior, recomenda-se a adoção das seguintes modificações:

A sobrecarga de atividades extraclasse e os prazos reduzidos foram alvo de críticas por diversos estudantes, especialmente por se tratar de uma turma do período noturno composta por estudantes que precisam conciliar jornadas de estudo e trabalho. Embora a estrutura da disciplina tenha sido elogiada por sua coerência e progressão lógica, a intensidade das exigências, sobretudo no final do semestre, comprometeu a assimilação hierárquica dos conceitos – princípio essencial para a aprendizagem significativa. Diante dessa realidade que

se impõe, sugere-se que parte inicial de cada encontro – talvez os primeiros 60 minutos, conforme a disponibilidade de tempo – seja dedicada à leitura orientada dos textos obrigatórios, em sala de aula. Também se recomendam ajustes pontuais nos prazos de entrega de atividades e, particularmente, assegurar um intervalo mínimo de 15 dias para a preparação de seminários coletivos. Essas medidas visam promover maior equidade no acesso aos conteúdos e favorecer uma apropriação mais reflexiva, possibilitando que a construção de significados ocorra de forma compartilhada, mediada pelos docentes.

No que se refere ao conteúdo, a compreensão conceitual do efeito fotoelétrico mostrou-se essencial para uma aprendizagem significativa e contextualizada da História da Ciência. Considerando que parte dos estudantes ainda não havia estudado formalmente esse fenômeno, propõe-se, como modificação no cronograma, reservar a Semana 3 para uma aula expositivo-dialogada com ênfase histórico-conceitual, articulando os experimentos de Hertz, Lenard e Millikan, a proposta inovadora de Einstein e seus desdobramentos teóricos. Essa aula deve fornecer os subsunçores necessários para que, nas Semanas 4 (aula experimental) e 5 (análise dos livros didáticos), os estudantes possam realizar análises conceituais e críticas mais fundamentadas, ampliando a compreensão conceitual e favorecer o engajamento reflexivo dos estudantes.

Outra modificação importante consiste em ofertar a disciplina aqui desenvolvida como “**História da Ciência II**”, em caráter optativo para os cursos de licenciatura e bacharelado. Tal proposta se justifica pelo fato de que, no semestre seguinte, os estudantes da licenciatura cursam “Física Moderna I” e “Filosofia da Ciência”, o que favorece articulações produtivas entre os conteúdos. A sincronização com essas disciplinas promoverá interdisciplinaridade e a *reconciliação integrativa* entre os aspectos históricos e técnicos, enriquecendo a aprendizagem. Além disso, a manutenção da “História da Ciência I” em seu formato tradicional, com abordagem diacrônica que oferece um panorama geral da evolução científica ao longo do tempo, assegura uma base sequencial sólida. Já a “**História da Ciência II**” adotará uma abordagem sincrônica, permitirá o aprofundando conteúdos específicos, como a história do efeito fotoelétrico.

Por fim, recomenda-se que a disciplina optativa **História da Ciência II** não seja ofertada em único dia, com quatro aulas consecutivas, mesmo em turnos matutinos ou vespertinos. A análise das avaliações e reflexões discentes apontou que essa organização contribuiu para a fadiga, a queda na assiduidade e o desengajamento progressivo de parte dos estudantes, sobretudo entre as semanas de maior sobrecarga acadêmica. Embora algumas melhorias tenham sido implementadas — como intervalos e prazos mais flexíveis —, os dados

indicam que a concentração da carga horária em uma única noite comprometeu a participação ativa e a qualidade da aprendizagem. Relatos de cansaço e superficialidade nas reflexões escritas sugerem que o engajamento cognitivo nem sempre se traduziu em envolvimento comunicativo nos encontros semanais. Dessa forma, redistribuir as aulas em dois dias distintos poderá mitigar o impacto da exaustão, favorecer a assimilação dos conteúdos e estimular uma predisposição ativa mais consistentes, conforme preconiza a TAS de Ausubel (2003).

Em síntese, o resultado principal desta tese consiste na elaboração de um material historiográfico original, destinado a servir como fonte de consulta e apoio didático para professores de Física em diferentes níveis de ensino, do médio ao universitário. Nesse sentido, o trabalho mostrou-se bem-sucedido ao oferecer uma contribuição sólida para a interface entre História da Ciência e ensino de Física, promovendo uma abordagem historicamente contextualizada dos conceitos científicos. O ensaio didático desenvolvido no âmbito de uma disciplina de História da Ciência teve o propósito de validar a aplicabilidade e relevância pedagógica do material, o que foi efetivamente alcançado, ainda que sua utilização não dependa de uma filiação teórica específica — podendo dialogar com outras distintas correntes pedagógicas, como as de Paulo Freire, Bruner, Vygotsky ou Ausubel.

Com base nesses resultados, pesquisas futuras poderão investigar como diferentes referenciais teóricos e práticas pedagógicas influenciam o uso, a interpretação e o impacto formativo desse material em contextos reais de ensino. Tais estudos poderão, por exemplo, analisar como professores e licenciandos mobilizam a História da Física na construção de compreensões epistemológicas e críticas da ciência, ampliando, assim, o alcance e a potência educativa do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- AAAS – AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE. **Science for all Americans**. New York: Oxford University, 1990 [Tradução disponível em RUTHERFORD, F. James; AHLGREN, Andrew. **Ciência para Todos**. Trad. Catarina Caldeira Martins. Lisboa: Gradiva, 1995].
- ABD-EL-KHALICK, Fouad; BELL, Randy L.; LEDERMAN, Norman G. The Nature of Science and instructional practice: making the unnatural natural. **Science Education**, New York, v. 82, n. 4, p. 417-436, 1998.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199807\)82:4<417::AID-SCE1>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199807)82:4<417::AID-SCE1>3.0.CO;2-E)
- ABD-EL-KHALICK, Fouad; LEDERMAN, Norman G. Improving science teachers' conceptions of Nature of Science: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, London, v. 22, n. 7, p. 665-701, 2000.
<https://doi.org/10.1080/09500690050044044>
- ABRANTES, Paulo C. C. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 5, n. esp., p. 58-75, 1988.
- ADÚRIZ-BRAVO, Agustín. A proposal to teach the Nature of Science (NOS) to science teachers: the “structuring theoretical fields” of NOS. **Review of Science, Mathematics and ICT Education**, Patras, v. 1, n. 2, p. 41-56, 2007.
- ALLCHIN, Douglas. Scientific myth-conceptions. **Science & Education**, New Jersey, v. 87, n. 3, p. 329-351, 2003. <https://doi.org/10.1002/sce.10055>.
- ALLCHIN, Douglas. Pseudohistory and pseudoscience. **Science & Education**, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 179-195, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:SCED.0000025563.35883.e9>.
- ALLCHIN, Douglas. Evaluating knowledge of the nature of (Whole) Science. **Science Education**, New York, v. 95, n. 3, p. 518-542, 2011. <https://doi.org/10.1002/sce.20432>
- ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. **Física: fundamentos cuanticos y estadísticos**. Boston: Addison Wesley Longman, 2000. v. 3.
- ALTERS, Brian J. Whose Nature of Science? **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 34, n. 1, p. 39-55, 1997.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199701\)34:1%3C39::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199701)34:1%3C39::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-P).
- ANDRADE, Rodrigo de Oliveira. Resistência à ciência. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, v. 20, n. 284, p. 16-21, 2019. Disponível em:
<https://revistapesquisa.fapesp.br/resistencia-a-ciencia/>. Acesso em: 10 jan. 2021
- ARRHENIUS, Svante. Über das Leitungsvermögen der phosphorescirenden Luft [Sobre a condutividade da atmosfera fosforescente]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 268, n. 12, p. 545-572, 1887. <https://doi.org/10.1002/andp.18872681203>.

ARRHENIUS, Svante. Über das Leitungsvermögen en beleuchter Luft [Sobre a condutividade do ar iluminado]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 33, p. 638, 1888.

AUSUBEL, David Paul. **Aquisição e Retenção do Conhecimento**: uma perspectiva cognitiva. Rio de Janeiro: Plátano, 2003.

AZEVEDO, Nathália Helena; SCARPA, Daniela Lopes. Revisão sistemática de trabalhos sobre concepções de natureza da ciência no ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 17, n. 2, p. 579-619, 1917a. <http://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2017172579>.

AZEVEDO, Nathália Helena; SCARPA, Daniela Lopes. Decisões envolvidas na elaboração e validação de um questionário contextualizado sobre Concepções de Natureza da Ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 57-82, 2017b. <http://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n2p57>.

BACCIAGALUPPI, Guido; VALENTINI, Antony. **Quantum theory at the Crossroads: reconsidering the 1927 Solvay Conference**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

BALDINATO, José Otávio; PORTO, Paulo Alves. Variações da História da Ciência no Ensino de Ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., 2008, Florianópolis. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABRAPEC, 2008.

BALL, Philip. **Serving the Reich**: the struggle for the soul of physics under Hitler. London: Vintage, 2014.

BALL, Philip. Einstein and Nazi physics: when science meets ideology and prejudice. **Mètode Science Studies Journal**, València, v. 10, p. 147-155, 2020. <https://doi.org/10.7203/metode.10.13472>.

BECQUEREL, Alexandre Edmond. Sur les Effets Électriques qui se Produisent sous l'Influence Solaire-Lettre [Sobre os efeitos elétricos que ocorrem sob a influência solar – carta]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 9, p. 711-713, 1839a.

BECQUEREL, Alexandre Edmond. Memoires sur les Effets d'Electriques Produits sous L'influence des Rayons Solaires [Memórias sobre os efeitos elétricos produzidos sob a influência dos raios solares]. **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences**, Paris, v. 9, p. 561-567, 1839b.

BERTOINA, João Pedro Sussel. **Problematizando o bacharelado em Física**: uma discussão da noção de docentes a respeito da Natureza da Ciência. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

BIANCOLIN, Mônica Maria. **Desvelando o professor efetivo de Física**. 2014. 344 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BICHAT, Ernest; BLONDLOTT, René. Action combinée de l'insufflation et de l'illumination sur les couches électriques qui revêtent les corps conducteurs [Ação combinada de insuflação e iluminação nas camadas elétricas que recobrem os corpos condutores].

Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, v. 107, p. 29, 1888.

BLAIKIE, Norman. **Analysing quantitative data**. London: Sage Publications, 2003.

BOLTZMANN, Ludwig Eduard. Über das Wirkungsgesetz der Molekularkräfte [Sobre a lei de ação das forças moleculares]. **Wiener Berichte**, [S.l.], v. 66, p. 213-219, 1872.

BOLTZMANN, Ludwig Eduard. **Lectures on gas theory**. New York: Dover Publications, 2011 [original de 1896].

BONZEL, Hans P.; KLEINT, Christian. On the history of photoemission. **Progress in surface Science**, United Kingdom, v. 49, n. 2, p. 107-153, 1995.
[https://doi.org/10.1016/0079-6816\(95\)00035-W](https://doi.org/10.1016/0079-6816(95)00035-W).

BOSS, Sérgio Luiz Bragatto; CALUZI, João José; ASSIS, André Koch Torres; SOUZA-FILHO, Moacir Pereira. A utilização de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores: breves considerações sobre dificuldades de leitura e entendimento. In: GATTI, Sandra Regina Teodoro; NARDI, Roberto (org.). **A história e a filosofia da ciência no ensino de ciências: a pesquisa e suas contribuições para a prática pedagógica em sala de aula**. São Paulo: Editora Escrituras, 2016. p. 171-197.

BRANLY, Eugène Édouard Désiré. Zerstreuung beider Elektrizitäten durch Belichtung [Dispersão de ambas as eletricidades pela iluminação]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 110, p. 751, 185 e 898, 1890.

BRANLY, Eugène Édouard Désiré. Zerstreuung beider Elektrizitäten durch Funkenlicht [Dispersão de ambas as eletricidades pela luz de faísca]. **La Lumière Électrique**, v. 41, p. 143, 1891.

BRASIL. **Diretrizes Nacionais Curriculares para os cursos de Física**. Brasília, DF: MEC/SEF, 2001. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.

BRASIL. **PCN + Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, DF: SEMTEC/MEC, 2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular: Educação é a Base – ensino médio**. Brasília, DF: SEMTEC/MEC, 2018.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Relatório Brasil no PISA 2018**. Brasília, DF: INEP/MEC, 2020. Disponível em: https://download.inep.gov.br/publicacoes/institucionais/avaliacoes_e_exames_da_educacao_basica/relatorio_brasil_no_pisa_2018.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

BROWN, James Dean. Likert items and scales of measurement? **Shiken: JALT Testing & Evaluating SIG Newsletter**, Tokyo, v. 15, n. 1, p. 10-14, 2011.

BUNGE, Mário. **La investigación científica: su estrategia y filosofía**. Barcelona: Ariel, 1969.

BUNGE, Mário. **Pseudociencia e ideología**. Madrid: Alianza, 1985.

BUNGE, Mário. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 2008 [1. ed. 1974].

BURTON, Erin Peters. Student work products as a teaching tool for nature of science pedagogical knowledge: a professional development project with in-service secondary science teachers. **Teaching and Teacher Education**, United Kingdom, v. 29, p. 156-166, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2012.09.005>

CACHAPUZ, António; GIL-PÉREZ, Daniel; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de; PRAIA, João; VILCHES, Amparo. **A necessária renovação do ensino das ciências**. São Paulo: Cortez, 2005.

CARIFIO, James; PERLA, Rocco J. Ten common misunderstandings, misconceptions, persistent myths and urban legends about Likert scales and Likert response formats and their antidotes. **Journal of Social Sciences**, New York, v. 3, n. 3, p. 106-116, 2007.

CARIFIO James; PERLA Rocco J. Resolving the 50-year Debate Around using and Misusing Likert Scales. **Medical Education**, Oxford, v. 42, n. 12, p. 1150-1152, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2008.03172.x>.

CAVALCANTE, Christian Gama. **Concepções alternativas sobre Natureza da Ciência no contexto da formação inicial de professores de Física do IFCE**. 2017. 232 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2017.

CHALMERS, Alan F. **O que é Ciência, afinal?** 1. ed. São Paulo: Brasiliense, 1993.

CHEN, Sufen. Development of an instrument to assess views on Nature of Science and attitudes toward teaching science. **Science & Education**, New Jersey, v. 90, n. 5, p. 803-819, 2006. <https://doi.org/10.1002/sce.20147>.

CHEVALLARD, Yves. **La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné**. 2. ed. Grenoble: La Pensée Sauvage, 1985.

CLASON, Dennis L.; DORMODY, Thomas J. Analyzing data measured by individual Likert-type items. **Journal of Agricultural Education**, Gainesville, v. 35, n. 4, p. 31- 35, 1994. <https://doi.org/10.5032/jae.1994.04031>.

CLOUGH, Michael P. Learners' responses to the demands of conceptual change: considerations for effective Nature of Science instruction. **Science & Education**, [S.l.], v. 15, p. 463-494, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11191-005-4846-7>.

CLOUGH, Michael P. Teaching the Nature of Science to secondary and post-secondary students: questions rather than tenets. **The Pantaneto Forum**, United Kingdom, n. 25, 2007.

Disponível em: <http://pantaneto.co.uk/teaching-the-nature-of-science-to-secondary-and-post-secondary-students-questions-rather-than-tenets-michael-clough/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

COHEN, Louis; MANION, Laurence; MORRISON, Keith. **Research methods in education**. 5. ed. London: RoutledgeFalmer, 2000.

COMPTON, Karl Taylor. The influence of the contact difference of potential between the plates emitting and receiving electrons liberated by ultra-violet light on the measurement of the velocities of these electrons. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 23, n. 136, p. 579-593, 1912. <https://doi.org/10.1080/14786440408637249>

COMPTON, Arthur Holly. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. **Physical Review** [Série 2], v. 21, n. 5, p. 483-502, 1923. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>.

COMPTON, Arthur Holly. Discordances entre l'expérience et la théorie électromagnétique du rayonnement. In: INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY (org.). **Électrons et photons**. Rapports et Discussions de Cinquième Conseil de Physique. Paris: Gauthier-Villars, 1928a. p. 55-85.

COMPTON, Arthur Holly. Some experimental difficulties with the electromagnetic theory of radiation. **Journal of the Franklin Institute**, v. 205, n. 2, p. 155-175. 1928b. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(28\)92041-4](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(28)92041-4).

COMPTON, Arthur Holly. X-rays as a branch of optics. **Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments**, v. 16, p. 71-87, 1928c. <https://doi.org/10.1364/JOSA.16.000071>. [cf. THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1922-1941**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998b (Physics 1927, Arthur Holly Compton, p. 174-190)].

CONANT, James Bryant; NASH, Leonard K. (eds.). **Harvard Case Histories in Experimental Science** (Vol. 1; Vol. 2). Cambridge: Harvard University Press, 1957.

CORDEIRO, Marinês Domingues; PEDUZZI, Luiz O. Q. Aspectos da natureza da ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 3601, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000300019>

CORNELIUS, David W. The Velocity of Electrons in the Photo-electric Effect, as a Function of the Wave Lengths of the Light. **Physical Review Journals Archive** [Series 2], Washington, v. 1, n. 1, p. 16-34, 1913. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.1.16>

CORNWELL, John. **Os cientistas de Hitler: ciência, guerra e o pacto com o demônio**. Rio de Janeiro: Imago, 2003.

CORTEZ, Jheniffer Micheline. **Natureza da Ciência na formação inicial de professores de Química: ações e reflexões voltadas à compreensão e ensino sobre a Ciência**. 2019. 383 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

COSTA, Fábio Antônio; VIDEIRA, Antônio Augusto Passos. Heisenberg contra Lenard e Stark: o que há de importante na Física Ariana? **Revista Portuguesa de Filosofia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 1, p. 309-350, 2007.

CRAWFORD, Elisabeth T. **The Nobel Population 1901-1937**: a census of the nominators and nominees for the prizes in Physics and Chemistry. Berkeley: Office for History of Science and Technology, University of California, 1987.

CUPANI, Alberto Osmar; PIETROCOLA, Maurício. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de Ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. esp., p. 100-125, 2002.

CURIE, Pierre; CURIE, Marie. Sur la charge électrique des rayons déviabiles du radium [Sobre a carga elétrica dos raios desviáveis do rádio]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, France, v. 130, n. 10, p. 647-653, 1900.

CURIE, Pierre; SAGNAC, Georges. Électrisation negative des rayons secondaires produits au moyen des rayons Röntgen [Eletrização negativa dos raios secundários produzidos por meio dos raios Röntgen]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, France, v. 130, n. 15, p. 1.013-1.016, 1900.

DAGHER, Zoubeida R.; ERDURAN, Sibel. Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education. **Science & Education**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 147-164, 2016.

DEBYE, Peter Josephus Wilhelmus; SOMMERFELD, Arnold Johannes Wilhelm. Theorie des lichtelektrischen Effektes vom Standpunkt des Wirkungsquantums [Teoria do efeito fotoelétrico do ponto de vista do *quantum* de ação]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 346, n. 10, p. 873-930, 1913. <https://doi.org/10.1002/andp.19133461002>.

DIONÍSIO, Paulo Henrique. Albert Einstein e a Física quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 22, n. 2, p. 147-164, 2005.

DORN, Friedrich Ernest. Versuche über Sekundärstrahlen [Experimentos com raios secundários]. **Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles**, La Haye, S. II, v. 5, p. 595- 608, 1900.

DORN, Friedrich Ernest. Elektrostatische Ablenkung der Radiumstrahlen [Deflexão eletrostática dos feixes de rádio]. **Abhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Halle**, Halle, v. 22, p. 46-55, 1901.

DRIVER, Rosalind; LEACH, John; MILLAR, Robin; SCOTT, Phil. **Young people's images of Science**. Philadelphia: Open University, 1996.

DURBANO, João Paulo Di Monaco. **Investigação de Concepções de Alunos de Ciências Biológicas do IB/USP acerca da Natureza da Ciência**. 2012. 203 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas (Biologia/Genética), Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

DUSCHL, Richard A.; GRANDY, Richard. Two vies about explicitly teaching the nature of science. **Science & Education**, [S.l.], v. 22, n. 9, p. 2.109-2.139, 2013.

ECKERT, Michael. **Arnold Sommerfeld: Science, life and turbulent times 1868-1951**. New York: Springer, 2013.

ECKERT, Michael. From X-rays to the h-hypothesis: Sommerfeld and the early quantum theory 1909-1913. **The European Physical Journal Special Topics**, [S.l.], v. 224, n. 10, p. 2057-2073, 2015.

EFLIN, Juli T.; GLENNAN, Stuart; REISCH, George. The Nature of Science: a perspective from the Philosophy of Science. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 36, n. 1, p. 107-116, 1999.

EHRENFEST, Paul. Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle? [Quais aspectos da hipótese dos *quanta* de luz desempenham um papel essencial na teoria da radiação térmica?]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 341-, n. 11, p. 91-118, 1911. <https://doi.org/10.1002/andp.19113411106>

EINSTEIN, Albert. Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik [Teoria cinética do equilíbrio térmico e da Segunda Lei da Termodinâmica]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 314, n. 10, p. 417-433, 1902. <https://doi.org/10.1002/andp.19023141007>

EINSTEIN, Albert. Eine theorie der grundlagen der thermodynamik [Uma teoria dos fundamentos da termodinâmica]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 316, n. 5, p. 170-187, 1903. <https://doi.org/10.1002/andp.19033160510>

EINSTEIN, Albert. Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme [Sobre a teoria geral molecular do calor]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 319, n. 7, p. 354-362, 1904. <https://doi.org/10.1002/andp.19043190707>

EINSTEIN, Albert. Über einen dir Erzeugung und Versandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt [Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 322, n. 6, p. 132-148, 1905. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>.

EINSTEIN, Albert. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption [Sobre a teoria da produção e absorção da luz]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 20, p. 199-206, 1906.

EINSTEIN, Albert. Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. **Physikalische Zeitschrift**, v. 10, p. 185-193, 1909. (cf. EINSTEIN, Albert. **Revista Brasileira de Física**, v. 27, n. 1, p. 69-76, 2005).

EINSTEIN, Albert. Meine Antwort. Ueber die anti-relativitätstheoretische. **Berliner Tageblatt**, serie 49, n. 402, p. 1, 27 Aug. 1920.

EINSTEIN, Albert. Professor Einstein at the California Institute of Technology. **Science**, Washington, v. 73, n. 1893, p. 375-379, 1931. <https://doi.org/10.1126/science.73.1893.375>.

EINSTEIN, Albert. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. In: STACHEL, John. **The collected papers of Albert Einstein**.

Tradução para o inglês de Anna Beck. Princeton: Princeton University, 1989. v. 2: The swiss years: writings, 1900-1909, cap. 14, p. 86-103

EINSTEIN, Albert. **The collected papers of Albert Einstein**. Org. Martin J. Klein, A. J. Kox, Robert Schulmann. Princeton: Princeton University, 1995. v. 5: The Swiss Years: correspondence, 1902-1914. Disponível em: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol5-trans/41>. Acesso em: 20 jan. 2024.

EINSTEIN, Albert. Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz. In: STACHEL, John (org.). **O ano miraculoso de Einstein**: cinco artigos que mudaram a face da Física. Trad. Alexandre Carlos Tort. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2005. cap. 4, p. 202-222. [original de 1905].

EISBERG, Robert M.; RESNIK, Robert. **Física quântica**: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Über die Entladung negative elektrisirter Körper durch das Sonnenund Tageslicht [Sobre a descarga de corpos eletricamente carregados pela luz solar e luz do dia]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 38, p. 40, 1889. [cf. também **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 38, p. 497, 1889]. <https://doi.org/10.1002/andp.18892741202>

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Über die durch Soonenlicht bewirkte electrische Zerstreuung von mineralischen Oberflächen [Sobre a dispersão elétrica causada pela luz solar em superficies minerais]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 44, p. 722-736, 1891a. <https://doi.org/10.1002/andp.18912801210>.

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Notiz über eine neue Form der Apparate zur Demonstration der lichtelectrischen Entladung durch Tageslicht [Nota sobre uma nova forma de aparelho para a demonstração da descarga fotoelétrica através da luz do dia]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 278, n. 4, p. 564-567, 1891b. <https://doi.org/10.1002/andp.18912780405>

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Beobachtungen des atmosphärischen Potentialgefälles und der ultravioletten Sonnenstrahlung [Observações do gradiente de potencial atmosférico e da radiação ultravioleta solar]. **Sitzungsbericht der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien**, Wien, v. 101, n. IIa, p. 703-856, 1892. [cf. também **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 284, , n. 2, p. 338-173, 1893]. <https://doi.org/10.1002/andp.18932840209>.

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Weitere Lichtelectrische Versuche [Outras experiências fotoelétricas]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 288, n. 7, p. 433-454, 1894. <https://doi.org/10.1002/andp.18942880702>.

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Lichtelectrische Untersuchungen an polarisirtem Lichte [Investigações fotoelétricas com luz polarizada]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 291, n. 8, p. 684-700, 1895. <https://doi.org/10.1002/andp.18952910811>.

ELSTER, Julius Johann Philipp; GEITEL, Hans Friedrich Karl. Über den Einfluß des Polarisationszustandes des erregenden Lichtes auf die Elektronenemission an Alkalimetallflächen [Sobre a influência do estado de polarização da luz excitante na emissão de elétrons em superfícies de metais alcalinos]. **Physikalische Zeitschrift**, v. 10, p. 457-462, 1909.

FERNÁNDEZ, Isabel; GIL-PÉREZ, Daniel; MONTORO, ALÍS, Jaime Carrascosa; CACHAPUZ, António; PRAIA, João. Visiones deformadas de la Ciencia transmitidas por la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 20, n. 3, p. 477-488, 2002. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3962>.

FEYERABEND, Paul. **Contra o método**. 2. ed. São Paulo: UNESP, 2011 [1. ed. 1975].

FERREIRA, Alexandre de Oliveira. Heisenberg e a doutrina das cores de Goethe e Newton. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 175-206, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662015000100008>

FORATO, Thaís Cyrino de Mello. **A Natureza da Ciência como saber escolar**: um estudo de caso a partir da história da luz. 2009. 442 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FORATO, Thaís Cyrino de Mello; PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto de Andrade. Historiografia e Natureza da Ciência na Sala de Aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

FRANKLIN, Allan. Millikan's measurement of Planck's constant. **The European Physical Journal H**, [S.l.], v. 38, p. 573-594, 2013. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2013-40021-3>
FRANKLIN, Allan. Physics textbooks don't always tell the truth. **Physics in Perspective**, [S.l.], v. 18, p. 3-57, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00016-016-0178-z>.

FRICKE, Rudolf G. A. Günther & Tegetmeyer 1901-1958: Instrumente für die Wissenschaft aus Braunschweig. Wolfenbüttel: A-F Verlag, 2011.

FRICKE, Rudolf G. A.; SCHLEGEL, Kristian. Julius Elster and Hans Geitel: dioscursi of Physics and pioneer investigators in atmospheric electricity. **History of Geo Space Sciences**, Göttingen, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2017. <https://doi.org/10.5194/hgss-8-1-2017>.

FRIEDMAN, Robert Marc. The 100th anniversary of Einstein's Nobel Prize: facts and fiction. **Annalen der Physik**, Berlin, v. 534, n. 11, p. 2200305, 2022. <https://doi.org/10.1002/andp.202200305>.

GALDABINI, Silvana; GIULIANI, Giuseppe; ROBOTTI, Nadia. Photoelectricity within Classical Physics: from the photocurrents of Edmond Becquerel to the first measure of the electron charge. **Conference Proceedings-Italian Physical Society**, Italy, v. 42, p. 149-156, 1992.

GATTI, Sandra Regina Teodoro. **Análise de uma ação didática centrada na utilização da História da Ciência**: uma contribuição para a formação inicial do docente de Física. 2005. 329 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GIBBS, Josiah Willard. **Elementary principles in statistical mechanics**: developed with especial reference to the rational foundation of thermodynamics. New York: Charles Scribner's Sons, 1902.

GIL-PÉREZ, Daniel; MONTORO, Isabel Fernández; ALÍS, Jaime Carrascosa; CACHAPUZ, António; PRAIA, João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.
<https://doi.org/10.1590/S1516-73132001000200001>

GONZALES, Eliéverson Guerchi; SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; CALUZI, João José. Discutindo as epistemologias de Thomas Kuhn e Ludwik Fleck: uma análise sobre o efeito fotoelétrico. **Revista de Enseñanza de la Física**, Córdoba, v. 34, n. extra, p. 221-29, 2022.

HAAS, Arthur Erich. Über die elektrodynamische Bedeutung des Planck'schen Strahlungsgesetzes und über eine neue Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und der Dimensionen des Wasserstoffatoms [Sobre o significado eletrodinâmico da lei de radiação de Planck e uma nova determinação do *quantum* elétrico elementar e das dimensões do átomo de hidrogênio]. **Physikalische Zeitschrift**, Deutschland, v. 11, p. 119-144, 1910a.

HAAS, Arthur Erich. Über eine neue theoretischer Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und des Halbmessers des Wasserstoffatoms [Sobre um novo método teórico para a determinação do *quantum* elétrico elementar e do semirraio do átomo de hidrogênio]. **Physikalische Zeitschrift**, Deutschland, v. 11, p. 537-538, 1910b.

HAAS, Arthur Erich. Der erste Quantenansatz für das Atom. **Dokumente der Naturwissenschaft**, Stuttgart, v. 10, p. 9, 1965.

HACKING, Ian. **Representar e intervir**: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2012.

HALLIDAY, David; RESNIK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**: óptica e física moderna. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.

HALLWACHS, Wilhelm Ludwig Franz. Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper [Sobre a influência da luz em corpos eletrostaticamente carregados]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 33, p. 301-312, 1888a.
<https://doi.org/10.1002/andp.18882690206>.

HALLWACHS, Wilhelm Ludwig Franz. Ueber die Electricisirung von Metallplatten durch Bestrahlung mit Electrischem Licht [Sobre a eletrização de placas metálicas por irradiação com luz elétrica]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 34, p. 731-734, 1888b.
<https://doi.org/10.1002/andp.18882700809>.

HALLWACHS, Wilhelm Ludwig Franz. On the electrification of metal plates by irradiation with electrical light. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 26, n. 58, p. 78-80, 1888c.
<https://doi.org/10.1080/14786448808628240>.

HALLWACHS, Wilhelm Ludwig Franz. Bemerkungen zu einem Prioritätsanspruch des Hrn. Righi. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 276, n. 6, p. 338-342, 1890. <https://doi.org/10.1002/andp.18902760609>.

HARPE, Spencer E. How to analyze Likert and other rating scale data. **Currents in Pharmacy Teaching and Learning**, United States, v. 7, p. 836-850, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cptl.2015.08.001>.

HEILBRON, John L. Quantum historiography and the Archive of History of Quantum Physics. **History of Science**, London, v. 7, n. 1, p. 90-111, 1968. <https://doi.org/10.1177/00732753680070010>.

HEISENBERG, Werner. **A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política**. Trad. Vera Ribeiro. São Paulo: Contraponto, 1996.

HELMHOLTZ, Hermann Ludwig Ferdinand von. Electromagnetische Theorie der Farbenzerstreuung [Teoria eletromagnética da dispersão de cores]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 284, n. 3, p. 389-405, 1893.

HENNINGS, Albert E. A study of contact potentials and photo-electric properties of metals in vacuo: and the mutual relation between these phenomena. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 4, n. 3, p. 228-246, 1914. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.228>.

HENNINGS, Albert E.; KADESCH, William Henry. The relations of the photo-potentials assumed by different metals when stimulated by light of a given frequency. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 8, n. 3, p. 209-220, 1916. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.8.209>

HENTSCHEL, Klaus. **Physics and national socialism: an anthology of primary sources**. Trad. Ann M. Hentschel. Basel: Birkhäuser, 1996.

HERMANN, Armin. **The genesis of quantum theory (1899-1913)**. Cambridge: MIT, 1971.

HERTWIG, Ralph; TODD, Peter M. Heuristics. In: RAMACHANDRAN, Vilayanur S. (org.). **Encyclopedia of the Human Brain**. San Diego: Academic, 2002. v. 2, p. 449-460.

HERTZ, Heinrich Rudolf. Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung [Sobre um efeito da luz ultravioleta em descargas elétricas]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 267, n. 8, p. 983-1000, 1887. <https://doi.org/10.1002/andp.18872670827>.

HERTZ, Heinrich Rudolf. **Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft** [Ondas elétricas: pesquisas sobre a propagação da ação elétrica com velocidade finita através do espaço]. Leipzig: J. A. Barth, 1892. [cf. tradução no inglês de Daniel Evan Jones, Electric waves, being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space].

HERTZ, Heinrich Rudolf. Über einen Einfluss der ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung [Sobre um efeito da luz ultravioleta em descargas elétricas]. In: MULLIGAN, Joseph Francis. **Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894): a collection of articles and addresses**. New York: Routledge: 1994. p. 247-264.

HODSON, Derek. Nature of Science in the Science Curriculum: origin, development, implications and shifting emphases. *In*: MATTHEWS, Michael R. (org.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 911-970.

HODSON, Derek; WONG, Siu Ling. From the Horse's Mouth: why scientists' views are crucial to Nature of Science understanding. **International Journal of Science Education**, London, v. 36, n. 16, p. 2.639-2.665, 2014. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.927936>

HOLTON, Gerald. R. A. Millikan's struggle with the meaning of Planck's constant. **Physics in Perspective**, [S.l.], v. 1, p. 231-237, 1999. <https://doi.org/10.1007/s000160050020>.

HOOR, Max von. Einfluß des Lichtes auf negativ geladene Konduktoren. **Wiener Berichte**, v. 97, p. 719-742, 1888.

HOOR, Max von. **Repertorium der Physik [...]**. München: Oldenburg, 1889. v. 25: Repertorium für Experimental-Physik, für Physikalische Technik, Mathematische [und] Astronomische Instrumentenkunde. p. 91.

HUGHES, Arthur Llewelyn. On the emission velocities of photoelectrons. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, United Kingdom, v. 212, p. 205-226, 1912.

HUGHES, Arthur Llewelyn. LXIX. On the velocities with which photo-electrons are emitted from matter. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 25, p. 683-686, p. 1913. <https://doi.org/10.1080/14786440508637382>

HUGHES, Arthur Llewelyn. **Photo-electricity**. Cambridge: Cambridge University, 1914.

HULL, Albert Wallace. Die Anfangsgeschwindigkeiten der durch ultraviolette Licht erzeugten Elektronen. **Physikalische Zeitschrift**, v. 10, p. 537-546, 1909.

IRZIK, Gürol; NOLA, Robert. A family resemblance approach to the nature of Science for Science education. **Science & Education**, [S.l.], v. 20, p. 591-607, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11191-010-9293-4>.

IRZIK, Gürol; NOLA, Robert. New directions for Nature of Science Research. *In*: MATTHEWS, Michael R. (org.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 999-1022.

INNES, P. D. On the velocity of the cathode particles emitted by various metals under the influence of röntgen rays, and its bearing on the theory of atomic disintegration. **Proceedings of the Royal Society of London. Série A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 79, n. 532, p. 442-462, 1907. <https://doi.org/10.1098/rspa.1907.0056>

JAMES, A. N. Photoelectric effect: a common fundamental error. **Physics Education**, United Kingdom, v. 8, n. 6, p. 382-384, 1973. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/8/6/005>

JAMIESON, Susan. Likert Scale: how to (ab)use them. **Medical Education**, Oxford, v. 38, n. 12, p. 1217-1218, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2929.2004.02012.x>

JAMMER, Max. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: MacGraw-Hill, 1966.

JAYADINATA, Asep Kurnia; HAKAM, Kama Abdul; MUNANDAR, Achmad. Investing student of primary school teachers' Views on Science and Education in Indonesia. **International Conference on Mathematics and Science Education**, Bandung, v. 4, p. 1-8, 2019.

JEANS, James Hopwood. On the partition of energy between matter and Aether. **The London, Edinburg, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 10, n. 55, p. 91-98, 1905. <https://doi.org/10.1080/14786440509463348>

JENKIN, John. G. E. M. Jauncey and the Compton Effect. **Physics in Perspectives**, v. 4, p. 320-332, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00016-002-8371-7>.

JOFFÉ, Abram Fedorovich. Eine Bemerkung zu der Arbeit von E. Ladenburg: Über Anfangsgeschwindigkeit und Menge der photoelektrischen Elektronen usw. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 329, n. 15, p. 939-940, 1907. <https://doi.org/10.1002/andp.19073291507>

KADESCH, William Henry. The energy of photo-electrons from sodium and potassium as a function of the frequency of the incident light. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 3, n. 5, p. 367-374, 1914a. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.3.367>.

KADESCH, William Henry. The positive potencial in the photo-electric effect. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 3, n. 1, p. 63-64, 1914b. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.3.63.2>.

KADESCH, William Henry; HENNINGS, Albert E. The value of h determined photo-electrically from the ordinary metals. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 8, n. 3, p. 221-226, 1916. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.8.221>

KATZIR, Shaul. Thermodynamic deduction versus quantum revolution: the failure of Richardson's Theory of the Photoelectric Effect. **Annals of Science**, United Kingdom, v. 63, n. 4, p. 447-469, 2006. <https://doi.org/10.1080/00033790600787417>

KATZIR, Shaul. Theoretical Challenges by Experimental Physics: Radiation and Its Interaction with Matter. In: **Traditions and Transformations in the History of Quantum Physics: HQ-3: Third International Conference on the History of Quantum Physics, Berlin, June 28 – July 2, 2010**. Berlin: Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, 2013. <https://doi.org/10.34663/9783945561225-03>

KLASSEN, Stephen. The photoelectric effect: reconstructing the story for the physics classroom. **Science & Education**, [S.l.], v. 20, n. 7-8, p. 719-731, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9214-6>. [cf. KLASSEN, Stephen. The photoelectric effect: Rehabilitating the story for the physics classroom. In: **Science & Education: Proceedings of the Second International Conference on Story in Science Teaching**, p. 1-17, 2008].

KLASSEN, Stephen; NIAZ, Mansoor; METZ, Don; McMILLAN, Barbara; DIETRICH, Sarah. Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in Laboratory Instructions. **Science & Education**, v. 21, n. 5, p. 720-743, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9360-5>

KLEIN, Martin Jesse. Max Planck and the beginnings of quantum theory. **Archive for History of Exact Sciences**, [S.l.], v. 1, n. 5, p. 459-479, 1962.

KLEIN, Martin Jesse. Einstein's first paper on quanta. **The Natural Philosopher**, New York, v. 2, p. 59-86, 1963.

KLEIN, Martin Jesse. Thermodynamics in Einstein's thought. **Sciences**, Washington, v. 157, n. 3788, p. 509-516, 1967. <https://doi.org/10.1126/science.157.3788.509>.

KLEIN, Martin Jesse. The use and abuse of historical teaching in physics. In: BRUSH, Stephen G.; KING, Allan L. **History in the Teaching of Physics**. Hanover: University Press of New England: Hanover, 1972; p. 12-18.

KLEIN, Martin Jesse. No firm foundation: Einstein and the early quantum theory. In: WOOLF, Harry (org.). **Some strangeness in the proportion**: a centennial symposium to celebrate the achievements of Albert Einstein. Reading: Addison-Wesley, 1980. p. 161-185.

KOYRÉ, Alexandre. **Estudos de história do pensamento científico**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1982.

KRAGH, Helge Stjernholm. **An introduction to the Historiography of Science**. New York: Cambridge University, 1987.

KRAGH, Helge Stjernholm. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. **Science & Education**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 349-363, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00430962>.

KRAGH, Helge Stjernholm. **Before Bohr**: theories of atomic structure 1850-1913. Aarhus: Centre for Science Studies, University of Aarhus; Research Publications on Science Studies, 2010.

KRAGH, Helge Stjernholm. **Photon**: new light on an old name. [S.l.: S.n.]: 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.0293.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2024.

KROGH, Lars B.; NIELSEN, Keld. Introduction: how science works: and how to teach it. **Science Education**, New York, v. 22, n. 9, p. 2055-2065, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9582-9>.

KUHN, Thomas Samuel. Objectivity, value judgment and theory choice. In: KUHN, Thomas Samuel. **The essential tension**: selected studies in the scientific tradition and charge. Chicago: University of Chicago, 1977.

KUHN, Thomas Samuel. **Black-body theory and the quantum discontinuity (1894-1912)**. Chicago: The University of Chicago, 1978.

KUHN, Thomas Samuel. **A função do dogma na investigação científica**. Org. Eduardo Barra. Trad. Jorge Dias de Deus. Curitiba: UFPR/SCHLA, 2012 [1. ed. 1963]. Disponível em: <http://goo.gl/suIX3Z>. Acesso em: 4 set. 2023.

KUHN, Thomas Samuel. **A estrutura das revoluções científicas**. 12. ed. São Paulo: Perspectiva, 2013 [1. ed. 1962].

KUNZ, Jakob. On the initial velocity of electrons as a function of the wavelength in the photoelectric effect. **Physical Review Journals Archive** [Series I], Washington, v. 31, p. 536-544, 1910. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.31.536>

KUNZ, Jakob. On the positive potential of metals in the photoelectric effect and the determination of the wave-length equivalent of Roentgen rays. **Physical Review Journals Archive** [Series I], Washington, v. 33, p. 208-214, 1911c. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.33.208>

LACEY, Hugh. **Is Science value free?** Values and scientific understanding. London: Routledge, 2005.

LACEY, Hugh. **Valores e atividade científica 1**. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia/Editora 34, 2008.

LACEY, Hugh. **Valores e atividade científica 2**. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia/Editora 34, 2010.

LADENBURG, Erich Robert. Untersuchungen über die entladende Wirkung des ultravioletten Lichtes auf negativ geladene Metallplatten im Vakuum [Investigações sobre o efeito descarregador da luz ultravioleta em placas metálicas carregadas negativamente no vácuo]. **Annalen der Physik**, v. 317, n. 11, p. 558-578, 1903.

LADENBURG, Erich Robert. Über Anfangsgeschwindigkeit und Menge der photoelektrischer Elektronen in ihrem Zusammenhange mit der Wellenlänge des auslösenden Lichtes [Sobre a velocidade inicial e a quantidade de elétrons fotoelétricos em sua relação com o comprimento de onda da luz desencadeadora]. **Physikalische Zeitschrift**, Deutschland, v. 8, p. 590-594, 1907. [cf. também **Berichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft Verhandlungen**, Deutschland, v. 9, p. 504-515, 1907].

LADENBURG, Erich Robert; MARKAU, Karl. Über die Anfangsgeschwindigkeiten lichtelektrischer Elektronen [Sobre as velocidades iniciais dos elétrons fotoelétricos]. **Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, v. 10, p. 562, 1908. (Também publicado em **Physikalische Zeitschrift**, v. 9, p. 821-828, 1908).

LADENBURG, Rudolf Walter von. Die neueren Forschungen über die durch Licht- und Röntgenstrahlen hervorgerufene Emission negativer Elektronen [As pesquisas mais recentes sobre a emissão de elétrons negativos provocada por raios de luz e raios-X]. **Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik**, v. 6, n. 4, p. 426-484, 1909.

LAWSON, Anton. E. The generality of hypothetico-deductive reasoning: making scientific thinking explicit. **The American Biology Teacher**, Washington, DC, v. 62, n. 7, p. 482-495, 2000. [https://doi.org/10.1662/0002-7685\(2000\)062\[0482:TGOHDR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1662/0002-7685(2000)062[0482:TGOHDR]2.0.CO;2)

LEDERMAN, Norman G. Student's and teacher's conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, n. 4, p. 331-359, 1992. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290404>

LEDERMAN, Norman G. Nature of science: past, present, and future. In: ABELL, Sandra K.; LEDERMAN, Norman G. **Handbook of Research on Science Education**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2007. p. 831-880.

LEDERMAN, Norman G.; ABD-EL-KHALICK, Fouad; BELL, Randy L.; SCHWARTZ, Renée S. Views of nature of science questionnaire: toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 39, n. 6, p. 497-521, 2002. <https://doi.org/10.1002/tea.10034>

LEDERMAN, Norman G.; BARTOS, Stephen A.; LEDERMAN, Judith. The development, use, and interpretation of Nature of Science assessments. In: MATHEWS, Michael R. (org.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 971-997. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_29.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Ultraviolettes Lichts [A Produção de Raios Catódicos por Luz Ultravioleta]. **Sitzungsbericht der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien – Mathematisch-Naturwissenschaftliche**, Wien, v. 108, 1889. [cf. também **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 307, n. 6, p. 359-375, 1900a. <https://doi.org/10.1002/andp.19003070611>.

LENARD, P. E. A. von, Ueber Wirkungen des ultravioletten Lichtes auf gasförmige Körper. **Annalen der Physik**, v. 306, n. 3, p. 486-507, 1900b.

LENARD, P. E. A. von, Ueber die Elektrizitätszerstreuung in ultraviolett durchstrahlter Luft. **Annalen der Physik**, v. 308, n. 10, p. 298-319, 1900c.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. Über die Lichtelektrische Wirkung [Sobre o efeito fotoelétrico]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 313, n. 5, p. 149-198, 1902. <https://doi.org/10.1002/andp.19023130510>.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. Über die Beobachtung langsamer Kathodenstrahlen mit Hilfe der Phosphoreszenz und über Sekundärentstehung von Kathodenstrahlen [Sobre a observação de raios catódicos lentos por meio da fosforescência e na formação secundária de raios catódicos]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 317, n. 11, p. 449 -490, 1903a. <https://doi.org/10.1002/andp.19033171102>.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit [Sobre a absorção de raios catódicos de diferentes velocidades]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 317, n. 12, p. 714-744, 1903b. <https://doi.org/10.1002/andp.19033171203>.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. **Quantitatives über Kathodenstrahlen aller Geschwindigkeiten** [Quantidades sobre raios catódicos de todas as velocidades]. Heidelberg: Carl Winter, 1918.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. *Deutsche Physik in vier Bänden*. Erster Band: Einleitung und Mechanik. Munich: J. F. Lehmann, 1936. p. IX-XV.

LENARD, Philipp Eduard Anton von. On cathode rays. In: THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1901-1921**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. Cap. 5, p. 98-135. [original de 1906].

LENARD, Philipp Eduard Anton von; RAMSAUER, Carl. Über die Wirkung sehr Kurzwelligen Ultravioletten Lichtes auf Gase and über eine sehr Reiche Quelle dieses Lichtes [Sobre o efeito da luz ultravioleta de ondas curtas em gases e sobre uma fonte muito rica dessa luz]. **Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften – Mathematisch-Naturwissenschaftliche**, Heidelberg, seção 24, n. 47, p. 5-8, 1911.

LENARD, Philipp Eduard Anton von; STARK, Johannes. Hitlergeist und Wissenschaft. **Grossdeutsche Zeitung. Tageszeitung für nationale und soziale Politik und Wirtschaft**, v. 1, n. 81, Thursday, May 8, p. 1-2, 1924.

LENARD, Philipp Eduard Anton von; WOLF, Max. Zerstäuben der Körper Durch das Ultraviolette Licht [Pulverização dos corpos pela luz ultravioleta]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 273, n. 7, p. 443-456, 1889. <https://doi.org/10.1002/andp.18892730706>.

LEWIS, Gibert Newton. The conservation of photons. **Nature**, [S.l.], v. 118, p. 874-875, 1926. <https://doi.org/10.1038/118874a0>.

LIANG, Ling L.; CHEN, Sufen; XIAN, Chian; KAYA, Osman Nafiz. Assessing preservice elementary teachers' views on the Nature of Scientific Knowledge: a dual-response instrument. **Asia-Pacific Forum on Science Learnin and Teaching**, Hong Kong, v. 9, n. 1, p. 1-20, 2008.

LLOYD, David R. What was measured in Millikan's study of the photoelectric effect? **American Journal of Physics**, United States, v. 83, n. 9, p. 765-772, 2015. <http://dx.doi.org/10.1119/1.4928173>.

LIMA, Nathan Willig; JUNIOR, Estevão Antunes; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio. Uma análise bakhtiniana dos enunciados sobre o efeito fotoelétrico em livros didáticos do ensino superior. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, n. extra, p. 1.947-1.951, 2017.

LINDEMANN, Frederick Alexander. Über die Berechnung der Energiefrequenzen der Elektronen im selektiven Photoeffekte [Sobre o cálculo das frequências naturais dos elétrons no efeito fotoelétrico seletivo]. **Berichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, Braunschweig, v. 13, p. 482, 1911.

LIVINGSTON, Dorothy Michelson. **The master of light: a biography of Albert Michelson**. New York: Scribner, 1973.

LORENTZ, Hendrik Antoon. Die Hypothese der Lichtquanten [A hipótese dos *quanta* de luz]. **Physikalische Zeitschrift**, Deutschland, v. 11, p. 349-354, 1910a.

LORENTZ, Hendrik Antoon. Alte und neue Fragen der Physik [Velhos e novos problemas da Física]. **Physikalische Zeitschrift**, Deutschland, v. 11, p. 1.234-1.257, 1910b.

LUKIRSKY, Pavel.; PRILEŽAEV, Sergey. Über den normalen photoeffekt. **Zeitschrift für Physik**, Leningrado, v. 49, p. 236-258, 1928. <https://doi.org/10.1007/BF01340480>

MACH, Ernest. On thought experiments. In: MACH, Ernest; Hiebert, Erwin Nick. **Knowledge and Error: sketches on the psychology of enquiry** (Vienna Circle Collection, vol 3.). Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1976, Cap. XI, p. 134-147. https://doi.org/10.1007/978-94-010-1428-1_11.

MANGILI, Arthur Issa. Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a História da Ciência na sala de aula. **História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces**, São Paulo, v. 6, p. 32-48, 2012.

MARTINS, André Ferrer Pinto. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 3, p. 703-737, 2015. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p703>.

MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira. História da Ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132005000200011>.

MARTINS, Roberto de Andrade. Sobre o papel da História da Ciência no ensino. **Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, n. 9, p. 3-5, 1990. Disponível em: <https://www.ghhc.usp.br/server/pdf/ram-42.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

MARTINS, Roberto de Andrade. A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 20, n. 24, p. 373-391, 1998.

MARTINS, Roberto de Andrade. Como não escrever sobre História da Física: um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 113-128, 2001.

MARTINS, Roberto de Andrade; ROSA, Pedro Sérgio. **História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula de Einstein a De Broglie**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino; PRESTES, Maria Elice Brzezinski. History and Philosophy of Science in Science Education, in Brazil. In: MATTHEWS, Michael R. (org.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 2.271-2.300.

MASSONI, Neusa Teresinha. **Estudo de caso etnográfico sobre a contribuição de diferentes visões epistemológicas contemporâneas na formação de professores de Física**. 2005. 275 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MATTHEWS, Michael R. **Science teaching**: the role of history and philosophy of science. New York: Routledge, 1994.

MATTHEWS, Michael R. Changing the focus: from Nature of Science (NoS) to Features of Science (FoS). In: KHINE, Myint Swe (org.). **Advances in Nature of Science research**: concepts and methodologies. New York: Springer, 2012. p. 3-27.

MATTOS, Mariana Silva de Mello; SILVA, Edson Pereira. Natureza da Ciência (NdC): uma revisão dos artigos sobre o tema na pesquisa em ensino de biologia no Brasil. **ACTIO: Docência em Ciências**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 1-24, 2022.

MAXWELL, James Clerk. **A treatise on electricity and magnetism**. Oxford: Clarendon Press, 1873.

MAXWELL, James Clerk. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. New York: Dover Publication, 1965. v. 1, p. 451.

MCCOMAS, William F. Ten myths of Science: reexamining what we think we know about the Nature of Science. **School Science and Mathematics**, [S.l.], v. 96, n. 1, p. 10-16, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1996.tb10205.x>.

MCCOMAS, William F. The principal elements of the nature of science: dispelling the myths. In: MCCOMAS, William F. (org.). **The Nature of Science in Science Education**: rationales and strategies. Dordrecht: Springer, 1998. p. 53-70. https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47215-5_3.

MCCOMAS, William F. Keys to teaching the nature of science. **Science Teacher**, [S.l.], v. 71, n. 9, p. 24-27, 2004. <https://www.jstor.org/stable/24155554>.

MCCOMAS, William F.; CLOUGH, Michael P.; ALMAZROA, Hiya. The role and character of the Nature of Science in Science Education. In: MCCOMAS, William F. (org.). **The Nature of Science in Science Education**: rationales and strategies. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 3-39. https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47215-5_1.

MCCOMAS, William F.; OLSON, Joanne K. The Nature of Science in international science education standards documents. In: MCCOMAS, William F. (org.). **The Nature of Science in Science Education**: rationales and strategies. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 41-52. https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47215-5_2

MCCORMMACH, Russel. Henri Poincaré and the quantum theory. **Isis**, [S.l.], v. 58, n. 1, p. 37-55, 1967.

MEHRA, Jagdish. **The solvay conferences on Physics**: aspects of the development of Physics Since 1911. Netherlands: Springer, 2012 [1. ed. 1975].

MEHRA, Jagdish; RECHENBERG, Helmut. **The historical development of quantum theory**. New York: Springer, 1982. v. 1, parte 1: The quantum theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: its foundation and the rise of its difficulties 1900-1925.

MELO, Marlene Rios; NETO, Edmilson Gomes de Lima. Dificuldades de ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 112-122, 2013.

MERRITT, Ernest George. The influence of light upon the discharge of electrified bodies I. **Science**, New York, v. 4, n. 102, p. 853-865, 1986a. <https://doi.org/10.1126/science.4.102.853>.

MERRITT, Ernest George. The influence of light upon the discharge of electrified bodies II. **Science**, New York, v. 4, n. 103, p. 890-900, 1986b. <https://doi.org/10.1126/science.4.103.890>.

MERRITT, Ernest George; STEWART, Oscar Minton. The development of cathode rays by ultraviolet light. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 11, n. 4, p. 230-250, 1900.

MERTON, Robert King. **Social theory and social structure**. 2.ed. New York: Free Press, 1968.

MILLIKAN, Robert Andrews. Some new values of the positive potentials assumed by metals in a high vacuum under the influence of ultra-violet light. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 30, n. 2, p. 287-288, 1910.

MILLIKAN, Robert Andrews. On the cause of the apparent differences between spark and arc sources in the imparting of initial speeds to photoelectrons. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 1, n. 1, p. 60-84, 1913a.

MILLIKAN, Robert Andrews. Atomic theories of radiation. **Science**, New York, v. 37, n. 943, p. 119-133, 1913b.

MILLIKAN, Robert Andrews. A direct determination of “*h*”. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 4, n. 1, p. 73-75, 1914. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.73.2>.

MILLIKAN, Robert Andrews. Einstein’s photoelectric equation and contact electromotive force. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 7, n. 1, p. 18-32, 1916a. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.7.18>.

MILLIKAN, Robert Andrews. Quantum relations in photo-electric phenomena. **National Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 2, n. 2, p. 78-83, 1916b.

MILLIKAN, Robert Andrews. A direct photoelectric determination of Planck’s “*h*”. **Physical Review**, United States, v. 7, n. 3, p. 355-388, 1916c. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.7.355>.

MILLIKAN, Robert Andrews. **The electron, its isolation and measurement and the determination of some of its properties**. 1. ed. Chicago: The University of Chicago, 1917 [2. ed. 1924]. Disponível em: <https://archive.org/details/electronitsisola00mill/page/238/mode/2up>. Acesso em: 4 set. 2023.

MILLIKAN, Robert Andrews. The distinction between intrinsic and spurious contact E.M.F.s and the question of the absorption of radiation by metals in quanta. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 18, n. 3, p. 236-244, 1921. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.18.236>.

MILLIKAN, Robert Andrews. **Electron (+ or -), protons, photons, neutrons and cosmic rays**. Chicago: University of Chicago, 1935.

MILLIKAN, Robert Andrews. **The autobiography of Robert A. Millikan**. New York: Prentice-Hall, 1950.

MILLIKAN, Robert Andrews. The electron and the light-quant from the experimental point of view. *In*: THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1922-1941**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. cap. 2, p. 54-66 [original de 1924].

MILLIKAN, Robert Andrews; GALE, Henry Gordon. **A first course in Physics**. Boston: Ginn, 1906.

MILLIKAN, Robert Andrews; SOUDER, Wilmer Henry. Effect of residual gases on contact E.M.F.'s and photo-currents. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 4, n. 1, p. 73, 1914. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.73>.

MILLIKAN, Robert Andrews; SOUDER, Wilmer Henry. Experimental evidence for the essential identity of the selective and normal photoelectric effect. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, United States, v. 2, n. 1, p. 19-24, 1916. <https://doi.org/10.1073/pnas.2.1.19>.

MILLIKAN, Robert Andrews; WINCHESTER, George. The influence of temperature upon photoelectric effects in a very high vacuum, and the order of photoelectric sensitiveness of the metals. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 14, n. 79, p. 188-2010, 1907. <https://doi.org/10.1080/14786440709463670>.

MILLIKAN, Robert Andrews; WRIGHT, James Remus. The effect of prolonged illumination on photoelectric discharge in a high vacuum. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 34, n. 1, p. 62-80, 1912.

MOREIRA, Marco Antônio; OSTERMANN, Fernanda. Sobre o ensino do método científico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 108-117, 1993.

MOREIRA, Marco Antonio. **Aprendizagem Significativa**. São Paulo: LF, 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de Aprendizagem**. 2. ed. São Paulo: EPU, 2014.

MOSSE, George Lachmann. **Nazi culture: intellectual, cultural, and social life in the Third Reich**. New York: Grosset & Dunlap, 1966.

MOURA, Breno Arsioli. O que é Natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 32-46, 2014.

MULLIGAN, Joseph Francis. **Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894): a collection of articles and addresses**. New York: Routledge, 1994.

MULLIGAN, Joseph Francis. F. Heinrich Hertz and Philipp Lenard: two distinguished physicists, two disparate men. **Physics in Perspective**, [S.l.], v. 1, p. 345-366, 1999. <https://doi.org/10.1007/s000160050027>.

NIAZ, Mansoor; KLASSEN, Stephen; McMILLAN, Barbara; METZ, Don. Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications of general physics textbooks. **Science & Education**, New Jersey, v. 94, n. 5, p. 903-931, 2010. <https://doi.org/10.1002/sce.20389>.

NISIO, Sigeko. The formation of the Sommerfeld quantum theory of 1916. **Japanese Studies in the History of Science**, London, v. 12, p. 39-78, 1973.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica**. 4. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2002. v. 2: Fluidos, oscilações & ondas e calor.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física básica: ótica, relatividade e física quântica**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. v. 4.

OLIVEIRA, Rilavia Almeida de. **Natureza da Ciência por meio de narrativas históricas: os debates sobre a natureza da luz na primeira metade do século XIX**. 2019. 232 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

OLPIN, Arthur R. Method of enhancing the sensitiveness of alkali metal photoelectric cells. **Physical Review**, v. 36, n. 2, p. 251-295, 1930. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.36.251>

OSBORNE, Jonathan; COLLINS, Sue; RATCLIFFE, Mary; MILLAR, Robin; DUSCHL, Rick. What “ideas about-science” should be taught in school science? a Delphi study of the expert community. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 40, n. 7, p. 692-720, 2003. <https://doi.org/10.1002/tea.10105>.

PAGE, Leigh. The photoelectric effect. **American Journal of Science**, new Haven, v. 36, n. 215, p. 501-508, 1913. Disponível em: <https://archive.org/details/americanjourna4361913newh/page/n7/mode/2up>. Acesso em: 25 jan. 2024.

PASCO®. **Photoelectric effect apparatus: Model SE-6609**. Instruction Manual 012-13943B. Roseville: 2020. Disponível em: https://cdn.pasco.com/product_document/Photoelectric-Effect-Apparatus-Manual.pdf. Acesso em: 29 jan. 2023.

PASSON, Oliver. The quasi-history of early quantum theory. **Physics**, v. 4, n. 3, p. 880-891, 2022. <https://doi.org/10.3390/physics4030057>.

PEDUZZI, Luiz Orlando de Quadro; RAÍCIK, Anabel Cardoso. Sobre a Natureza da Ciência: asserções comentadas para uma articulação com a História da Ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 25, n. 2, p. 19-55, 2020. <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2020v25n2p19>

PEDUZZI, Luiz Orlando de Quadro; RAICIK, Anabel Cardoso. De Mach ao ‘novo experimentalismo’: um resgate histórico-epistemológico de experimentos de pensamento. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 14, n. 2, p. 209-234, 2021. <https://doi.org/10.53727/rbhc.v14i2.153>

PEREIRA, Felipe Prado Corrêa; GURGEL, Ivã. O ensino da Natureza da Ciência como forma de resistência aos movimentos anticiência: o realismo estrutural como contraponto ao relativismo epistêmico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 37, n. 3, p. 1.278-1.319, 2020.

PERRIN, Jean Baptiste. Nouvelles propriétés des rayons cathodiques. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 121, p. 1130-1134, 1895.

PERRIN, Jean Baptiste. New experiments on the cathode rays. **Nature**, v. 53, p. 298-299, 1896. [Traduzido de um artigo previamente publicado em Academia de Ciências de Paris, em 30 dezembro de 1895].

PIMENTEL, Jonald L. A note on the usage of Likert Scaling. **USM R&D Journal**, Mindanao, v. 18, n. 2, p. 109-112, 2010.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. Über eine Verbesserung der Wien'schen Spektralgleichung [Sobre uma melhoria da equação espectral de Wien]. **Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, Augsburg, v. 2, p. 202-204, 1900a.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum [Sobre a teoria da lei de distribuição de energia no espectro normal]. **Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, Augsburg, v. 2, p. 237-245, 1900b.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum [Sobre a lei da distribuição de energia no espectro normal]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 4, p. 553-563, 1901. <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. Über die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 342, n. 4, p. 642-656, 1912. <https://doi.org/10.1002/andp.19123420403>.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. **Scientific autobiography and other papers**. New York: Philosophical Library, 1949.

POHL, Robert W.; PRINGSHEIM, Peter. On the long-wave limits of the normal photoelectric effects. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 26, n. 156, p. 1017-1.024, 1913. <https://doi.org/10.1080/14786441308635051>.

POPPER, Karl. **A lógica da pesquisa científica**. Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. 2. ed. São Paulo: Cultrix, 2013.

PRAIA, João; GIL-PÉREZ, Daniel; VILCHES, Amparo. O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 13, n. 2, p. 141-156, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132007000200001>

RAMSAUER, Carl. Über die lichtelektrische Geschwindigkeitsverteilung und ihre Abhängigkeit von der Wellenlänge. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 45, n. 24, p. 1.121-1.159, 1914a.

RAMSAUER, Carl. Über eine direkte magnetische Methode zur Bestimmung der lichtelektrischen Geschwindigkeitsverteilung. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 45, p. 961-1002, 1914b. <https://doi.org/10.1002/andp.19143502302>.

RAYLEIGH, Lord. Remarks upon the law of complete radiation. **The London, Edinburg, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 49, n. 301, p. 539-540, 1900. <https://doi.org/10.1080/14786440009463878>.

REIS, Mari Aurora Favero; SERRANO, Agostinho de Andrade Neto. Pesquisa Bibliográfica em Historicidade, Conceitos e Contextos na Produção e Transformação da Luz por meio da Teoria Quântica. **Acta Scientiae**, v. 19, n. 3, p. 493-516, 2017.

RICHARDSON, Owen Willans. XXIII. The electron theory of contact electromotive force and thermoelectricity. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 23, n. 134, p. 263-278, 1912. <https://doi.org/10.1080/14786440208637220>.

RICHARDSON, Owen Willans. Note on the direct determination of h. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 4, n. 6, p. 522-523, 1914.

RICHARDSON, Owen Willans. Thermionic phenomena and the laws which govern them. In: THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1922-1941**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998. cap. 7, p. 224-236 [original de 1917].

RICHARDSON, Owen Willans; COMPTON, Karl Taylor. The photoelectric effect. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 24, n. 142, p. 575-594, 1912a. <https://doi.org/10.1080/14786441008637361>.

RICHARDSON, Owen Willans; COMPTON, Karl Taylor. The photoelectric effect. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 34, n. 5, p. 393-396, 1912b.

RIGHI, Augusto. Di alcuni nuouvi fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni: nota preliminare. **Rendiconti della Reale Accademia dei Lincei**, Roma, série 4, v. 4, p. 185-187, 1888. [cf. também Nota II, p. 498; Nota III, p. 578-580; Nota IV, p. 691-694; Nota V, p. 16-19; Nota VI, p. 66-67].

RIGHI, Augusto. **Repertorium der Physik** [...]. München: Oldenburg, 1889a. v. 25: Repertorium für Experimental-Physik, für Physikalische Technik, Mathematische [und] Astronomische Instrumentenkunde, p. 380.

RIGHI, Augusto. Osservazioni alla precedente lettera. **Il Nuouvo Cimento**, Roma, v. 26, p. 59-60, 1889b. <https://doi.org/10.1007/BF02709917>.

RIGHI, Augusto. Sulle traiettorie percorse nella convezione fotoelettrica, et su alcuni nuouvi fenomeni elettriciti nell'aria rarefata [Sobre as trajetórias percorridas na convecção fotoelétrica e

alguns novos fenômenos elétricos no ar rarefeito]. **Atti della Reale Accademia della Scienze dei Lincei – Rendiconti**, Roma, série IV, v. 6, p. 81-86, 1890a.

RIGHI, Augusto. Erwiderung auf die Bemerkungen des Hrn. W. Hallwachs. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 277, n. 11, p. 505-506, 1890b. <https://doi.org/10.1002/andp.18902771111>.

RODA, Rodolfo; MARTINS, Roberto de Andrade. Uma disputa sobre o sentido da Natureza da Ciência: uma análise da crítica de Michael Matthews à visão consensual de Norman Lederman. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 27, e21060, 2021. <https://doi.org/10.1590/1516-731320210060>.

RODRIGUES, Renato Felix; PEREIRA, Alexsandro Pereira de. A inferência à melhor explicação como heurística para abordar episódios históricos no ensino de ciências por meio de controvérsias explicativas. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 3, p. 557-576, 2020. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2020v25n3p557>

RODRIGUES, Renato Felix. A inferência à melhor explicação como heurística para o ensino de História da Ciência na formação de professores. 2021. 188 f. Tese (Doutorado em Ensino de Física) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ROSA, Paulo Ricardo da Silva. **Uma introdução à pesquisa quantitativa em ensino**. 1. ed. Campo Grande: Editora UFMS, 2013.

ROSBAUD, Paul. **Rosbaud correspondence and manuscripts, 1945**. College Park: American Institute of Physics, Coleção Samuel Goudsmit Papers, series IV, box 28, folder 42.

RUDNICK, J.; TANNHAUSER, D. S. Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect. **American Journal of Physics**, United States, v. 44, n. 8, p. 796-798, 1976. <https://doi.org/10.1119/1.10130>.

SALAS, Javier. Cientistas nazistas deixam de dar nome a duas crateras na Lua. **El País**, Madrid, 1 jul. 2020. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/ciencia/2020-07-01/cientistas-nazistas-deixam-de-dar-nome-a-duas-crateras-na-lua.html>. Acesso em: 28 fev. 2024.

SANTOS, Carlos Alberto dos. Millikan e a questão do potencial de contato no experimento do efeito fotoelétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. e3602, 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0321>.

SCHUSTER, Arthur. Experiments on the discharge of electricity through gases. (Second paper). **Proceedings of Royal Society of London**, London, v. 42, p. 371-379, 1887. <https://doi.org/10.1098/rspl.1887>.

SCHWEIDLER, Egon Ritter von. Die lichtelektrischen Ersc innen Die Emission negativer Elektronen von belichteten Oberflächen [Os fenômenos fotoelétricos: a emissão de elétrons negativos de superfícies iluminadas]. **Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik**, v. 1, p. 358–400, 1904.

SERRANO, Carlos. Os cientistas nazistas que tentaram desacreditar Einstein com argumentos racistas. **G1**, Rio de Janeiro, 13 dez. 2021. Disponível em:

<https://g1.globo.com/ciencia/noticia/2021/12/13/os-cientistas-nazistas-que-tentaram-desacreditar-einstein-com-argumentos-racistas.ghtml>. Acesso em: 28 fev. 2024.

SILVA, Ana Paula Bispo da; GUERRA, Andreia (org.). **História da ciência e ensino: fontes primárias e propostas para sala de aula**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

SILVA, Cibelle Celestino; MARTINS, Roberto de Andrade. A Teoria das Cores de Newton: um exemplo do uso da História da Ciência em sala de aula. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 9, n. 1, p. 53-65, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132003000100005>.

SILVA, Indianara. **Do grande elétron aos quanta de luz: Arthur Holly Compton e a física dos raios X e γ** . 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) – Universidade Federal da Bahia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, 2009.

SILVA, Indianara; FREIRE JR., Olival. A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semi-clássica a uma abordagem quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1601, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000100026>.

SILVA, Ronivan Sousa da; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Sobre as pesquisas relacionadas ao ensino do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 618-639, 2015. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p618>

SILVA, Ronivan Sousa da. **A abordagem do efeito fotoelétrico no ensino médio: Contribuições de uma unidade ensino potencialmente significativa**. Orientadora: Nádia Cristina Guimarães Errobidart. 201 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS. Campo Grande – MS, 2015. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/3217>. Acesso em 25/10/2021.

SOARES, Joana Menara Souza. **Análise da história do efeito fotoelétrico em livros didáticos de física para graduação**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2016.

STACHEL, John. **O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física**. 2. ed. Trad. Alexandre Carlos Tort. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2005.

STARK, Johannes. **Die Elektrizität in Gasen** [A eletricidade em gases]. Leipzig: J. A. Barth, 1902.

STARK, Johannes. **Nationalsozialismus und Wissenschaft**. Munich: Zentralverlag der NSDAP, 1934.

STRNAD, Janez. Die Austrittsarbeit beim Photoeffekt. **Praxis der Naturwissenschaften-Physik**, Köln, v. 11, p. 343-344, 1980.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Sur une sorte de courants electriques provoques par les rayons ultraviolets [Sobre os tipos de correntes elétricas provocadas por raios ultravioleta]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 106, p. 1.149, 1888a. [cf. também Aleksandr Grigorievich Stoletow, On a kind of electric current produced by ultra-violet rays, **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 26, n. 160, p. 317-319, 1888a].

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Sur les courants actino-électriques à travers l'air [Sobre as correntes actínio-elétricas através do ar]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 106, p. 1.593, 1888b.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Suite des recherches actino-électriques [Continuação das pesquisas actínio-elétricas]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 107, p. 91, 1888c.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Sur les phénomènes actino-électriques [Sobre os fenômenos actínio-elétricos]. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 108, p. 1.241-1.243, 1889a.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Актино-электрические исследования [As investigações actínio-elétricas]. **Journal Russian Physico-Chemical Society**, [S.l.], v. 21, p. 159, 1889b.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Lettera del prof. A. Stoletow alla direzione del giornale. **Il Nuouvo Cimento**, Roma, v. 26, p. 58-59, 1889c. <https://doi.org/10.1007/BF02709916>.

STOLETOW, Aleksandr Grigorievic. Sur les courants actino-électriques dans l'air raréfié [Sobre as correntes actínio-elétricas no ar rarefeito]. **Journal de Physique Théorique et Appliquée**, v. 9, n. 1, p. 468-473, 1890. <https://doi.org/10.1051/jphystap:018900090046800>.

STUDART, Nelson; MOREIRA, Ildeu de Castro. A comprovação da hipótese do quantum de luz: o Efeito Compton e sua repercussão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, p. e20240304, 2024.

STUEWER, Roger Harry. **Historical and philosophical perspectives of science**. Minneapolis: Minnesota University, 1970 (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, V).

STUEWER, Roger Harry. **The Compton Effect**: turning point in Physics. New York: Science History Publications, 1975.

STUEWER, Roger Harry. The compton effect: transition to quantum mechanics. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 512, n. 11, p. 975-989, 2000. <https://doi.org/10.1002/andp.200051211-1216>.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães; CALUZI, João José. A construção de avaliações escritas em unidades de ensino potencialmente significativas. **Revista de Enseñanza de la Física** (número extra), v. 33, p. 219-227, 2021.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães; CALUZI, João José. As concepções de Natureza da Ciência de estudantes de cursos técnicos integrados de nível médio. **Latin-American Journal Physics Education**, México, v. 16, n. 4, p. 4306-1/4306-10, 2022.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; CALUZI, João José; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Uma sistematização das críticas aos princípios heurísticos representativos da Natureza das Ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 40, n. 2, p. 315-356, 2023a. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2023.e92118>.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; CALUZI, João José; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Uma problematização sobre a Natureza das Ciências: análise da *Nobel Lecture* de Philipp Lenard e do movimento nazista “Deutsche Physik”. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 45, p. e20230188, 2023b. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0188>.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; CALUZI, João José; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard, Arthur Haas e J. J. Thomson. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 46, p. e20230369, 2024. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0369>.

SUTTINI, Ronivan Sousa da Silva; CALUZI, João José; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. A “*hipótese-h*” de Sommerfeld-Debye: uma teoria semiclássica dos raios X, raios γ e do efeito fotoelétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 47, p. e20240351, 2025. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0351>

SZILÁRD, Leó. Leó Szilárd: his versions of the facts. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 35, n. 3, part II, p. 55-59, 1979.

TEIXEIRA, Elder Sales. **A influência de uma abordagem contextual nas concepções sobre a Natureza da Ciência**: um estudo de caso com estudantes de Física da UEFS. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) – Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal de Feira de Santana, Salvador, 2003.

TEIXEIRA, Elder Sales; FREIRE JR, Olival; EL-HANI, Charbel Niño. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 15, n. 3, p. 529-556, 2009.

THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1901-1921**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998a [Physics 1905, Philipp Eduard Anton von Lenard].
THE NOBEL FOUNDATION (org.). **Nobel Lectures in Physics: 1922-1941**. Singapore: World Scientific Publishing, 1998b [Physics 1923, Robert Andrews Millikan].

THOMSON, Joseph John. On the velocity of the cathode rays. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 38, n. 233, p. 358-365, 1894. <https://doi.org/10.1080/14786449408620644>.

THOMSON, Joseph John. Cathode rays. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science** [série 5], London, v. 44, n. 269, p. 293-316, 1897. <https://doi.org/10.1080/14786449708621070>.

THOMSON, Joseph John. On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science** [série 5], London, v. 48, n. 295, p. 547-567, 1899. <http://dx.doi.org/10.1080/14786449908621447>.

THOMSON, Joseph John. **Conduction of Electricity Through Gases**. 1 ed. Cambridge: University Press, 1903.

THOMSON, Joseph John. XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 7, n. 39, p. 237-265, 1904a.

THOMSON, Joseph John. **Electricity and matter**. New York: Charles Scribner's Sons, 1904b.

THOMSON, Joseph John. XVII. On the electrical origin of the radiation from hot bodies. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 14, n. 80, p. 217-231, 1907. <https://doi.org/10.1080/14786440709463676>.

THOMSON, Joseph John. XVII. On the theory of radiation. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 20, n. 115, p. 238-247, 1910. <https://doi.org/10.1080/14786441008636893>.

THOMSON, Joseph John. LXVII. On the structure of the atom. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 26, n. 154, p. 792-799, 1913a. <https://doi.org/10.1080/14786441308635024>.

THOMSON, Joseph John. XCV. Structure of the atom. To the editors of the Philosophical Magazine. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 26, n. 156, p. 1.044, 1913b. <https://doi.org/10.1080/14786441308635054>.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

TROLAND, Leonard T. On the measurement of visual stimulation intensities. **Journal of experimental Psychology**, v. 2, n. 1, p. 1, 1917.

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Projeto Pedagógico do Curso de Física**: modalidades em licenciatura em Física, bacharelado em Física dos Materiais e bacharelado em Física Computacional (Currículo 1606). Bauru: UNESP, 2023. Disponível em: <https://www.fc.unesp.br/Home/Departamentos/Fisica/fisica/ppp-pdf-2.pdf>. Acesso em: 4 set. 2023.

VÁZQUEZ, Ángel; ACEVEDO, José Antonio; MANASSERO, María Antonia; ACEVEDO, Pilar. Cuatro paradigmas básicos sobre la Naturaleza de la Ciencia. **Argumentos de Razón Técnica**, Sevilha, n. 4, p. 135-176, 2001.

VILAS BOAS, Anderson; SILVA, Marcos Rodrigues; PASSOS, Marinez Meneghello; ARRUDA, Sergio de Mello. História da Ciência e Natureza da Ciência: debates e consensos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 30, n. 2, p. 287-322, 2013. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2013v30n2p287>.

WALKER, Mark. The rise and fall of an “Aryan” physicist. *In*: WALKER, Mark. **Nazi science: myth, truth, and the German atomic bomb**. Boston: Springer, 1995. p. 5-40. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6074-0_2.

WIEDEMANN, Eilhard; EBERT, Hermann. Ueber den Einfluss des Lichtes auf die electrischen Entladungen. **Annalen der Physik**, v. 269, n. 2, p. 241-264, 1888a.

WIEDEMANN, Eilhard; EBERT, Hermann. Ueber electrische Entladungen in Gasen und Flammen. **Annalen der Physik**, v. 271, n. 10, p. 209-264, 1888b.

WHEATON, Bruce R. Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889-1911. **Historical Studies in the Physical Sciences**, New York, v. 9, p. 299-322, 1978. <https://doi.org/10.2307/27757381>.

WHEATON, Bruce R. **The tiger and the shark**: empirical roots of wave-particle dualism. New York: Cambridge University, 1983.

WHITAKER, Martin Andrew B. History and quasi-history in physics education - Part I. **Physics Education**, v. 14, n. 2, p. 108-112, 1979a. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/14/2/009>.

WHITAKER, Martin Andrew B. History and quasi-history in physics education. II. **Physics Education**, v. 14, n. 4, p. 239-242, 1979b. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/14/4/313>.

WIEN, Wilhelm [Willy]. Über die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers [Sobre a distribuição de energia no espectro de emissão de um corpo negro]. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 294, n. 8, p. 662-669, 1896. <https://doi.org/10.1002/andp.18962940803>.

WIEN, Wilhelm [Willy]. Die elektrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen (As propriedade eletrostáticas dos raios catódicos). **Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft** (Berlin), v. 16, p. 165-172, 1897.

WRIGHT, James Remus. The positive potential of aluminum as a function of the wave-length of the incident light. **Physical Review Journals Archive**, Washington, v. 33, series 1, p. 43-52, 1911. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.33.43>.

YOUNG, Hugh David; FREEDMAN, Roger A. **Física IV – Sears e Zemansky: ótica e física moderna**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

ZEEMAN, Pieter. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance. **Communication from the Physical Laboratory at the University of Leiden**, Leiden, n. 33, p. 3-19, 1896.

APÊNDICE A

PLANOS DE AULA:

DISCIPLINA HISTÓRIA DA CIÊNCIA 2023-1



Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP.
Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023)
Plano de Aula: Semana 01 (14 de março de 2023)



I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- A abordagem tradicional da História das Ciências nos cursos de graduação em Física.
- As possíveis contribuições da História das Ciências para o ensino de ciências.
- Proposição de um curso de História das Ciências com ênfase na história do “efeito fotoelétrico”.
- Programa da disciplina História da Ciência 2023-1.

III. Objetivos da Aula

- Identificar as expectativas dos estudantes quanto ao conteúdo a ser abordado no decorrer do curso de História das Ciências;
- Identificar, de acordo com as expectativas iniciais dos estudantes, quais são as possíveis contribuições de um curso de História das Ciências para formação (e atuação) de professores de física;
- Apresentar (e justificar) o Programa da Disciplina de História das Ciências 2023-1.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Ideias de senso comum sobre:
 - ✓ A disciplina de História das Ciências
 - ✓ O papel da História das Ciências no ensino de ciências
 - ✓ O que é a Ciência? Quais áreas ou disciplinas são legitimamente científicas?

V. Procedimentos de ensino

19h00min - 19h20 min [20 minutos]:

Recepção dos estudantes. Organização da sala de aula (cadeiras, multimídia, computador etc.). Lista de Presença. Apresentação dos dois professores.

19h20min - 19h40min [20 minutos]:

Tempo destinado aos estudantes para responder às seguintes perguntas iniciais (com respostas registradas por escrito) [*Observação: De certa forma, as respostas ajudam a sondar a “visão de ensino de ciências” dos estudantes e o papel da H.C. nessa perspectiva*].

- (1) Quais as possíveis contribuições de um curso de História das Ciências para a formação (e atuação) de futuros professores de física?
- (2) Quais são suas expectativas quanto ao conteúdo a ser abordado neste curso de História das Ciências?
- (3) Qual a sua “familiaridade” com textos ou livros sobre a História e Divulgação das Ciências (ou da Física)?
- (4) Como você responderia à pergunta: “O que é a Ciência?”
- (5) Considerando sua resposta anterior, no contexto da história geral, quando a atividade científica teve início?

19h40min - 20h10min [30 minutos]:

Socialização e comentários a respeito das respostas elaboradas pelos estudantes às perguntas iniciais.

20h10min - 20h30min [20 minutos]:

Leitura em sala de aula do **Texto 1: “Sobre o Papel da História da Ciência no Ensino”** (Martins, 1990).
[Observação: Os estudantes deverão ressaltar qual(is) argumento(s) apresentados pelo autor são pertinentes ou convincentes de acordo com sua perspectiva e visão de futuro professor de física].

20h30min - 21h00min [30 minutos]:

Socialização e comentários a respeito das respostas elaboradas pelos estudantes.

21h00min - 21h15min: Intervalo de Descanso. [15 minutos]:

21h15min - 21h45min [30 minutos]:

Apresentação do Programa de Ensino da Disciplina de História das Ciências 2023-1.

- (1) Como tradicionalmente é o programa de ensino de uma disciplina de História das Ciências?
- (2) Quais as vantagens e desvantagens de uma disciplina tradicional de História das Ciências?
- (3) Por que optamos por uma “disciplina alternativa” de História das Ciências? Qual a finalidade desse curso? (ver Texto 01)
- (4) Por que escolhemos a “**história do efeito fotoelétrico**” como estudo de caso?
- (5) Quais as vantagens e desvantagens dessa “disciplina alternativa”?
- (6) Destacar a relação entre aspectos de História, Filosofia e Sociologia das Ciências e sua contribuição para melhoria da educação científica contemporânea.
- (7) Cronograma de aulas do curso de História das Ciências em 2023.

21h45min - 22h30min [45 minutos]:

(1) Explicar a Metodologia de Avaliação da Disciplina:

(2) Elementos Avaliativos:

- *Memórias & Reflexões*, de caráter subjetivo decorrentes da aula (*livre criação do estudante*).
 Orientações:
 - *Data; pessoas presentes; local; etc.*
 - *Questões e temas abordados;*
 - *Objetivos da aula*
 - *O que foi realizado durante a aula? Como as atividades foram realizadas?*
 - *Como o assunto abordado foi compreendido por você? Que significados você construiu?*
 - *Houve alguma mudança ou reforço em suas convicções prévias? Quais?*
 - *Quais “questões” (respondidas ou não) e “temas” você considerou pertinentes?*
 - *Quais falas ou argumentos você apresenta nítida discordância? Por quê?*
 - *Esclarecimentos que ainda são necessários?*
 - *Comentários e observações adicionais.*
- Questionários sobre História das Ciências e sobre a Natureza das Ciências;
- Participação *in loco* (em sala de aula) individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico e autorreflexivo diante de questões e temas abordados durante a disciplina;
- Elaboraões escritas individuais e/ou coletiva (textos, relatórios etc.);
- Avaliação conceitual de aprendizagem sobre o tópico “efeito fotoelétrico”;
- Três seminários temáticos;

Observação: Destacar que as atividades avaliativas serão corrigidas no máximo uma vez pelos professores, os quais fornecerão feedback e sugestões de refacção quando pertinente. Caberá aos estudantes seguirem (ou não) as sugestões dos professores para entrega final da atividade avaliativa como elemento constituinte do portfólio.

22h30min - 23h00min: Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- ✓ Participação *in loco* (em sala de aula) individual e/ou coletiva nas discussões e reflexões.
- ✓ Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados.

- ✓ Memórias de aula e reflexões subjetivas decorrentes (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- ✓ Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 1.
- ✓ Sugerir a busca de informações nos livros didáticos acerca do conteúdo “efeito fotoelétrico”.
- ✓ Sugestão (Séries e Filmes): *Genius* (Einstein, 2017); *Radioactive* (Marie Curie, 2019)
- ✓ Lembre para a próxima aula: Aplicação do Questionário Inicial sobre a Natureza da Ciência

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 2 (21 de março de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, *campus* Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- Aplicação do “**Questionário Inicial VOSE-RCN**” sobre aspectos da NdC (*NOS tenets*):
 1. Sobre os Modelos Científicos.
 2. Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro) / (leis e teorias)
 3. Sobre o Uso de Imaginação, Criatividade e Analogias no trabalho científico.
 4. Sobre as Teorias e Leis Científicas
 5. Sobre o Processo de Validação do Conhecimento Científico
 6. Sobre a Natureza das Observações Experimentais (objetividade x subjetividade)
 7. Sobre as Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica (não neutralidade)

III. Objetivos da Aula

- Coletar dados para, posteriormente, caracterizar as concepções prévias dos estudantes sobre diferentes aspectos da NdC início da disciplina de História das Ciências 2023-1.
- Estimular discussões e reflexões quanto à sete diferentes características associadas ao processo de construção do conhecimento científico.
- Despertar a curiosidade dos estudantes quanto às complexidades e peculiaridades da descrição da atividade científica.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunçores)

- Ideias prévias (até mesmo de senso comum) sobre alguns aspectos importantes relacionados a processo de construção do conhecimento científico.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula (cadeiras, multimídia etc.). Lista de Presença.

19h10min □ 19h20min [10 minutos]:

Tempo destinado à entrega e justificativa da aplicação do “Questionário Inicial VOSE-RCN”. Leitura e esclarecimentos acerca das instruções.

19h20min □ 19h40min [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder às questões 1 e 2.

19h40min □ 120h00min [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 3.

20h00min □ 20h10min [10 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 4.

20h10min □ **20h20min** [10 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 5.

20h20min □ **20h40min** [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 6.

20h40min □ **21h00min** [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 7.

121h00min □ **21h20min** [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 8.

21h20min □ **21h30min** [10 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 9.

21h30min □ **21h50min** [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 10.

21h50 min □ **22h10min** [10 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 11.

22h10 min □ **22h30min** [20 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder à questão 12.

22h30min □ **23h00min**): Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- ✓ Respostas dos estudantes ao “Questionário Inicial VOSE-RCN”.
- ✓ Memórias de aula e reflexões subjetivas decorrentes (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- ✓ Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 2. Deve-se analisar os sete aspectos abordados no Questionário VOSE-RCN. Em particular, os estudantes deverão elaborar justificativas gerais, de caráter sucinto, em relação aos itens em que assinalaram “*discorda*” e “*discorda fortemente*”.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 03 (28 de março de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- O que é leitura? O que é saber ler?
- Estratégias de leituras de textos científicos.
- “*Metodologia dos Três Olhares*” como estratégia de leitura.
- Construção de “fluxogramas” com base em um texto científico.

III. Objetivos da Aula

- Orientar os estudantes quanto à estratégia de leitura de textos durante o curso (sugestão: construção de fluxograma);
- Discutir a “*Metodologia dos Três Olhares*” como estratégia de leitura de textos científicos;
- Explicar quais atividades avaliativas serão solicitadas a partir da leitura dos textos acadêmicos e históricos, bem como a dinâmica das aulas pré e pós leituras.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Concepções prévias (até mesmo de senso comum) sobre “O que é leitura?” “O que é saber ler?”
- Estratégias subjetivas (métodos, técnicas etc.) enquanto leitores de texto;
- Concepções a respeito da construção de fluxogramas, mapas mentais, mapas conceituais etc.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h20min [10 minutos]:

Tempo destinado à explicação/justificação do tema e dos objetivos da aula (Prof. Caluzi*).

19h20min □ 19h40min [20 minutos]:

Tempo destinado à leitura do **Texto 2: “Os Cientistas Nazistas que Tentaram Desacreditar Einstein com Argumentos Racistas”** (Serrano - BBC News, 2021).

19h40min □ 20h00min [20 minutos]:

Diálogo com os estudantes (*ações inconscientes em relação à leitura*). Perguntas orientadoras:

- Como você descreveria sua estratégia (método/postura) em relação ao texto antes da leitura?
- Como você descreveria sua estratégia (método/postura) em relação ao texto durante a leitura?
- Como você descreveria sua estratégia (método/postura) em relação ao texto após a leitura?

20h00min □ 20h30min [30 minutos]:

Aula Expositiva (apresentação de *slides* no programa *powerpoint*):

- *O que é a leitura?*
- *Quais elementos desempenham um papel importante na leitura e compreensão de um texto?*
- Tipos de leitura:

- *Fruição* (envolvimento passional, paixão, prazer)
- *Investigativa* (análise de discurso; sentidos implícitos no texto)
- *Acúmulo* de Informações (tomada de decisão; formar opinião)
- ***Didática*** (conceitos, princípios, teorias, apropriação de conhecimento)

- Diferentes estratégias de leituras (em sentido didático):
 - Seleção de Índice
 - Preditibilidade (antecipação de conteúdo e significado)
 - Inferência (complemento de informações)
 - **Construção de “fluxogramas” – *Metodologia de Três Olhares*.**

20h30min □ 21h00min [30 minutos]:

Apresentação da “*Metodologia de Três Olhares*” □ Construção de “fluxogramas”.

Estratégias “antes” da leitura (1º Olhar):

- Examine ligeiramente (superficialmente) todo o texto;
- Examine a estrutura do texto, procurando ler cabeçalhos, títulos, subtítulos etc.;
- Após breve exame, levante hipóteses (expectativas) acerca do conteúdo do material a ser lido;
- Pense a respeito da finalidade ou necessidade de realizar a leitura, na visão do autor do texto (ou acerca da intenção e objetivo educacional do professor quando fez a escolha por esse texto).

Perguntas direcionadas à “**APREENSÃO**”:

1. Quais informações o texto mostra explicitamente?
2. Qual o assunto principal (ideia-matriz) que será abordado no decorrer do texto?
3. Quais expectativas e/ou hipóteses podem ser levantadas *a priori* sobre o conteúdo a ser abordado no texto?

Estratégias “durante” a leitura (2º Olhar):

- Sublinhe as ideias ou palavras principais;
- Tome notas e faça comentários acerca de trechos específicos;
- Relacione as informações do texto com suas crenças e conhecimentos prévios sobre o assunto;
- Reflita acerca de implicações ou consequências do que o texto está lhe transmitindo;
- Quando não compreender uma palavra, frase ou parágrafo:
 - Releia;
 - Dê atenção às partes que os precederam;
 - Se possível, consulte uma fonte externa (outro livro, outra pessoa etc.);
 - Faça um destaque e traga sua dúvida para discussão em sala de aula.

Perguntas direcionadas à “**COMPREENSÃO**” (estrutura do texto):

1. Como o autor construiu o texto?
2. Como se deu a apresentação das ideias?
3. Como o texto foi organizado?
4. Qual a sequência lógica do texto?
5. Qual o público-alvo?
6. Esse texto remete a que em sua experiência de vida?

Estratégias “após o término” da leitura (3º Olhar):

- Avalie o quanto entendeu do texto e volta àquelas partes cuja compreensão não se sente seguro;
- Volte ao texto e releia os pontos mais relevantes;
- Procure recordar pontos fundamentais do assunto sem retomar ao texto;
- Reflita sobre as hipóteses levantadas inicialmente;

Perguntas direcionadas à “**INTERPRETAÇÃO**”:

1. Quais são os pontos mais relevantes do texto?
2. Que significados foram construídos a partir dos diferentes conceitos apresentados?
3. O que esse texto tem a ver com você (leitor), com sua vida?

4. Quais juízos de valor você construiu após a leitura?
5. Qual o resultado acerca das hipóteses levantadas *à priori*?

21h00min - 21h15min: Intervalo de Descanso. [15 minutos]:

21h15min □ 21h30min [15 minutos]:

Tempo destinado para construção coletiva do “**Fluxograma 1**” referente ao Texto 2.

21h30min □ 21h45min [15 minutos]:

Tempo destinado à construção do “**Fluxograma 2**” referente ao Texto 03.

21h45min □ 22h15min [30 minutos]:

- Tempo destinado à leitura do **Texto 3: “Cientistas Nazistas Deixam de Dar Nome à Crateras na Lua”** (Salas - El País, 2020).
- Elaboração do “**Fluxograma 3**” referente às informações apresentadas nos textos 02 e 03.

22h15min □ 22h30min: [15 minutos]:

Explicar para os estudantes quais os tipos de atividades avaliativas serão solicitados a partir da leitura dos textos acadêmicos e a dinâmica das aulas pré e pós leitura:

- Elaboração de respostas a algumas perguntas-chave, com intuito de fomentar as discussões.
- Elaboração de “*fluxogramas*” a partir das leituras de textos científicos (sentido didático);
- Apresentação de “seminários coletivos”;
- Elaboração de Memórias & Reflexões
- Exposição Oral (10 ~ 15 min) no início da aula subsequente (*observando o caráter democrático de oportunidade de expressão*);
- Discussões em pequenos grupos:
 - Elaboração de respostas às questões previamente elaboradas pelos professores;
 - Socialização das conclusões com o coletivo em sala de aula.
- Tempo de leitura (em média, *01 página: 5 ~ 7 min*). **Logo, reserve cerca de 03 horas somente para leituras semanais extraclasse de textos acadêmicos e históricos.**

22h30min □ 23h00min: Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias de aula e reflexões subjetivas decorrentes (*livre criação do estudante*).
- Construção dos *Fluxogramas 1, 2 e 3*.

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 3.
- Leitura (prévia) para próxima aula: **Texto 4: “Como Não Escrever sobre História da Física: um manifesto historiográfico”** [17 páginas] (Martins, 2001).
- Construir um fluxograma acerca do Texto 4.
- Formar grupos para apresentação **1º Seminário Coletivo** (preencher planilha disponibilizada).

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 4 (04 de abril de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- Narrativas pseudo-história nos livros didáticos.
- A relação entre narrativas pseudo-históricas e a transmissão (e o reforço) de imagens distorcidas e estereotipadas sobre o processo de construção do conhecimento científico (e.g., *metodologia científica experimental hipotético-dedutiva*).

III. Objetivos da Aula

- Problematicar a presença de *narrativas pseudo-história* na formação de futuros professores com base em textos didáticos.
- Discutir os principais elementos que podem sinalizar a presença de uma *narrativa pseudo-história* em um texto didático e acadêmico (Allchin, 2004).
- Discutir como as *narrativas pseudo-histórias* atuam intencionalmente na promoção de imagem distorcidas e estereotipadas sobre Natureza da Ciência.
- Estimular a discussão e a autorreflexão acerca da responsabilidade do professor quanto às concepções de Natureza da Ciência que são (in)conscientemente transmitidas e fomentadas em sua prática docente.
- Analisar um “Estudo de Caso”: Texto 5 (Lawson, 2000).

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Teorias (antigas e modernas) a respeito da circulação sanguínea;
- Ideias prévias (e até mesmo de senso comum) sobre como a ciência funciona.
- Metodologia Científica Experimental Hipotético-Dedutivo (o “método científico”).

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Entrega de Atividades. Lista de Presença.

19h20min □ 20h00min [40 minutos]:

Socialização da percepções e comentários dos estudantes sobre a leitura (e construção do fluxograma) do **Texto 4: “Como não escrever sobre História das Ciências”** (Martins, 2001). Objetivo Principal. Intencionalidade. Resultados. Conclusão.

20h00min □ 20h20min [20 minutos]:

Aula Expositiva/Dialogada (slides): introdução e contextualização da temática abordada no trabalho de Allchin (2004).

20h20min □ 20h30min [10 minutos]:

Aula Expositiva/Dialogada (slides): Definições das palavras-chave **Whigg**, **Pseudo**, **Quasi** e **Hagio** no contexto da literatura de pesquisa em ensino de ciências e em história, filosofia, sociologia das ciências.

20h30min □ 20h50min [20 minutos]:

Tempo destinado à leitura, anotações e dúvidas sobre o **Texto 05 – “A Generalidade do Raciocínio Hipotético-Dedutivo: tornando o pensamento científico explícito [Teorias Iniciais do Fluxo Sanguíneo & A Pesquisa de William Harvey]”** (Lawson, 2000, p. 482-485, tradução nossa).

20h50min □ 21h00min [10 minutos]:

Apontamentos dos estudantes quanto à possíveis erros historiográficos grosseiros e bastante evidentes. Na sequência, será realizada uma discussão e reflexão sobre cada um dos pontos indicados.

21h00min - 21h15min: Intervalo de Descanso. [15 minutos]:

21h15min □ 21h30min [15 minutos]:

Aula Expositiva/Dialogada (com auxílio de slides no programa powerpoint). Discussão dos principais elementos (erros historiográficos grosseiros) que sinalizam a presença de uma *narrativa pseudo-histórica* no trabalho de Lawson (2000).

Tema 01 – Reconstrução Histórica. Reconstruções podem ser facilmente moldadas por retrospecto histórico (omissões, seleção pré-definida e distorções de fatos históricos relevantes)

“Vamos começar com as primeiras teorias do fluxo sanguíneo e a pesquisa clássica de William Harvey para ver como seu pensamento pode ser expresso na forma de argumentos hipotético-dedutivos” (p. 482).

“O raciocínio hipotético-dedutivo subjacente ao seu experimento pode ser reconstruído como se segue:” (p. 483).

21h30min □ 21h40 min [10 minutos]:

Tema 02 – Simplicidade exagerada na resolução de longas controvérsias científicas.

“Para argumentar a favor de seu quinto postulado e contra a ideia antiga de fluxo e refluxo, Harvey concebeu um experimento que é ao mesmo tempo elegante e surpreendente em sua simplicidade e importância” (p. 483).

Tema 03 – Dramatização exagerada na resolução de longas controvérsias científicas.

“Graças ao uso do raciocínio hipotético-dedutivo, quando os capilares foram finalmente evidenciados empiricamente, a teoria ganhou um grande impulso e a teoria de Galeno finalmente sofreu um golpe fatal” (p. 484).

21h40 min □ 21h50min [10 minutos]:

Tema 04 – Descrição não problemática da construção dos novos modelos científicos a respeito da circulação sanguínea. (Uma descrição “não problemática” é uma forte pista para o leitor interpretar a confiabilidade relativa de um episódio histórico das ciências).

“Como Hipócrates e Galeno antes dele, Harvey ficou impressionado com uma analogia. Mas a analogia orientadora de Harvey não era o fluxo e refluxo das marés. Em vez disso, era o modelo de órbitas circulares dos planetas e a crença de que os padrões planetários em larga-escala deveriam ser repetidos (ecoar) em sistemas fisiológicos de pequena escala. Assim, Harvey se propôs a descobrir os padrões circulares de fluxo sanguíneo” (p. 482, grifo nosso).

21h50 min □ 22h00min [10 minutos]:

Tema 05 – Contexto histórico-científico distorcido temporalmente. Contexto histórico original ignorado ou deturpado (“whiggismo”). Omissões seletivas.

“A teoria do fluxo sanguíneo de Galeno foi praticamente inquestionável por quase 1500 anos, até 1628, quando o médico inglês William Harvey (1578 – 1657) publicou um livro intitulado “Sobre o Movimento do Coração e do Sangue nos Animais” (“On the Motion of the Heart and Blood in Animals. O livro de Harvey continha uma teoria revolucionária da circulação sanguínea” (p. 482, grifo nosso).

22h00 min □ 22h10min [10 minutos]:

Tema 06 – Omissões e ênfases seletivas na narrativa histórica.

“A teoria do fluxo sanguíneo de Galeno foi praticamente inquestionável por quase 1500 anos, até 1628, quando o médico inglês William Harvey (1578 – 1657) publicou um livro intitulado “Sobre o Movimento do Coração e do Sangue nos Animais” (“On the Motion of the Heart and Blood in Animals. O livro de Harvey continha uma teoria revolucionária da circulação sanguínea” (p. 482, grifo nosso).

22h10 min □ 22h20min [10 minutos]:

Tema 07 – Genialidade “incomparável”, “infalível” e “exemplo-exemplar” do cientista protagonista na narrativa histórica.

“A teoria do fluxo sanguíneo de Galeno foi praticamente inquestionável por quase 1500 anos, até 1628, quando o médico inglês William Harvey (1578 – 1657) publicou um livro intitulado “Sobre o Movimento do Coração e do Sangue nos Animais” (“On the Motion of the Heart and Blood in Animals. O livro de Harvey continha uma teoria revolucionária da circulação sanguínea” (p. 482, grifo nosso).

22h20 min □ 22h30min [10 minutos]:

Tema 08 – Ceticismo da concorrência fundamentado exclusivamente em crenças pessoais ultrapassadas e conservadoras.

Tema 09 – Narrativa dramática “herói-sábio” vs “vilão-ignorante”:

“Independentemente de uma quantidade impressionante de evidências, tanto qualitativas quanto quantitativas, a favor da teoria da circulação e contra a alternativa de Galeno, muitos dos apoiadores de Galeno ainda se apegavam às crenças anteriores” (p. 482).

“Mas finalmente, em 1661, 14 anos após a morte de Harvey, o italiano Marcello Malpighi observou vasos capilares nos pulmões. A observação de Malpighi forneceu uma evidência muito convincente em apoio à teoria de Harvey (p. 484).

22h30 min □ 22h40min [10 minutos]:

Síntese dos 12 elementos que apontam para uma narrativa pseudo-história – “Sinais Alarmantes de Grosseiros” – de acordo com o trabalho de Allchin (2004).

22h40min □ 23h00min [20 minutos]:

Orientações gerais e específicas para a apresentação do “**Seminário Coletivo 1**” na próxima aula. Definição dos grupos. Ordem de apresentação. Tempo de Apresentação.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso;
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 4.
- Organização da apresentação do **Seminário Coletivo 1**: “*O efeito fotoelétrico nos livros didáticos de Ensino Superior: conceitos e narrativas pseudo-históricas*”. (Entregar para os estudantes uma folha escrita com todas as orientações e critérios de avaliação).

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 5 (11 de abril de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, *campus* Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- O fenômeno do efeito fotoelétrico (conceitos físicos, leis, teoria quântica da radiação).
- Narrativas pseudo-históricas nos livros-didáticos de ensino superior (cap: efeito fotoelétrico).
- Concepções sobre a Natureza da Ciência transmitida pelos livros-didáticos de ensino superior.

III. Objetivos da Aula

- Avaliar as habilidades/competências dos estudantes em apresentações orais (seminários).
- Avaliar a compreensão conceitual dos estudantes acerca do fenômeno do efeito fotoelétrico.
- Avaliar a autonomia dos estudantes com relação ao processo de ensino e de aprendizagem.
- Problematicar a presença de narrativas pseudo-histórias com base em textos didáticos.
- Analisar a presença de elementos de pseudo-história no capítulo sobre o efeito fotoelétrico.
- Discutir e refletir sobre imagens de senso comum sobre a Natureza da Ciência transmitida no capítulo referente ao efeito fotoelétrico em livros didáticos do ensino superior.
- Estimular a autorreflexão acerca da responsabilidade do professor tanto às narrativas pseudo-histórias quanto às concepções de Natureza da Ciência que são (in)conscientemente transmitidas pelos livros-didáticos de ensino superior.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Principais elementos que indicam a presença de uma narrativa pseudo-histórias em textos acadêmicos e em livros-didáticos;
- Metodologia Científica Experimental Hipotético-Dedutiva
- Lei da Conservação da Energia
- Modelos Científicos para Estrutura Atômica
- Teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (Física Clássica)
- Matemática Básica (ensino superior em licenciatura/bacharelado em Física)

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h40min [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 1 – Resnick & Halliday & Walker (10ª edição - 2016)

19h45min □ 20h15min [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 2 – Sears & Zemansky / Young & Feedman (14ª edição - 2016).

20h20min □ 20h50min [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 3 – Moysés Nussensveig (2ª edição – 2014).

21h00min □ **21h30min** [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 4 – Paul Tipler / Ralph Llewellyn (6ª edição – 2017).

21h30min □ **22h00min** [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 5 – Eisberg & Resnick (2ª edição – 1985).

22h00min □ **22h30min** [30 minutos]:

Apresentação do Grupo 6 – Alonso & Finn (2ª edição [espanhol]– 2000)

22h30min □ **23h00min**: Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- Ficha Avaliativa de Seminários (arguição; análises; compreensão; pontualidade; clareza etc.)
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso;
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (livre criação do estudante).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 5.
- Entrega da lista exercícios (conceituais) referente ao fenômeno do efeito fotoelétrico.

Ficha Avaliativa de Seminários

Cada professor irá atribuir no máximo **1,0 ponto** para cada item apresentado no quadro abaixo, e ao final fazer a soma para obtenção da nota média final da apresentação do seminário de cada grupo.

Itens	Critérios
1	Elaboração e Uso Adequado do Material de Apoio <i>O material utilizado na apresentação possui sequência-lógica?</i>
2	Clareza e Objetividade na Apresentação <i>Os “futuros professores” apresentaram clareza e objetividade em sua exposição oral? Quando necessário, mostraram exemplos ou analogias adequadas na explicação?</i>
3	Uso Padrão/Oficial de Linguagem Culta e Técnica <i>Os “futuros professores” fizeram uso correto das regras gramaticais padrão/oficial da língua portuguesa (brasileira)?</i>
4	Pontualidade <i>Os “futuros professores” realizaram a apresentação dentro o intervalo de tempo máximo estipulado (25 minutos)?</i>
5	Equipartição do Tempo de Fala <i>Os estudantes integrantes do grupo tiveram um intervalo de tempo de fala aproximadamente igual?</i>
6	Coerência com o “Referencial Teórico” (livro, artigo etc.) <i>O conteúdo da apresentação apresenta absoluta correspondência com o capítulo do livro-didático especificamente indicado?</i>
7	Quanto à Fundamentação Teórica-Conceitual <i>Os “futuros professores” demonstraram domínio conceitual sobre o tema proposto (o efeito fotoelétrico)?</i>
8	Análise da Presença de Elementos de Pseudo-História no Referencial <i>Foi realizada a análise acerca de possíveis elementos de pseudo-história acerca do capítulo indicado no livro-didático? Quais as conclusões?</i>
9	Análise da “Visão de NdC” Transmitida pelo Referencial <i>Foi realizada a análise acerca da “Visão de NdC” transmitida pelos autores no capítulo indicado no livro-didático? Quais as conclusões?</i>
10	Arguição perante às Perguntas dos Professores <i>Ao final da apresentação, os “futuros professores” foram cordiais e competentes na construção das respostas diante de questões elaboradas pelos professores?</i>

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 6 (18 de abril de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- O Experimento do Efeito Fotoelétrico;
 - A influência da **intensidade da luz** incidente no efeito fotoelétrico
 - A influência da **frequência da luz** incidente no efeito fotoelétrico
- Aspectos sobre a Natureza da Ciência:
 - Processo de Aceitação de novas teorias científicas
 - Metodologia Científica Experimental Hipotético-Dedutiva
 - A Natureza das Observações Experimentais
 - Inferência x Observação
 - Diferença entre “leis” e “teorias” científicas
 - Modelagem Científica

III. Objetivos da Aula

Ao final dessas 04 (quatro) aulas os estudantes (futuros professores) deverão ser capazes de:

- ANALISAR e AVALIAR empiricamente a influência da **intensidade de luz** no experimento do efeito fotoelétrico.
- ANALISAR e AVALIAR empiricamente a influência da **frequência da luz** de luz no fenômeno do efeito fotoelétrico.
- AVALIAR a correspondência entre as observações experimentais com as previsões da teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (Física Clássica).
- AVALIAR a coerência e a consistência entre as observações experimentais e a “hipótese de *quantum* de luz” de Albert Einstein (1905).
- AVALIAR a coerência e a consistência entre as observações experimentais e a “hipótese de gatilho” sugerida por Phillip Lenard (1902).
- ANALISAR e AVALIAR a compreensão conceitual do fenômeno do efeito fotoelétrico por meio de um “Relatório Científico-Experimental” com base nos dados coletados na aula.
- DISCUTIR e REFLETIR sobre algumas concepções prévias sobre a Natureza da Ciência apresentadas em modelos didáticos fechados de relatórios experimentais.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunçores)

- Teoria clássica do eletromagnetismo (Física Clássica)
- Conceitos físicos envolvidos no fenômeno do efeito fotoelétrico (leis, teoria etc.).
- Concepções sobre a Natureza da Ciência (metodologia científica, observações empírica etc.)
- Matemática Básica (ensino superior em licenciatura/bacharelado em Física)

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ **19h10min** [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ **20h00min** [50 minutos]:

Comentários gerais sobre alguns resultados parciais do “Questionário Inicial VOSE-RCN”:

- *Natureza das Observações Experimentais* (subjetividade na observação experimental).
- *Aceitação de Teorias Científicas* (subjetividade na preferência por uma dada interpretação).
- *O papel da Metodologia Científica “Experimental” na construção do conhecimento científico.*
- *Diferença entre “leis” e “teorias” científicas.*
- *Diferença entre “observação” e “inferência”.*

20h00min □ **20h30min** [30 minutos]:

- Ligar a lâmpada de mercúrio (Fonte de Luz Ultravioleta. Tempo de aquecimento em 30 min.)
- Vídeos de demonstração do fenômeno do efeito fotoelétrico com eletroscópio [5 min.]
- Demonstração do efeito fotoelétrico com eletroscópio de folhas carregadas [10 min].
- Entrega dos Roteiros Experimentais. Orientações e leitura das instruções para o desenvolvimento da atividade experimental [15 minutos].

20h30min □ **21h15min** [45 minutos]:

Coleta de Dados referente às **Tabela 1, 2 e 3** do “Relatório Científico-Experimental” parcialmente preenchido.

Experimento 1: Determinação Fotoelétrica da Constante de Planck (h). (Determinação do “potencial de corte” para um fotodiodo [superfície metálica] utilizando cinco diferentes linhas espectrais [filtros ópticos] e três diafragmas com aberturas de **2mm, 4 mm e 8 mm** de diâmetro).

21h15min □ **21h45min** [30 minutos]:

Coleta de Dados referente à **Tabela 4** do “Relatório Científico-Experimental” parcialmente preenchido.

Experimento 2: Medição das Características de Fotocorrente-Tensão de Linhas Espectrais – Frequência constante, Intensidade Diferente. (Determinação da “corrente fotoelétrica” variando a diferença de potencial no experimento, mantendo-se fixa a linha espectral [filtro óptico de $\lambda = 436,0 \text{ nm}$] e utilizando três diafragmas com abertura de **2mm, 4 mm e 8 mm** de diâmetro).

21h45min □ **22h15min** [30 minutos]:

Coleta de Dados referente à **Tabela 5** do “Relatório Científico-Experimental” parcialmente preenchido.

Experimento 3: Medição das Características de Fotocorrente-Tensão de Linhas Espectrais – Frequências Diferentes, Intensidade Constante. (Determinação da “corrente fotoelétrica” variando a diferença de potencial no experimento, mantendo-se fixa a intensidade de luz incidente [diafragma com abertura de 4 mm de diâmetro] e utilizando três linhas espectrais diferentes [filtros ópticos de $\lambda_1 = 436,0 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 546,0 \text{ nm}$ e $\lambda_3 = 577,0 \text{ nm}$]).

22h15min □ **23h00min**: Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Conclusão do “Relatório Científico-Experimental” parcialmente preenchido.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega do “Relatório Científico-Experimental” totalmente preenchido.
- Data de entrega das Memórias & Reflexões decorrente da Semana 6.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 7 (25 de abril de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- Concepções sobre o Processo de Investigação Científica:
 - O papel da “metodologia científica experimental hipotético-dedutiva”.
 - A “neutralidade” e “objetividade” na investigação científica
 - A natureza das observações experimentais

III. Objetivos da Aula

- Promover discussões e reflexões a respeito do papel e da importância da “metodologia científica experimental hipotético-dedutiva” nas práticas científicas, bem como suas limitações.
- Promover discussões e reflexões a respeito dos conceitos metacientíficos de “observação”, “neutralidade” e “objetividade” em uma investigação científica experimental.
- Analisar respostas dos estudantes (concepções prévias sobre NdC) apresentadas no “Questionário Inicial VOSE-RCN” (Questão 8).

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Elementos que sinalizam a presença de uma narrativa pseudo-histórica em textos acadêmicos;
- Concepções prévias (e até mesmo de senso comum) sobre a “Natureza da Ciência” (NdC).

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 20h10min [60 minutos]:

Aula Expositiva-Dialogada.

- Pergunta Problematicadora 1: “Qual o papel (ou a função) da “**metodologia científica**” em uma pesquisa/investigação?”

[10 minutos para reflexão e elaboração de respostas iniciais].

- Pergunta Problematicadora 2: “Há diferenças significativas entre a “**metodologia científica**” empregada nas “ciências naturais” (Física), nas “ciências da saúde” (Medicina) e nas “ciências sociais” (Ensino de Física)? Se sim, quais?”

[10 minutos para reflexão e elaboração de respostas iniciais].

- Pergunta Problematicadora 3: “Há semelhanças significativas entre a “**metodologia científica**” empregada nas “ciências naturais” (Física), nas “ciências da saúde” (Medicina) e nas “ciências sociais” (Ensino de Física)? Se sim, quais?”

[10 minutos para reflexão e elaboração de respostas iniciais].

- Socialização das respostas (escrever no quadro-branco) [30 minutos].

20h10min □ 21h10min [60 minutos]:

- Discutir e refletir sobre os conceitos metacientíficos de “**método científico**”, “**neutralidade metodológica**” e “**objetividade**”.

[60 minutos. Aula expositiva-dialogada. Apresentação de slides no programa *powerpoint*, fundamentada nos trabalhos de Gil-Pérez *et al.* (2001) e Moreira e Ostermann (1993)].

- O “método científico” é o padrão a ser seguido em todas as investigações científicas (**método científico universal**).
- Pergunta: *De acordo com a concepção de senso comum de “método científico”, em quais etapas da investigação científica a imaginação e a criatividade ou o raciocínio por analogia estão presentes?* (**visão mecânica, rígida, exclusivamente metódica**).
- Pergunta: *A construção do conhecimento científica realmente começa com a “observação” de um fenômeno, quase sempre se tratando de uma anomalia ou problema?* (**visão indutivista**).
- A investigação científica é considerada rigorosa e diligente quando conduzida por meio de um procedimento lógico, algorítmico, rígido e sequencial (**visão rígida e infalível**).
- O emprego do “método científico” possibilita a “comprovação empírica”, isto é, validam-se as “teorias científicas” de caráter hipotético e, com o passar do tempo, podem alcançar o status de “leis científicas” (**visão empírico-indutivista**).
- O desenvolvimento científico ocorre de forma cumulativa e com crescimento linear (**visão acumulativa e linear**).
- Uma vez comprovado empiricamente, empregando-se o método científico, esse determinado conhecimento se torna verdadeiro e definitivo (**visão dogmática e fechada**).
- O conhecimento científico é desenvolvido de maneira individual e isolada (**visão individualista e elitista**).

21h10min - 21h30min: Intervalo de descanso [20 minutos]:

21h30min □ 22h30min [60 minutos]:

Apresentação e comentários sobre alguns resultados parciais “Questionário Inicial VOSE-RCN”:

- **Sobre o Processo de Investigação Científica (Questão 08)**
 - Leitura e análise da questão e dos itens declarativos sugeridos na questão [10 minutos]
 - Exemplos de justificativas apresentadas pelos estudantes quando manifestaram “discordância” em relação a algum item declarativo [20 minutos]
 - Resultados. Gráficos e Tabelas [10 minutos]
 - Respostas de estudantes da “educação básica” [10 minutos]
 - Solicitar a continuação da escrita do seguinte parágrafo: “*A Ciência é uma atividade humana que requer o uso de “metodologias científicas” por seus profissionais (...)*”

22h30 □ 23h30min (30 minutos):

Orientações quanto às próximas semanas (mês de maio):

- Memórias & Reflexões (**02 de maio de 2023**).
- Relatório Experimental do Efeito Fotoelétrico (**02 de maio**).
- Viagem no mês de maio de 2023 do professor Ronivan Suttini.
- Leitura e análise do Capítulo 03 – Tese de Doutorado [Oliveira, 2009] – Teoria Ondulatória da Luz (**22 de maio**).
- Leitura e análise do artigo “Heinrich descobriu o efeito fotoelétrico?” (Mangili, 2012) (**29 de maio**).
- Leitura prévia e análise crítica da Palestra Nobel de Phillip Lenard (**06 de junho de 2023**).
 - Definição dos grupos para o “**Seminário Coletivo n. 2**”.
 - Disponibilizar os textos históricos para cada grupo

Leitura Complementar:

- ✓ Texto 7: Para uma Imagem Não Deformada do Trabalho Científico (Gil-Pérez *et al.*, 2001).
- ✓ Texto 8: Sobre o Método Científico (Moreira; Ostermann, 1993).

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 7.
- Entrega da lista exercícios (conceituais) referente ao fenômeno do efeito fotoelétrico.
- Disponibilizar Texto 9: Capítulo 03: Desvelando a Natureza da Luz no Século XIX (Oliveira, 2019).

Pergunta Dirigida para leitura e análise crítica do Texto 9:

Segundo Gil-Pérez *et al.* (2001), as principais concepções distorcidas sobre o trabalho científico são aquelas que retratam as ciências como uma atividade: que elimina dúvidas e incertezas, ambiguidades e controvérsias unicamente por meio de observações experimentais diligentes, as quais seriam suficientes para o desenvolvimento de leis e teorias científicas (1. **visão empírico-indutivista e a-teórica**); baseada na utilização rigorosa de um “método científico universal” que dispensa a criatividade e a imaginação, bem como desconsidera a influências de fatores subjetivos na investigação (2. **visão rígida – algorítmica, exata e infalível**); que produz conhecimentos neutros e objetivos, que não estão sujeitos a questões éticas, sociais e políticas, e que não são influenciados pelos problemas científicos e tecnológicos do período histórico-social em que estão imersos (3. **visão aproblemática e a-histórica**); compreendida por meio de uma abordagem analítica e reducionista, que fragmenta os fenômenos naturais em partes menores para serem estudadas isoladamente, desconsiderando a complexidade e a interdependência entre as diferentes áreas de pesquisa (4. **visão exclusivamente analítica**); que avança de forma contínua, aumentando linearmente o “estoque de conhecimento científico” mediante acúmulos de evidências experimentais (5. **visão acumulativa e de crescimento linear**); produzida apenas por alguns indivíduos excepcionais e talentosos (em geral, homens brancos geniais de nacionalidade europeia) que trabalham isoladamente (6. **visão individualista e elitista**); que não é influenciada por valores socioculturais ou pelos contextos histórico, cultural, social, político, econômico (7. **visão descontextualizada e socialmente neutra**).

Em que medida, a leitura, análise, discussão e reflexão sobre as informações apresentadas no texto histórico disponibilizado (Capítulo 3 - Episódio Histórico: panorama geral sobre a óptica na Primeira metade do século XIX) podem ser utilizadas para problematizar cada uma das setes imagens distorcidas sobre o trabalho científica identificadas por Gil-Pérez et. al. (2001)? Cite trechos específicos do texto histórico que poderiam ser utilizados como apoio argumentativo para a problematização.

GIL-PÉREZ, D. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 02, p. 125-153, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-73132001000200001>.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 8 (02 de maio de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- Teoria corpuscular e ondulatória da luz nos séculos XVII e XVIII;
- A teoria ondulatória no século XIX: Thomas Young e Augustin Fresnel;
- Aspectos da Natureza da Ciência

III. Objetivos da Aula

- Apresentar os fenômenos da luz conhecidos no século XVII e XVIII: propagação linear, reflexão, refração, as cores, dupla refração e polarização.
- Discutir a teoria corpuscular da luz e a ondulatória sob o ponto de vista de Newton e Huygens, respectivamente.
- Discutir os principais elementos a teoria ondulatória da luz de Thomas Young;
- Discutir os principais elementos a teoria ondulatória da luz de Augustin Fresnel.
- Discutir os elementos de Natureza da ciência no passagem da teoria corpuscular para a teoria ondulatória da luz.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Teorias (antigas e modernas) sobre a luz;
- Leitura prévia dos capítulos 2 e 3 da tese “Natureza da Ciência por meio de Narrativas Históricas: os debates sobre a natureza da luz na primeira metade do século XIX” (Oliveira, 2019).

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Entrega de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 20h10min [60 minutos]:

Aula expositiva-dialogada: As contribuições de Isaac Newton para a teoria corpuscular da luz e Christian Huygens para a teoria ondulatória da luz.

(Apresentação de slides no programa *powerpoint*).

20h10min □ 21h10min [60 minutos]:

Aula expositiva-dialogada: As contribuições de Thomas Young para a teoria ondulatória da luz.

(Apresentação de slides no programa *powerpoint*).

21h10min □ 22h10min [60 minutos]:

Aula expositiva-dialogada: As contribuições de Augustin Fresnel para a teoria ondulatória da luz.

(Apresentação de slides no programa *powerpoint*).

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 8.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 9 (09 de maio de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- O experimento de Hans Christian Oersted.
- As interpretações de Oersted, Ampère e Biot-Savart do experimento da interação corrente elétrica e agulha magnética;
- A teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell

III. Objetivos da Aula

- Apresentar o experimento fundamental para o desenvolvimento do que hoje denominamos teoria clássica do eletromagnetismo.
- Discutir em detalhes o experimento de Oersted.
- Discutir as três principais interpretações dos resultados do experimento, a saber: Oersted, Ampère e Biot-Savart;
- Apresentar e discutir o desenvolvimento da teoria eletromagnética a partir das linhas de força de Faraday até as ondas eletromagnética obtida teoricamente por Maxwell.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunçores)

- Interações entre eletricidade e magnetismo (desenvolvidos ao longo da disciplina de Física III);
- Leitura prévia dos textos: “*Experiências sobre o efeito do conflito sobre a agulha magnética*” de Oersted; O trecho do artigo de Maxwell, “Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético”, publicado no *Philosophical Transactions*, vol. 155, p. 495, 1865.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Lista de Presença.

19h10min □ 20h10min [60 minutos]:

Aula Expositiva: O experimento de Oersted.

20h10min □ 21h10min [60 minutos]:

Aula Expositiva: Interpretações do experimento de Oersted.

21h10min □ 22h10min [60 minutos]:

Aula Expositiva: Desenvolvimento da teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 9.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 9 (09 de maio de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- As descobertas das novas radiações no final do século XIX
- O problema da radiação do corpo negro

III. Objetivos da Aula

- Apresentar o desenvolvimento técnico das bombas de vácuo e fontes de alta-tensão para os estudos das radiações.
- Discutir as radiações em gases rarefeitos com ênfase nos raios catódicos.
- Discutir os experimentos de Roentgen sobre os raios X;
- Apresentar e discutir a tentativa de unificação de diferentes ramos da física, por exemplo, a mecânica com o eletromagnetismo a termodinâmica com o eletromagnetismo e a óptica;
- Apresentar o surgimento dos quântos e o problema da radiação do corpo negro.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunçores)

- Conceitos introdutórios de Física Moderna (desenvolvidos ao longo da disciplina de Física IV);
- Leitura prévia dos textos:
 1. MARTINS, Roberto de Andrade. A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 20, n. 24, p. 373-391, 1998.
 2. MARTINS, Roberto de Andrade; ROSA, Pedro Sérgio. **História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula de Einstein a De Broglie**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014, Capítulo 1.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ **19h10min** [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Lista de Presença.

19h10min □ **20h40min** [90 minutos]:

Aula Expositiva: As descobertas das novas radiações no final do século XIX.

21h00min □ **22h30min** [60 minutos]:

Aula Expositiva: Teoria dos quântos e radiação do corpo negro.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 10.

- (Leitura prévia para próxima aula). Entregar Texto 12: “Heinrich Rudolph Hertz e a ‘descoberta’ do efeito fotoelétrico: um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula” (Mangili, 2012).

Questões Problematicadoras:

- ✓ Qual a **ideia-matriz** apresentada no Texto 12?
- ✓ Quais as possíveis intencionalidades do autor do texto? E dos professores da disciplina?
- ✓ Qual(is) trecho(s) você considerou mais importante (ou interessante)?
- ✓ Existem pontos de discordância em relação à algumas das afirmações do autor?
- ✓ Do ponto de vista dos elementos conceitual, procedimental e epistemológico, qual sua avaliação sobre a qualidade do texto escrito?
- ✓ Afinal de contas, em 1887, Heinrich Hertz observou ou não o efeito fotoelétrico? Se sim, essa observação foi intencional ou acidental?

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 12 (30 de maio de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- A contribuição das investigações de Heinrich Hertz para a compreensão do efeito fotoelétrico.
- {1887} Heinrich Hertz “tropeça” e investiga um novo fenômeno elétrico.
- Narrativa pseudo-histórica do efeito fotoelétrico nos livros-didáticos do ensino superior;
- Concepções sobre a Natureza da Ciência.

III. Objetivos da Aula

- Analisar e discutir as informações históricas apresentadas no trabalho de Mangili (2012).
- Analisar e discutir os diferentes aspectos sobre a “Natureza da Ciência” que se destacam no trabalho de Mangili (2012)
- Problematicar o uso de alguns termos (palavras) considerados “inapropriados” e “inadequados” na elaboração de um texto de história das ciências.
- Analisar e discutir o texto histórico (fonte primária, em inglês) “*On the Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge*” [Sobre um Efeito da Luz Ultravioleta na Descarga Elétrica] (Hertz, 1887).

IV. Conceitos Prévios (Subsunçores)

- Teoria clássica do eletromagnetismo de James Maxwell (Física Clássica)
- Narrativas pseudo-históricas presentes em textos acadêmicos e em livros-didáticos;
- Concepções sobre a Natureza da Ciência.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h30min [20 minutos]:

Breves comentários sobre a forma” e o conteúdo do relato da contribuições das investigações de H. Hertz para compreensão do efeito fotoelétrico apresentado no “Relatório Científico-Experimental”.

19h30min □ 20h10min [40 minutos]:

Socialização das percepções dos estudantes sobre a leitura do Texto 12: “Heinrich Rudolph Hertz e a ‘descoberta’ do efeito fotoelétrico: um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula” (Mangili, 2012). Perguntas orientadoras:

1. Qual a **ideia-matriz** apresentada no texto analisado?
2. Quais as possíveis intencionalidades do autor do texto? E dos professores da disciplina?
3. Qual(is) trecho(s) você considerou mais importante (ou interessante)?
4. Existem pontos de discordância em relação à algumas das afirmações do autor?
5. Do ponto de vista dos elementos conceitual, procedimental e epistemológico, qual sua avaliação sobre a qualidade do texto escrito?
6. Afinal de contas, H. Hertz descobriu ou não o efeito fotoelétrico? Se sim, foi intencional ou acidental?
- 7.

20h10min □ 20h30min [20 minutos]:

- Destacar que além dos elementos de “pseudo-história” e de “natureza da ciência”, o uso de alguns termos (palavras) considerados “inapropriados” e “inadequados” na elaboração de um texto de história da ciência serão problematizados e discutidos nessa aula, em especial: “**descoberta**”, “**comprovar**” e “**prova rigorosa**” [15 minutos].
- Mencionar outros problemas textuais recorrentes na escrita do trabalho de Mangili (2012).

20h30min – 20h45min [15 minutos]:

- Assistir vídeo do “Episódio 3 – “A História da Eletricidade”, que aborda historicamente o famoso experimento no qual Heinrich Hertz observa pela primeira vez as ondas eletromagnéticas previstas por James C. Maxwell (15 minutos iniciais do episódio)

20h45min – 21h00min: Intervalo de descanso [15 minutos]:**21h00min – 22h15min [75 minutos]**

- Analisar e discutir detalhadamente o texto original “*On the Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge*” [Sobre um Efeito da Luz Ultravioleta na Descarga Elétrica] (Hertz, 1887). Não será exigida a leitura do texto (em inglês) por partes dos estudantes. Os professores, com auxílio de projetor, farão comentários sobre cada um dos 18 itens (parágrafos) discutidos no artigo.
 - ✓ Hendrick H. Hertz suspeita e investiga a existência de um “novo fenômeno elétrico”.
 - ✓ A ‘investigação meticulosa’ conduzida por Hendrick Hertz e a observação (“descoberta”) intencional do efeito fotoelétrico.
 - ✓ As investigações iniciais sobre um “novo fenômeno elétrico” (1887 – 1900): Wilhelm Hallwachs; Augusto Righi; Stoletow; Geitel; Elster e outros;
 - ✓ O que são investigações fenomenológicas?

22h15min – 22h30min (15 minutos)

Observação da forma e do conteúdo do relato histórico das contribuições das investigações de H. Hertz para compreensão do efeito fotoelétrico apresentado nos livros didáticos do ensino superior (descoberta acidental e imediata; pressupõe a existência dos elétrons).

- Halliday & Resnick (2016):
- Sears & Zemansky (2016):
- Moysés Nussenzveig (2014)
- Paul Tipler & Ralph Llewellyn (2017)
- Eisberg & Resnick (1985)
- Alonso & Finn (2000)

22h30min □ 23h00min:

- Orientação para próximas atividades:
 - ✓ (Re)análise das seções de “Fundamentação Teórica e Contextualização Histórica no Relatório Científico-Experimental”.
 - ✓ Observar as imagens distorcidas da ‘natureza das ciências’ presentes no “Relatório Científico-Experimental”.
 - ✓ Observar os elementos de *pseudo-história* das ciências presentes no “Relatório Científico-Experimental”.
 - ✓ (Re)escrever a contextualização histórica do efeito fotoelétrico no “Relatório Científico-Experimental”.
 - **Momento 1** – A contribuição de H. Hertz e as primeiras investigações sobre o efeito fotoelétrico: (re)escrever dois parágrafos).

Texto histórico (fonte primária) para próxima aula:

- **Momento 2** – As contribuições das investigações experimentais de Philipp Lenard (1902) para a compreensão do efeito fotoelétrico.

VI. Avaliação

- Respostas às “Questões Problematicadoras” referente ao trabalho de Mangili (2012).
- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 12.
- Organizar a atividade de leitura prévia e solicitação de análise crítica do Texto 14: Palestra Nobel de Philipp Lenard (1906): “Sobre os Raios Catódicos” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b).
- Entrega das “Questões Problematicadoras” sobre aspectos da “natureza das ciências” a serem consideradas durante a leitura do Texto 14: Palestra Nobel de Philipp Lenard (1906): “Sobre os Raios Catódicos” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b). A turma foi dividida em seis grupos, e cada grupo ficou responsável uma pergunta que trata de uma das imagens distorcidas sobre a ‘natureza da ciência’, conforme o trabalho de Gil-Pérez *et al.* (2001). Todos os estudantes deviam responder à Questão n. 7.

Questões Problematicadoras (responder previamente para próxima aula):

[Grupo 1 - Questão 1] Visão Aproblemática e A-histórica (dogmática e fechada). Transmite a imagem de que conhecimentos científicos foram produzidos sem qualquer tipo de vínculo com a demanda por solução para problemas sociais e/ou tecnológicos referente ao período histórico de seu desenvolvimento. “[...] *transmitem-se os conhecimentos já elaborados, sem mostrar os problemas que lhe deram origem, qual foi a sua evolução, as dificuldades encontradas etc., e não dando igualmente a conhecer as limitações do conhecimento científico atual nem as perspectivas que, entretanto, se abrem. Perde-se assim de vista que, como afirma Bachelard (1938), “todo o conhecimento é a resposta a uma pergunta”, isto é, a um problema/situação problemático, o que dificulta a captação, bem como a compreensão da racionalidade de todo o processo e empreendimento científicos*” (Gil-Pérez *et al.*, 2001, p. 131).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – Tradução Nobel Lecture de 1906**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão aproblemática e a-histórica* da ‘Natureza da Ciência’? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o papel dos indivíduos/sujeitos e da comunidade científica no processo de construção do conhecimento científico? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

[Grupo 2 - Questão 2] Visão Individualista e Elitista: Retrata a atividade científica como uma produção realizada por gênios que trabalham de forma isolada. “*Os conhecimentos científicos aparecem como obras de gênios isolados, ignorando-se o papel do trabalho coletivo e cooperativo, dos intercâmbios entre equipes. Em particular faz-se crer que os resultados obtidos por um só cientista ou equipe podem ser suficientes para verificar, confirmando ou refutando, uma hipótese ou toda uma teoria*” (Gil-Pérez *et al.*, 2001, p. 133).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – tradução Nobel Lecture de 1906**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão*

individualista e elitista a ‘Natureza da Ciência’? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o papel dos indivíduos/sujeitos e da comunidade científica no processo de construção do conhecimento científico? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

[Grupo 3 - Questão 3] Visão Empírico-Indutivista. Desconsidera as influências teóricas e os valores socioculturais sobre as observações experimentais. *“É uma concepção que destaca o papel ‘neutro’ da observação e da experimentação (não influenciadas por ideias apriorísticas), esquecendo o papel essencial das hipóteses como orientadoras da investigação, assim como dos corpos coerentes de conhecimentos (teorias) disponíveis que orientam todo o processo”* (Gil-Pérez et al., 2001, p. 129).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: Nobel Lecture Phillip Lenard (1906)**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão empírico-indutivista* da ‘Natureza da Ciência’? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o ambiente de controvérsias históricas nas ciências? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

[Grupo 4 - Questão 4] Visão Rígida (algorítmica, exata e infalível). Baseada na aplicação de um método universal (*Método Científico Experimental Hipotético-Dedutivo*) na investigação científica, o qual dispensa a criatividade e a imaginação humana. *“Apresenta-se o “método científico” como um conjunto de etapas a seguir mecanicamente. Por outro lado, destaca-se o que se supõe ser um tratamento quantitativo, controle rigoroso etc., esquecendo - ou, inclusive, recusando - tudo o que se refere à criatividade, ao carácter tentativo, à dúvida, (...) a preocupação, quase obsessiva, em evitar a ambiguidade e em assegurar a fiabilidade das avaliações, distorce a natureza do trabalho científico, essencialmente incerto e também com algo de intuitivo e, por certo, reflexivo* (Gil-Pérez et al., 2001, p. 130).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – tradução Nobel Lecture de 1906**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão rígida (algorítmica, exata e infalível)* da ‘Natureza da Ciência’? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o ambiente de controvérsias históricas nas ciências? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

[Grupo 5 - Questão 5] Visão Acumulativa de Crescimento Linear. Descreve o desenvolvimento científico como um crescimento constante mediante acúmulos de evidências experimentais - (progresso científico). *“O desenvolvimento científico aparece como fruto de um crescimento linear, puramente acumulativo (...) que ignora as crises e as remodelações profundas (...) fruto de processos complexos que não se desejam e deixam moldar por nenhum modelo pré-definido de mudança científica (...)”* (Gil-Pérez et al., 2001, p. 132).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – tradução Nobel Lecture de 1906**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão acumulativa de crescimento linear* sobre o desenvolvimento científico? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o ambiente de controvérsias históricas nas ciências? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece

essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

[Grupo 6 - Questão 6] Visão Exclusivamente Analítica. Compreendida por meio de uma abordagem analítica e reducionista, que fragmenta os fenômenos naturais em partes menores para serem estudadas isoladamente, desconsiderando a complexidade e a interdependência entre as diferentes áreas de pesquisa. Essa visão transmite uma imagem sobre a NdC analítica e reducionista, realçando somente na necessária divisão parcelar dos estudos em partes cada vez menores, visando aprofundar a compreensão dos fenômenos naturais. As áreas de pesquisas e as disciplinas científicas são retratadas como estudadas isoladamente, desconsiderando e omitindo intencionalmente a complexidade, a interdependência e possíveis unificações entre os diferentes campos de estudo. Dessa forma, *“esquece os esforços posteriores de unificação e de construção de corpos coerentes de conhecimentos cada vez mais amplos, ou o tratamento de “problemas-ponte” entre diferentes campos de conhecimento que podem chegar a unificar-se, como já se verificou tantas vezes e que a História da Ciência evidencia* (Gil-Pérez *et al.*, 2001, p. 131-132).

Em que medida, a leitura do “**Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp E. A. von Lenard – tradução Nobel Lecture de 1906**” possibilita a discussão, reflexão e argumentação epistemológica a respeito da *visão exclusivamente analítica* sobre o desenvolvimento científico? Como essa discussão/reflexão se relaciona com o ambiente de controvérsias históricas nas ciências? Em sua opinião, em geral, o texto reforça ou enfraquece essa imagem deformada do trabalho científico? Em suas justificativas, cite trechos específicos no texto que corroboram suas afirmações.

(Para TODOS os grupos) Questão 07. Agora que você possui informações mais precisas e mais detalhadas sobre o contexto histórico das investigações científicas de Phillip Lenard, faça uma análise comparativa com o relato apresentado tanto em seu “Relatório Científico-Experimental” quanto no livro-didático que você (e seu grupo) utilizou para ministrar o “Seminário Coletivo n. 1” (Semana 5) sobre o efeito fotoelétrico.

- (a) Quais elementos de pseudo-história podem ser identificados?
- (b) Quais informações apresentadas no livro-didático não condizem com o relato de Phillip Lenard em sua *Nobel Lecture*?
- (c) De que maneira, esses elementos de pseudo-história contribuem para reforçar uma imagem deformada do trabalho científico nas aulas de física?

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 13 (06 de junho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- {1898-1902} As investigações experimentais de Phillip Lenard sobre o efeito fotoelétrico.
- Narrativa pseudo-histórica do efeito fotoelétrico nos livros-didáticos do ensino superior;
- Concepções sobre a Natureza da Ciência.

III. Objetivos da Aula

- Analisar e discutir os saberes *conceituais, procedimentais e epistemológicos* apresentados no “Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp Lenard – tradução *Nobel Lecture* de 1906”.
- Identificar, por meio da abordagem investigativa, quais aspectos sobre a Natureza da Ciência que se destacam na *Nobel Lecture* de Lenard (1906) e são fecundos para problematização.
- Avaliar, até que ponto, a análise e leitura crítica do Texto 14 possibilita a promoção de discussões, reflexões e contra argumentações epistemológicas a respeito das principais imagens distorcidas do trabalho científico, conforme relatadas por Gil-Pérez *et al.* (2001).
- Analisar e discutir os possíveis elementos de pseudo-história do efeito fotoelétrico presentes nos livros-didáticos em comparação com as informações apresentadas no Texto 14 (Lenard, 1906).

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunçores)

- Estrutura da Matéria
- Teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (Física Clássica).
- O fenômeno do efeito fotoelétrico (leis, teorias, equação fotoelétrica, função trabalho etc.).
- Narrativas pseudo-históricas presentes em textos acadêmicos e em livros-didáticos.
- Concepções sobre a “Natureza da Ciência” e imagens distorcidas do trabalho científico.

V. Procedimentos de Ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h40min [30 minutos]:

- Comentários gerais dos estudantes sobre as facilidades e dificuldades de leitura, compreensão, relevância, interesse, motivação em relação ao Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp Lenard – tradução da *Nobel Lecture* de 1906” [20 minutos].
- Explicitação das justificativas dos professores para escolha da análise do texto histórico *Nobel Lecture* de Philipp Lenard (1906) e alguns comentários sobre o físico alemão [10 minutos].

19h40min □ 20h40min [60 minutos]:

- **Grupo 1:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 2:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 3:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.

20h40min □ 21h00min: Intervalo de descanso [20 minutos]:

21h00min □ 22h00min [60 minutos]:

- **Grupo 4:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 5:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 6:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.

Observações:

- Dar ênfase nas discussões e reflexões sobre os aspectos da ‘Natureza da Ciência’.
- Dar ênfase quanto à presença de elementos em narrativas pseudo-históricas do efeito fotoelétrico nos livros-didáticos de ensino superior

22h00min □ 22h30min [30 minutos]:

Breves comentários visando apresentar o Texto 15: “*A Física Alemã sob a Liderança de Philip Lenard e Johannes Stark*” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b).

- Explicitar o significado conceito de “*neutralidade científica*”;
- Destacar a importância das discussões sobre questões éticas, morais e políticas;
- Comentários sobre a escolha e elaboração do texto pelos professores;
- Comentários sobre a estrutura e organização do texto;
- Principais trechos, destaques e informações relevantes.

22h30min □ 23h00min: Margem de Tempo de Segurança.

VI. Avaliação

- Respostas às “Questões Problematizadoras” referente à Texto 14 (Lenard, 1906).
- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 13.
- Organizar a atividade de leitura prévia e solicitação de análise crítica do Texto 14: Palestra Nobel de Philipp Lenard (1906): “Sobre os Raios Catódicos” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b).
- Entrega da “Questões Problematizadora” sobre aspectos da “natureza das ciências” a serem consideradas durante a leitura do Texto 15: “A Física Alemã sob a Liderança de Philip Lenard e Johannes Stark” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b).

Observação: O desenvolvimento da aula não ocorreu totalmente conforme o planejamento descrito. Isso porque observou-se que os primeiros três grupos de estudantes apresentaram muitas dificuldades de compreensão em relação àquilo que efetivamente tinha sido indagado nas “questões problematizadoras” propostas para análise e leitura crítica do Texto 14. Logo, as discussões, reflexões, comentários e esclarecimentos demandaram um tempo muito maior que o previsto inicialmente. Na aula seguinte, deu-se prosseguimento das discussões com as respostas elaboradas pelos grupos 4, 5 e 6 e leitura do Texto 15.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 14 (13 de junho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- {1898-1902} As investigações experimentais de Phillip Lenard sobre o efeito fotoelétrico.
- Narrativa pseudo-histórica do efeito fotoelétrico nos livros-didáticos do ensino superior;
- Concepções sobre a Natureza da Ciência.

III. Objetivos da Aula

- Analisar e discutir os saberes *conceituais, procedimentais e epistemológicos* apresentados no “Texto 14: “Sobre os Raios Catódicos”, por Philipp Lenard – tradução *Nobel Lecture* de 1906”.
- Avaliar, até que ponto, a análise e leitura crítica do Texto 14 possibilita a promoção de discussões, reflexões e contra argumentações epistemológicas a respeito das principais imagens distorcidas do trabalho científico, conforme relatadas por Gil-Pérez *et al.* (2001).
- Compreender o contexto sociopolítico alemão que possibilitou a gênese e o desenvolvimento do movimento nazista “Física Alemã” entre os anos de 1920 e 1938.
- Compreender o contexto científico-filosófico de apropriação indevida por Philipp Lenard e Johannes Stark das discussões epistemológicas legítimas envolvendo o papel da matemática e das hipóteses especulativas no processo de construção de teorias científicas.
- Analisar e discutir as possíveis implicações de questões éticas, políticas e morais envolvendo a atividade científica.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Estrutura da Matéria
- Teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (Física Clássica).
- O fenômeno do efeito fotoelétrico (leis, teorias, equação fotoelétrica, função trabalho etc.).
- Narrativas pseudo-históricas presentes em textos acadêmicos e em livros-didáticos.
- Concepções sobre a “Natureza da Ciência” e imagens distorcidas do trabalho científico.

V. Procedimentos de Ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h40min [30 minutos]:

- Comentários gerais dos estudantes sobre as facilidades e dificuldades de leitura, compreensão, relevância, interesse, motivação em relação ao Texto 14.

19h40min □ 20h40min [60 minutos]:

- **Grupo 4:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 5:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.
- **Grupo 6:** Discussão das respostas às questões problematizadoras propostas para o Texto 14.

20h40min □ 21h00min. Intervalo de descanso [20 minutos]:

21h00min □ **22h30min** [30 minutos]:

Leitura (em voz alta) comentada do Texto 15: “*A Física Alemã sob a Liderança de Philip Lenard e Johannes Stark*” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2023b).

- Explicitar o significado conceito de “*neutralidade científica*”;
- Destacar a importância das discussões sobre questões éticas, morais e políticas;
- Comentários sobre a escolha e elaboração do texto pelos professores;
- Comentários sobre a estrutura e organização do texto;
- Principais trechos, destaques e informações relevantes.

22h30min □ **23h00min**: Margem de Tempo de Segurança.

VI. Avaliação

- Respostas às “Questões Problematicadoras” referente à Texto 14 (Lenard, 1906).
- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 14.
- Entregar Texto 16: “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” (Einstein, 1905) para leitura prévia.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 15 (20 de junho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- {1905} A Interpretação Heurística de ‘quantum de luz’ por Albert Einstein.

III. Objetivos da Aula

- Analisar e discutir o artigo publicado por Einstein em 1905, no qual ele apresenta sua hipótese heurística de “*quanta* de luz”.
- Analisar e discutir os diferentes aspectos sobre a “Natureza da Ciência” que se destacam no artigo de Einstein (1905).
- Analisar e discutir os diferentes elementos de pseudo-história da ciência que foram criados ao longo dos anos a partir do artigo de Einstein (1905).

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Teoria clássica do eletromagnetismo da Luz de James C. Maxwell (Física Clássica).
- Termodinâmica Estatística (Princípio de Boltzmann - Entropia) (NUSSENZVEIG, Moysés H. Fluidos, Oscilações & Ondas e Calor – vol. 2, 2002 [p. 285 – 290].
- O fenômeno do efeito fotoelétrico (leis, teorias, equação fotoelétrica, função trabalho etc.).
- Narrativas pseudo-históricas presentes em textos acadêmicos e em livros-didáticos.
- Concepções sobre a “*Natureza da Ciência*”.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala. Lista de Presença.

19h10min □ 19h20min [10 minutos]:

Aula Expositiva e Dialogada. Apresentação de slides com auxílio do programa *powerpoint*.

Tempo destinado à apresentação de considerações gerais sobre o artigo de Einstein (1905): “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”.

- *O que é um ponto de vista heurístico (análise do título do artigo)?*
- *Observação da estrutura geral do Artigo de Einstein (1905)*

19h20min □ 19h40min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção de “*Introdução*”. Ideias principais:

- Justificativa / Lacuna (problema)
- Apresentação da hipótese heurística de “*quanta* de luz”
- Objetivo principal
- Princípio metafísico subjacente empregado por Einstein (1905).

19h40min □ 20h00min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §1. *Sobre uma Dificuldade em Relação à Teoria da Radiação de Corpo Negro.*

Ideias principais:

- Modelo de Planck para “Radiação de Corpo Negro”.
- Teorema da Equipartição da Energia (Teoria Cinética dos Gases - Termodinâmica)
- Justificativa / Lacuna (inconsistência do modelo de Planck com a “equipartição da energia”)
- Catástrofe do Ultravioleta e equação de Rayleigh-Jeans

20h00min □ 20h20min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §2. *Sobre a Determinação de Planck dos Quanta Elementares*

- O que são os “quanta elementares”?
- Parâmetros que caracterizam a condição inicial de alta densidade de energia.
- Determinação da massa de 1 átomo de hidrogênio pela equação de Rayleigh-Jeans
- Rejeição ao uso do Modelo de Planck para “Radiação de Corpo Negro”

20h20min □ 20h40min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §3. *Sobre a Entropia da Radiação.*

- Recordação do conceito de “Entropia”
- Recordação do Princípio de Boltzmann (interpretação estatística da entropia)
- Apresentação do Modelo de Wien para a “Radiação de Corpo Negro”
- Condições de domínio de validade do Modelo de Wien
- Definição do Conceito de Entropia e Entropia da Radiação

20h40min □ 21h00min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §4. *Lei Limite [forma assintótica] da Entropia da Radiação Monocromática em Baixa Densidade de Radiação*

- Entender que a “Entropia” de uma radiação [eletromagnética] monocromática de baixa densidade varia com o volume da mesma forma que a “Entropia” de um gás ideal ou de uma solução diluída.
- Comparação entre “Entropia da Radiação” e a “Entropia de um Sistema Gasoso”.

21h00min □ 21h20min. Intervalo de descanso [20 minutos]:

21h20min □ 21h40min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §5. *Investigação Teórico-Molecular da Dependência da Entropia de Gases e Soluções de Diluídas em Relação ao Volume*

- Recordação do Princípio de Boltzmann (entropia)
- Interpretar a equação da entropia $[S]$ da radiação (Seção §4.) sobre as bases do princípio introduzido na Física pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844 – 1906), isto é, sobre as bases da “termodinâmica estatística”.
- Para maiores detalhes, ver: NUSSENZVEIG, Moysés H. Fluidos, Oscilações & Ondas e Calor – vol. 2, 2002 [p. 285 – 290].

21h40min □ 22h00min [20 minutos]:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §6. *Interpretação da Expressão para a Dependência da Entropia da Radiação Monocromática com o Volume de acordo com o Princípio de Boltzmann*

- Entender que “(...) a radiação monocromática [de densidade suficientemente baixa] se comporta, no que diz respeito à dependência de sua entropia em relação ao volume, como se fosse um meio descontínuo constituído por quanta com energia de magnitude $R\beta\nu/N$ ” (p. 10).

- Comparar as equações para o cálculo da VARIAÇÃO DA ENTROPIA $[\Delta S]$ obtidas anteriormente ao final das Seções §4 (radiação eletromagnética monocromática) e §5 (sistema termodinâmico estatístico).

Observação: Não serão feitas as demonstrações matemáticas detalhadas em sala de aula. O artigo de Einstein, sem dúvida, está longe de ser trivial; muito pelo contrário, apresenta um conteúdo matemático bastante complexo. Tais demonstrações exigem pré-requisitos de Mecânica Estatística, uma disciplina que, provavelmente, não integra a grade curricular da licenciatura e, mesmo no bacharelado, pode não ser cursada por estudantes do 5º Período. Entre os conhecimentos prévios (subsunçores) listados, destaca-se “Termodinâmica Estatística” (Princípio de Boltzmann – Entropia), cuja versão introdutória, apresentada por Nussenzveig (2002, v. 2, p. 285-290), foi sugerida para leitura prévia.

22h00min □ 22h30min:

Análise, discussão e leitura comentada da seção §8. *Sobre a Produção de Raios Catódicos por meio da Iluminação de Corpos Sólidos*

- Apresentação da equação fotoelétrica
- Não contradição com os resultados experimentos de P. Lenard (1902)
- Predição inédita de uma relação linear entre o “**potencial de corte**” dos fotoelétrons e a **frequência** de radiação incidente.
- Breves comentários sobre o artigo Einstein (1906): “*Em minha opinião, as considerações acima não contradizem, como um todo, a teoria da radiação de corpo negro de Planck; pelo contrário, elas parecem-me mostrar que com sua teoria da radiação, o Sr. Planck introduziu na Física um novo elemento hipotético: a hipótese de quanta de luz*” (Einstein, 1906, p. 196).
- Citações de outros cientistas em relação à hipótese de “*quanta de luz*”:

22h30min □ 23h00: Margem de Tempo de Segurança.

Sugerir análise e leitura final (extraclasse) das seções §7. *Sobre a Regra de Stokes* e seção §9. *Sobre a Ionização de Gases por Luz Ultravioleta*.

VI. Avaliação

- Participação *in loco* individual e/ou coletiva em debates, discussões e reflexões.
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso.
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (*livre criação do estudante*).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Definir data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 15.
- Entregar Texto 17: “Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard, Arthur Haas e J. J. Thomson” (Suttini, Caluzi, Errobidart, 2024).
- Organizar a apresentação do Seminário Coletivo n. 2.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 16 (27 de junho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- {1910 – 1913} Tentativas clássicas (não einsteinianas) de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard (1902), Arthur Haas (1910) e J. J. Thomson (1910, 1913)”.

III. Objetivos da Aula

- Reconhecer que durante o período de 1902 e 1913 foram propostos modelos científicos que, até certo ponto, foram bem-sucedidos na compreensão do efeito fotoelétrico, fundamentados na teoria clássica do eletromagnetismo.
- Reconhecer que a rejeição (de 1905 a 1921) à “hipótese de quantum de luz” estava embasada tanto em fundamentos teóricos quanto empíricos, e não somente em crenças pessoais dogmáticas na teoria clássica do eletromagnetismo.
- Reconhecer que as limitações do conhecimento científico, em uma certa época, possibilitam diferentes interpretações, igualmente válidas, para mesma base empírica disponível, resultando em um ambiente de intensos debates e controvérsia científica.
- Entender conceitualmente a “hipótese de gatilho” proposta por Philipp Lenard em 1902.
- Entender conceitualmente a tentativa clássica de interpretação eletrodinâmica do “quantum de ação elementar” de Max Planck, realizada por Arthur Haas em 1910.
- Entender conceitualmente as duas hipóteses clássicas (modelos atômicos) propostas por J. J. Thomson em 1911 e 1913.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Teoria clássica do eletromagnetismo da Luz de James C. Maxwell (Física Clássica).
- Estrutura da Matéria.
- Matemática Básica (Ensino Superior em Licenciatura/Bacharelado em Física).
- Aspectos sociológicos/históricos e epistemológicos sobre a ‘Natureza da Ciência’.
- Narrativas pseudo-histórica presentes em textos acadêmicos e em livros-didáticos.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h20min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h20min □ 20h00min [40 minutos]:

- Apresentação do Grupo 1 – “A hipótese de gatilho” de Phillip Lenard (1902) [25 minutos].
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [15 minutos]

20h00min □ 20h40min [40 minutos]:

- Apresentação do Grupo 2 – A hipótese de Arthur Hass [H. Lorentz] (1910) [25 minutos]
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [15 minutos]

20h40min □ 21h00min. Intervalo de descanso [20 minutos].

21h00min □ 22h00min [60 minutos]:

- Apresentação do Grupo 3 – As duas hipóteses de J. J. Thomson (1910, 1913) [40 minutos]
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [20 minutos]

22h00min □ 22h30min:

- Síntese das discussões/reflexões.
- Comentários sobre aspectos da NdC e sobre a narrativas pseudo-históricas nos livros didáticos.
- Destacar a ‘omissão seletiva’ de qualquer referência às tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico na ampla maioria dos livros didáticos.

22h30min □ 23h00min: Margem de Tempo de Segurança.

VI. Avaliação

- Ficha Avaliativa de Seminários (arguição; análises; compreensão; pontualidade; clareza etc.)
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso;
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (livre criação do estudante).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 16.
- Entregar Texto 18: “Uma Determinação Fotoelétrica Direta da Constante de Planck” (Millikan, 1916c)
- Organizar a apresentação do Seminário Coletivo n. 3.

Questão Problematicadora para análise e leitura prévia do Texto 18.

Até que ponto as informações apresentadas no artigo científico de Robert Millikan (1916c), intitulado *Uma Determinação Fotoelétrica do 'h' de Planck*, permitem a realização de discussões, reflexões e contra argumentações explícitas em relação a algumas imagens distorcidas do trabalho científico identificadas no estudo de Gil-Pérez *et al.* (2001)?

Para responder à questão, em particular, considere as seguintes quatro imagens distorcidas sobre a natureza das ciências:

- Visão individualista e elitista
- Visão aproblemática e a-histórica
- Visão empírico-indutivista
- Visão rígida e infalível do "Método Científico"

Leve em consideração os seguintes "temas" para reflexão sobre a natureza das ciências:

- O papel dos indivíduos/sujeitos e da comunidade científica
- As controvérsias científicas históricas e contemporâneas
- Os métodos de coleta, observação e análise de dados.
- Diferenças epistemológicas entre "leis" e "teorias" científicas.

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 17 (04 de julho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- {1914 -1917} As investigações experimentais de Robert Millikan sobre o efeito fotoelétrico.
- Texto 18: “Uma Determinação Fotoelétrica Direta da Constante de Planck” (Millikan, 1916c)

III. Objetivos da Aula

- Reconhecer a importância do desenvolvimento histórico dos testes experimentais sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no período de 1898-1917.
- Entender o funcionamento do aparato experimental construído por Millikan e colaboradores para testar a equação fotoelétrica de Einstein.
- Entender como Millikan identificou as fontes de erros experimentais nos trabalhos predecessores e realizou suas respectivas eliminações.
- Reconhecer que Millikan aceitou a validade empírica da equação fotoelétrica de Einstein, porém, rejeitou o seu modelo quântico para natureza da luz, optando por defender uma teoria da fotoemissão clássica, fundamentada nos trabalhos de J. J. Thomson.
- Analisar e discutir, por meio da abordagem investigativa, quais aspectos sobre a Natureza da Ciência que se destacam no artigo publicado por Millikan (1916c).
- Avaliar, até que ponto, a leitura crítica do artigo publicado por Millikan (1916c) possibilita discussões, reflexões e contra argumentações a respeito das imagens distorcidas do trabalho científico, conforme relatadas por Gil-Pérez et al. (2001).

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Principais elementos que indicam a presença de uma narrativa pseudo-histórias em textos acadêmicos e em livros-didáticos;
- Metodologia Científica Experimental Hipotético-Dedutiva
- Lei da Conservação da Energia
- Modelos Científicos para Estrutura Atômica
- Teoria clássica do eletromagnetismo de James C. Maxwell (Física Clássica)
- Matemática Básica (ensino superior em licenciatura/bacharelado em Física)

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula. Recebimento de Atividades. Lista de Presença.

19h10min □ 19h50min [50 minutos]:

- Apresentação do Grupo A – Seção 1 (Introdução) do artigo Millikan (1916c). [30 minutos].
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [20 minutos]

20h00min □ 20h50min [50 minutos]:

- Apresentação do Grupo B – Seção 2 (Arranjos Experimentais) do artigo Millikan (1916c). [30 minutos].
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [20 minutos]

20h50min □ **21h00min.** Intervalo de descanso [20 minutos].

21h00min □ **21h50min** [50 minutos]:

- Apresentação do Grupo C – Seção 3 (Fontes de Erros e suas Eliminações) do artigo Millikan (1916c). [30 minutos].
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [20 minutos]

21h50min □ **22h40min** [50 minutos]:

- Apresentação do Grupo D – Seção 4 (Teorias da Emissão Fotoelétrica) do artigo Millikan (1916c). [30 minutos].
- Análise, leitura comentada, discussão, reflexões, perguntas, dúvidas etc. [20 minutos]

22h40min □ **23h00min:** Margem de tempo de segurança.

VI. Avaliação

- Ficha Avaliativa de Seminários (arguição; análises; compreensão; pontualidade; clareza etc.)
- Posicionamento crítico-reflexivo diante de questões e temas abordados durante o curso;
- Memórias & Discussões decorrentes a aula implementada (livre criação do estudante).

VII. Encaminhamentos para Próxima Aula

- Data de entrega das *Memórias & Reflexões* decorrente da Semana 5.
- Aviso da aplicação do “Questionário Final VOSE-EF” sobre aspectos da Natureza da Ciência.
- Aviso da aplicação do questionário avaliativo da disciplina História da Ciência 2023-1.

Ficha Avaliativa de Seminários

Cada professor irá atribuir no máximo **1,0 ponto** para cada item apresentado no quadro abaixo, e ao final fazer a soma para obtenção da nota média final da apresentação do seminário de cada grupo.

Itens	Crítérios
1	Elaboração e Uso Adequado do Material de Apoio <i>O material utilizado na apresentação possui sequência-lógica?</i>
2	Clareza e Objetividade na Apresentação <i>Os “futuros professores” apresentaram clareza e objetividade em sua exposição oral? Quando necessário, mostraram exemplos ou analogias adequadas na explicação?</i>
3	Uso Padrão/Oficial de Linguagem Culta e Técnica <i>Os “futuros professores” fizeram uso correto das regras gramaticais padrão/oficial da língua portuguesa (brasileira)?</i>
4	Pontualidade <i>Os “futuros professores” realizaram a apresentação dentro o intervalo de tempo máximo estipulado (25 minutos)?</i>
5	Equipartição do Tempo de Fala <i>Os estudantes integrantes do grupo tiveram um intervalo de tempo de fala aproximadamente igual?</i>
6	Coerência com o “Referencial Teórico” (livro, artigo etc.) <i>O conteúdo da apresentação apresenta absoluta correspondência com o capítulo do livro-didático especificamente indicado?</i>
7	Quanto à Fundamentação Teórica-Conceitual <i>Os “futuros professores” demonstraram domínio conceitual sobre o tema proposto (o efeito fotoelétrico)?</i>
8	Análise da Presença de Elementos de Pseudo-História no Referencial <i>Foi realizada a análise acerca de possíveis elementos de pseudo-história acerca do capítulo indicado no livro-didático? Quais as conclusões?</i>
9	Análise da “Visão de NdC” Transmitida pelo Referencial <i>Foi realizada a análise acerca da “Visão de NdC” transmitida pelos autores no capítulo indicado no livro-didático? Quais as conclusões?</i>
10	Arguição Perante às Perguntas dos Professores <i>Ao final da apresentação, os “futuros professores” foram cordiais e competentes na construção das respostas diante de questões elaboradas pelos professores?</i>

	Curso: Licenciatura/Bacharelado em Física – UNESP, campus Bauru-SP. Disciplina: História da Ciência (1º Semestre 2023) Plano de Aula: Semana 18 (11 de junho de 2023)	

I. Público-alvo:

Estudantes do 5º Período do Curso de Licenciatura em Física, UNESP, campus Bauru-SP.

II. Conteúdo ou Temas Abordados

- Aplicação do “**Questionário Inicial VOSE-EF**” sobre aspectos da Natureza da Ciência
 1. Sobre os Modelos Científicos.
 2. Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro) (leis)
 3. Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro) (teorias)
 4. Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias
 5. Sobre o as Teorias e Leis Científicas
 6. Sobre o Processo de Validação do Conhecimento Científico
 7. Sobre a Natureza das Observações Experimentais
 8. Sobre a Metodologia Científica
 9. Sobre as Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica (não neutralidade)

III. Objetivos da Aula

- Coletar dados para, posteriormente, caracterizar as concepções posteriores dos estudantes sobre diferentes aspectos da NdC ao término da disciplina de História das Ciências 2023-1.
- Coletar informações acerca das percepções dos sujeitos da pesquisa em relação à organização didática, ao planejamento e qualidade dos materiais didáticos utilizados na História da Ciência 2023-1.

IV. Conhecimentos Prévios (Subsunções)

- Concepções sobre alguns aspectos importantes relacionados a processo de construção do conhecimento científico.

V. Procedimentos de ensino

19h00min □ 19h10min [10 minutos]:

Tempo destinado à recepção dos estudantes. Organização da sala de aula (cadeiras, multimídia etc.). Lista de Presença.

19h10min □ 20h20min [10 minutos]:

Tempo destinado à entrega e justificativa da aplicação do “Questionário Inicial VOSE-EF”. Leitura e esclarecimentos acerca das instruções.

19h20min □ 20h20min [60 minutos]:

Estimativa de tempo necessário para responder às nove questões “Questionário Final VOSE-EF”.

1. Sobre os Modelos Científicos.
2. Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro) (leis)
3. Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (tentativa e erro) (teorias)
4. Sobre o Uso da Imaginação, Criatividade e Analogias
5. Sobre o as Teorias e Leis Científicas
6. Sobre o Processo de Validação do Conhecimento Científico
7. Sobre a Natureza das Observações Experimentais
8. Sobre a Metodologia Científica
9. Sobre as Influências Histórico-Sociais na Pesquisa Científica (não neutralidade)

20h20min □ **20h30min.** Intervalo de descanso *[10 minutos]*.

20h30min □ **21h30min** *[60 minutos]*

Estimativa de tempo necessário para responder às questões “Questionário Avaliativo da Disciplina História da Ciência 2023-1”.

1. Sobre a participação do estudante durante a disciplina (comprometimento)
2. Sobre a qualidade dos textos históricos (linguagem, dimensão, abordagem etc.)
3. Sobre o prazo estipulado pelos professores para entrega das atividades.
4. Sobre a condução das discussões e reflexões pelos professores.
5. Sobre a organização estrutural e sequência lógica do assuntos abordados.
6. Sobre a influência da disciplina para a uma imagem mais precisa da NdC.
7. Sobre a influência da disciplina para formação crítica como futuros professores.
8. Sobre a qualidade geral da disciplina de História da Ciência 2023-1.
9. Sobre a oferta da disciplina na matriz curricular licenciatura.
10. Sobre a oferta da disciplina na matriz curricular bacharelado.
11. Sobre as concepções sobre NdC após a disciplina (questão aberta)
12. Sobre as concepções sobre uso didático da História da Ciência após a disciplina (questão aberta)
13. Sobre as concepções de prática docente após a disciplina (questão aberta)
14. Sobre as principais dificuldades e/ou obstáculos encontrados ao longo da disciplina (questão aberta)
15. Comentários livres sobre outros aspectos relevantes sobre o curso (questão aberta)

21h30min □ **22h00min:** Encerramento da disciplina.

VI. Avaliação

- ✓ Respostas dos estudantes ao “Questionário Inicial VOSE-EF”.
- ✓ Respostas dos estudantes ao “Questionário Avaliativo da Disciplina História da Ciência”

APÊNDICE B

QUESTIONÁRIO VOSE-RCN

Questão	Aspectos da Natureza das Ciências (NdC)
1	Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (<i>teorias científicas</i>)
2	Sobre Natureza do Conhecimento Científico (<i>leis científicas</i>)
3	Sobre o Uso de Imaginação, Criatividade e Analogias
4, 5 e 6	Sobre as Leis e Teorias Científicas (<i>definições; descoberta ou construção</i>)
7	Sobre o Processo de Validação e Aceitação de Novas Teorias Científicas
8	Sobre o Processo de Investigação Científica (<i>metodologia científica</i>)
9	Sobre Natureza das Observações Experimentais
10 e 11	Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas
12	Sobre a Natureza da Ciência (<i>geral</i>)

INSTRUÇÕES

Cada questão deste questionário começa com uma afirmação sobre algum tema relacionado à Natureza da Ciência. A expressão Natureza da Ciência (NdC), geralmente, é usada por pesquisadores para se referir a questões tais como: O que a ciência é? Como se dá a atividade científica? Quais atividades humanas podem ser consideradas científicas? Como os cientistas atuam como grupo social? Como a sociedade e a ciência se influenciam mutuamente? De outro modo, entender a Natureza da Ciência significa responder à seguinte questão: Afinal de contas, o que são as Ciências Naturais e como se dá o processo de validação e aceitação do conhecimento científico?

Muitas afirmações neste questionário adotam uma certa posição que pode ser considerada radical. Naturalmente, você pode livremente concordar fortemente com elas, discordar fortemente ou ter outro pensamento sobre o assunto. Entretanto, em cada afirmação: **VOCÊ DEVE ESCOLHER UMA ÚNICA OPÇÃO!**

Cada pergunta (ou afirmação inicial) será seguida de 4 a 13 argumentos e respostas possíveis. Logo, primeiramente, faça uma leitura global, isto é, uma sondagem de todas as respostas, porém, sem ainda tomar posição totalmente definida. Após uma segunda (ou terceira) leitura, escolha uma das opções (**DF, D, I, C ou CF**) de acordo com seu entendimento sobre a atividade científica, sobre a comunidade científica e seus processos de construção e validação de afirmações científicas.

DF = Discordo Fortemente (quando você estiver em pleno desacordo com toda a afirmação).

D = Discordo (quando você estiver convicto que discorda de alguma parte da afirmação, mas ainda tem dúvidas ou até mesmo concorda com outras partes da afirmação).

I = Indeciso, Não Sei ou Sem Comentários (quando você não tiver conhecimento e/ou repertório sobre o tema).

C = Concordo (quando você estiver convicto que concorda com quase toda a afirmação, mas ainda ficou em dúvida com relação a algumas outras palavras ou termos utilizados. Neste caso, pode haver dúvidas, mas não discordâncias convictas).

CF = Concordo Fortemente (quando você estiver em pleno acordo com toda a afirmação).

É reforçada a recomendação de ler os itens afirmativos 02 (duas) ou 03 (três) vezes para que você não corra o risco de ser induzido a um posicionamento em particular devido à ordem de apresentação dos argumentos.

Observação: Os “temas”, as “questões” e as “suas respostas” dadas a este “Questionário sobre a Natureza da Ciência”, no dia de hoje, serão objetos de recorrentes análises, discussões e reflexões no decorrer toda essa disciplina. Além disso, a carga de leitura acadêmica na disciplina sobre o assunto “Natureza da Ciência”, bem como a necessidade de proposição de outras atividades adicionais, será considerada com base em seus conhecimentos prévios apresentados neste questionário. De tal forma que, quanto mais fidedignas forem suas respostas nesse momento, mais facilmente você poderá avaliar a “real” contribuição da disciplina de História das Ciências para sua formação como futuro(a) professor(a) de física

SOBRE A NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO (teorias científicas)

“Considere a existência de uma dada teoria científica bem estabelecida, consolidada e amplamente aceita pela comunidade científica, com apoio de inúmeras pesquisas relevantes e variadas observações experimentais disponíveis, as quais foram realizadas de forma diligente (isto é, de forma extremamente cuidadosa, com muito rigor e com total respeito às normas e preceitos da ciência), tendo sido até hoje confirmadas todas as previsões dessa teoria científica.

*Um exemplo desse tipo de teoria pode ser a “**Teoria Microbiana da Doença**”. Essa teoria científica afirma que microscópicas entidades biológicas, como os micróbios, os vírus, as bactérias e os protozoários, presentes no ar, na água, na terra e até mesmo em outros seres vivos, são causadores de diversas doenças, tais como: tuberculose; cólera; sífilis; gonorreia, hanseníase, gripe, disenteria, Covid-19, entre outras”.*

01. Essa teoria das ciências biológicas, amplamente aceita, adotada e defendida pela comunidade científica atual, ainda pode ser refutada e invalidada no futuro?

A. Não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica em microbiologia no futuro, portanto, pode ser necessário que um dia essa teoria tenha que ser substituída completamente por outra.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 3.(☐) *Indeciso* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

B. Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, uma vez amplamente aceita, a teoria científica permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá no futuro.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 3.(☐) *Indeciso* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

C. Com a continuidade das pesquisas, com novos dados e informações, essa teoria poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 3.(☐) *Indeciso* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

D. Essa teoria já foi cientificamente comprovada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita pelos cientistas. Ela alcançou o *status* de verdade absoluta. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

SOBRE A NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO (leis científicas)

Considere agora existência de uma dada lei científica bem estabelecida, bastante consolidada e amplamente aceita pelos cientistas, com apoio de inúmeras pesquisas relevantes e variadas observações experimentais disponíveis, as quais foram realizadas de forma diligente (isto é, de forma extremamente cuidadosa, com muito rigor e com total respeito às normas e preceitos da comunidade científica), tendo sido, até hoje, confirmadas todas as previsões dessa lei científica.

*Um exemplo desse tipo de lei poderia ser a “**Lei da Inércia**” (1ª Lei de Newton), a qual estabelece que “todos os corpos tendem a permanecer em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, exceto na medida em que são obrigados a mudar esse estado por forças aplicadas a eles” (NEWTON, 1687, p. 12).*

02. Essa lei da Física, amplamente aceita, adotada e defendida pela comunidade científica, ainda pode ser refutada e invalidada no futuro?

A. Não é possível descartar que essa lei se mostrará inválida em uma nova observação experimental¹⁴¹, gerando uma crise e uma mudança revolucionária, sendo necessária uma substituição completa da Lei da Inércia para explicação e descrição dos movimentos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. A comunidade científica somente aceita uma lei científica após um longo processo acumulativo de inúmeras e variadas evidências empíricas disponíveis. Portanto, a Lei da Inércia permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá no futuro.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Com a realização de novas pesquisas, levantamento de dados e informações, a Lei da Inércia poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. As “Leis de Newton” para compreensão dos movimentos são comprovadas cientificamente há mais de 300 anos. Elas alcançaram o *status* de verdade absoluta. Logo, não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito por parte de outros cientistas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

¹⁴¹ **(Sugestão de alteração por parte da Banca Examinadora).** “A. Não é possível descartar que essa lei se mostrará inválida em um novo conjunto de novas observações experimentais, gerando uma crise e uma mudança revolucionária, sendo necessária uma substituição completa da Lei da Inércia para explicação e descrição dos movimentos”. Nessa nova formulação, é evitado que a afirmação seja associada à ideia de um experimento crucial, cuja observação, por si só, é capaz de refutar uma teoria (no presente mesmo, e não sob uma retrospectiva histórica). No âmbito de discussões sobre a natureza da ciência, esta crítica não pode ser negligenciada.

SOBRE O USO DA IMAGINAÇÃO, CRIATIVIDADE E ANALOGIAS

“Cientistas são pessoas que desenvolvem pesquisas científicas. Em outras palavras, com base em uma metodologia, testam e avaliam (aceitando ou rejeitando) hipóteses para chegar a conclusões nas diversas áreas do conhecimento. Ou seja, são as pessoas responsáveis por produzir e construir a própria ciência. Os praticantes da ciência devem ter um foco principal: produzir e avaliar novos conhecimentos científicos. A rotina desses profissionais inclui: elaborar e desenvolver projetos de pesquisas; publicar artigos científicos; participar de eventos acadêmicos (congressos, simpósios, encontros etc.); ministrar aulas e palestras; e conduzir treinamentos para nova geração de cientistas.

Diante desse propósito, em 1951 foi criado o Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), o primeiro grande marco para formalização da profissão de cientista no processo de institucionalização da ciência no Brasil. Atualmente, segundo a UNESCO, o Brasil possui cerca de 700 cientistas por milhão de habitantes. Outros países apresentam um número consideravelmente maior, por exemplo, a China possui 1100, a Argentina 1200, a Rússia 3100, a União Europeia 3200, os Estados Unidos 3900, Coréia e Singapura 6400, e Israel 8300”.

03. Em sua percepção, quando os cientistas estão desenvolvendo suas pesquisas, em algum momento, eles utilizam de imaginação, criatividade e analogias?

A. A imaginação e a criatividade são fontes essenciais para a inovação científica e tecnológica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Os cientistas utilizam pelo menos um pouco de imaginação e criatividade quando estão conduzindo uma pesquisa científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. A imaginação e a criatividade não são consistentes nem coerentes com os princípios lógicos e objetivos do trabalho científico.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. A imaginação e a criatividade podem se tornar um meio para um cientista defender seu ponto de vista a qualquer custo.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. A imaginação e criatividade não possui confiabilidade e credibilidade.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE LEIS E TEORIAS CIENTÍFICAS (Definições Conceituais)

“Em tempos de “Pós-Verdade” e “Fake-News”, a atenção aos significados dos termos técnicos é fundamental. Na ciência, toda discussão intelectualmente honesta começa apenas depois que se tem um conjunto de dados empíricos confiáveis, sobre os quais é possível elaborar e defender diferentes interpretações. E, para participar de uma discussão técnica de alto nível, uma pessoa necessita de experiência e de excelente qualificação profissional. Infelizmente, hoje em dia, muitas pessoas, até mesmo autoridades públicas, são despreparadas ou simplesmente agem de forma intelectualmente desonesta quando se veem incapazes de defender seus argumentos sobre um tema técnico-científico, principalmente aqueles que geram algum tipo de comoção social, optando muitas vezes por questionar a confiabilidade dos dados empíricos disponíveis ou a índole e o caráter dos cientistas envolvidos sem o apoio de evidências justificáveis. De fato, esse tipo de conduta estimula crises sociais que são geradas pela estupidez e pela desinformação, como a desconfiança infundada na eficácia de diversas vacinas historicamente bem-sucedidas, fazendo com que doenças anteriormente praticamente erradicadas, como o sarampo, voltem a ser um problema de saúde pública no Brasil e em outros países”.

04. Considerando a importância do significado correto e preciso dos termos científicos, julgue os itens abaixo.

A. As teorias científicas são suposições hipotéticas sobre algum fenômeno, com pouquíssimas evidências empíricas para apoiá-las; portanto, não possuem tanta credibilidade e nem são tão confiáveis quanto às leis científicas.

() Discordo Fortemente () Discordo () Indeciso () Concordo () Concordo Fortemente

B. Se uma teoria científica resiste a inúmeros e variados testes experimentais, então ela poderá se tornar uma lei científica; portanto, uma lei possui muito mais evidências empíricas de apoio e se aplica a um número maior de eventos e fenômenos.

() Discordo Fortemente () Discordo () Indeciso () Concordo () Concordo Fortemente

C. Existem teorias científicas que possuem mais evidências empíricas de apoio do que algumas leis científicas em fenômenos da mesma área de pesquisa.

() Discordo Fortemente () Discordo () Indeciso () Concordo () Concordo Fortemente

D. As teorias e as leis científicas são diferentes tipos de conceitos / categorias nas ciências naturais; portanto, elas não podem ser comparadas ou organizadas hierarquicamente quanto a algum grau de superioridade ou de certeza científica.

() Discordo Fortemente () Discordo () Indeciso () Concordo () Concordo Fortemente

E. As teorias e as leis científicas são conceitos / categorias idênticos, pois ambas podem ser refutadas ou invalidadas no futuro, bem como utilizadas para fazerem previsões sobre um fenômeno.

() Discordo Fortemente () Discordo () Indeciso () Concordo () Concordo Fortemente

F. As teorias e as leis científicas são conceitos / categorias diferentes, enquanto teorias produzem afirmações generalizadas e universais sobre a natureza, as leis científicas são mais específicas e restritas a casos particulares dos fenômenos.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

G. As teorias e as leis científicas são conceitos / categorias diferentes e qualquer comparação é impossível, embora ambas possam fazer predições acerca de um fenômeno, o que possibilita que ambas possam ser confirmadas ou refutadas / invalidadas.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

SOBRE LEIS E TEORIAS CIENTÍFICAS (descoberta ou construção?)

05. Se quisermos preencher a lacuna na frase abaixo, deveríamos utilizar qual palavra?

1. DESCOBERTA - com o significado de revelar, achar, encontrar, localizar algo que estava escondido.
2. CONSTRUÍDA – com o significado de desenvolver, elaborar, inventar, criar algo nunca imaginado.

“A Teoria da Gravitação Universal, _____ por Isaac Newton em 1678, passou a ser patrimônio de toda a comunidade científica, para que fosse testada, criticada, eventualmente falsificada e, por fim, incorporada ao corpus de conhecimentos da ciência” (CASTELFRANCHI, 2008, p. 83).

A. DESCOBERTA, porque Teoria da Gravitação Universal estava lá fora no mundo natural o tempo todo; e o cientista Isaac Newton a descobriu (revelou/achou/encontrou/localizou).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. DESCOBERTA, porque a Teoria da Gravitação Universal é baseada em fatos científicos e observações experimentais disponíveis.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. AMBAS, pois alguns cientistas já descobriram uma teoria por um acaso imprevisto enquanto procuravam outra coisa, mas outros cientistas podem construir (desenvolver/inventar/criar) uma teoria tomando por base fatos científicos conhecidos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. CONSTRUÍDA, porque a Teoria da Gravitação Universal é uma interpretação de fatos científicos e de observações experimentais relatadas por vários cientistas ao longo de muitos anos, entre eles, Copérnico, Galileu, Kepler, Tycho Brahe e Sir. Isaac Newton.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. CONSTRUÍDA, porque a elaboração (desenvolvimento/construção/invenção/criação) da Teoria da Gravitação Universal exigiu imaginação e a criatividade de vários cientistas ao longo de muitos anos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. CONSTRUÍDA, porque a Teoria da Gravitação Universal ainda pode ser refutada e invalidada no futuro, assim como qualquer outra teoria científica hoje bem estabelecida e solidamente apoiada pelas evidências empíricas disponíveis.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE LEIS E TEORIAS CIENTÍFICAS (descoberta ou construção?)

06. A Lei da Gravitação Universal de Isaac Newton $\langle Fg = G \cdot \frac{m1.m2}{d^2} \rangle$, assim como qualquer outra lei científica, foi:

1. DESCOBERTA - com o significado de revelar, achar, encontrar, localizar algo que estava escondido.

2. CONSTRUÍDA – com o significado de desenvolver, elaborar, inventar, criar algo nunca imaginado.

A. DESCOBERTA, porque as leis científicas estão lá fora na natureza o tempo todo; e os cientistas precisam apenas encontrá-las.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. DESCOBERTA, porque as leis científicas, como a Lei da Gravitação Universal, são baseadas em fatos científicos e observações experimentais disponíveis.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. AMBAS, pois alguns cientistas já descobriram uma lei por um acaso imprevisto enquanto procuravam outra coisa, mas outros cientistas podem desenvolver (construir/elaborar/inventar/criar) uma lei tomando por base fatos científicos conhecidos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. CONSTRUÍDA, porque os cientistas desenvolvem (elaboram/constroem/inventam/criam) leis para interpretar fatos científicos e observações experimentais relatadas por vários outros cientistas ao longo de muitos anos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. CONSTRUÍDA, porque a elaboração (desenvolvimento/construção/invenção/criação) de leis científicas, como a Lei da Gravitação Universal, exigiu imaginação e a criatividade de vários cientistas ao longo de muitos anos, entre eles, o *Sir. Isaac Newton*.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. CONSTRUÍDA, porque todas as leis científicas, até mesmo aquelas consideradas bem estabelecidas e solidamente apoiadas pelas evidências empíricas disponíveis, como a Lei da Gravitação Universal, ainda podem ser refutadas e invalidadas no futuro.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE O PROCESSO DE VALIDAÇÃO E ACEITAÇÃO DE NOVAS TEORIAS CIENTÍFICAS

“O desaparecimento dos dinossauros e de milhares de outras espécies há cerca de 66 milhões de anos foi considerado um dos grandes enigmas para a ciência. Como até mesmo as modernas técnicas de datação geológica ainda possuem um erro experimental de cerca de 100 000 anos, várias teorias científicas foram estabelecidas ao longo dos anos. Até meados do século passado, a teoria melhor aceita para explicar a catástrofe envolvia unicamente processos evolutivos associados ao planeta Terra: o desencadeamento de uma longa série de erupções vulcânicas devido aos violentos movimentos das placas tectônicas (teoria 1). Outra teoria também existia, porém, com muito menos adeptos: a “teoria do resfriamento global” (teoria 2). No entanto, em 06 de junho de 1980, os cientistas Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro e Helen V. Michel, propuseram a inédita Teoria do Impacto (ou Teoria K-Pg) para extinção em massa das espécies. Baseando-se na análise de fósseis e de camadas geológicas, eles publicaram um estudo no qual defendem, surpreendentemente, que a origem da catástrofe era extraterrestre: a queda de um gigantesco asteroide de cerca 10 km de diâmetro a uma velocidade próxima de 72 000 km/h” (teoria 3).

07. Como você acredita que a comunidade científica (a maioria de cientistas e pesquisadores) se posicionou nos primeiros 10 anos após o surgimento da *Teoria do Impacto* como tentativa de explicação do evento de extinção em massa de espécies?

Note e Adote: “Aceitar” uma teoria é uma postura adotada pela comunidade científica quando as pesquisas relevantes sobre um certo fenômeno são consideradas como efetivamente completadas. Logo, “aceitar” uma determinada teoria “T” é julgar que essa teoria não necessita ser submetida a investigações futuras, de tal forma que ela já está bem estabelecida a ponto de ser utilizada em novos projetos de ciência aplicada, e também incluída no seletor “estoque de conhecimentos científicos consolidados”.

A. Diante do impasse, a comunidade científica deixou temporariamente em aberto o julgamento e não aceitou nenhuma das três teorias antes de distinguir, por meio da argumentação e de novas evidências empíricas, qual delas era definitivamente a melhor.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Diante do impasse, a comunidade científica aceitou as três teorias científicas, porque todas forneciam explicações racionais, plausíveis e com o apoio de evidências empíricas disponíveis, porém, com base em diferentes perspectivas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Como é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas, a comunidade científica escolheu continuar aceitando a teoria científica com a qual ela já estava mais familiarizada¹⁴².

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. A comunidade científica escolheu aceitar a teoria mais simples, evitando as teorias abstratas, difíceis e complexas. A simplicidade é um critério importante no momento de escolha entre teorias competidoras e incompatíveis sobre um mesmo fenômeno.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

¹⁴² (Sugestão de alteração pela Banco Examinadora). **C.** Como é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas, a comunidade científica escolheu continuar aceitando a teoria científica com a qual ela já estava mais familiarizada, até que novos estudos ou evidências mais conclusivas mostrassem a sua pertinência. Entende-se a essência do que está em jogo – a relutância à aceitação do novo – mas da forma como estava redigida, a afirmação era muito radical. Não fosse assim o conhecimento não teria a dinamicidade que tem. Observe-se que havia uma segunda teoria - a teoria do resfriamento global - também em cena.

E. O *status* acadêmico de cada grupo de cientistas (experiência, prestígio, reputação, gênero, nacionalidade etc.) teve um papel importante e influenciou no processo de aceitação de uma das três teorias pela comunidade científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. Em tais situações, a comunidade científica quase sempre tende a aceitar as novas teorias científicas, preferencialmente aquelas que apresentam somente pequenas modificações com relação à teoria atualmente aceita.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Em tais situações, a comunidade científica usa, pelo menos um pouco, de intuição (pressentimento) para julgar a aceitação de uma das três teorias científicas competidoras.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. O grau de alcance, de fecundidade e de “fertilidade” de cada uma das três teorias, isto é, o potencial para no futuro próximo os cientistas investigam novos fenômenos, bem como atrair recursos para novas pesquisas, foi decisivo no processo de escolha.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE O PROCESSO DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA (metodologia científica)

*Geralmente, é afirmado que a enorme confiança e credibilidade atribuída pela sociedade ao trabalho científico deve-se, principalmente, à aplicação do chamado **Método Científico**. Esse método, na maioria das vezes, é apresentado como um método de investigação do tipo "passo-a-passo", ou receita a ser rigorosamente seguida. Suas etapas sequenciais e obrigatórias são:*

- 1ª Etapa. Observar um fenômeno do mundo natural;*
- 2ª Etapa. Criar hipóteses sobre esse fenômeno observado;*
- 3ª Etapa. Projetar um aparato experimental para testar as hipóteses anteriormente criadas;*
- 4ª Etapa. Realizar a coleta de dados com extremo rigor, precisão e cuidado.*
- 5ª Etapa. Realizar análises e discussões racionais e objetivas com base nas evidências empíricas disponíveis;*
- 6ª Etapa. Elaborar conclusões sobre validade ou não das hipóteses inicialmente criadas.*

Você alguma vez já estudou sobre o **Método Científico**? () **Sim** () **Não**

08. Analise as afirmativas abaixo.

A. O *Método Científico* é útil na maioria dos casos, mas não é nenhuma garantia de resultados válidos e positivos. Portanto, os cientistas normalmente precisam construir (elaborar / criar / inventar) novos métodos de investigação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Não existe um *Método Científico* fixo, universal e obrigatório para todas as pesquisas científicas. Desde que as metodologias de investigação estejam apoiadas no valor da evidência empírica, na lógica e na argumentação, qualquer método é válido e aceitável¹⁴³.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Não existe um *Método Científico* fixo, universal e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, descoberto (achado / encontrado / localizado) acidentalmente¹⁴⁴.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. Existem diferentes tradições e diversas metodologias científicas que variam radicalmente de acordo com aquilo que se quer estudar (planetas, doenças, fósseis, átomos e moléculas); e é isto que determina o método pelo qual a pesquisa científica irá ocorrer.

¹⁴³ **(Sugestão de alteração pela Banca Examinadora).** *B. Não existe um Método Científico fixo, universal e obrigatório para todas as pesquisas científicas. Desde que as metodologias de investigação estejam apoiadas no valor da evidência empírica, em teorias científicas consolidadas, na lógica e na argumentação, qualquer método é válido e aceitável.* Certamente, não é apenas a evidência empírica que deve ser ressaltada, para não deixar margem a concepção (empírico-indutivista e atórica) de que é a partir dos fatos que se elaboram construções teóricas.

¹⁴⁴ **(Sugestão de alteração pela Banca Examinadora).** *C. Na prática, não se pode dizer que existe o existe o Método Científico fixo, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, construído com base em observações acidentais.*

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. Desde que seja seguido rigorosamente, o *Método Científico* é uma garantia de resultados válidos, confiáveis, precisos, imparciais e objetivos. Por isso, a comunidade científica adota e aceita somente essa metodologia de investigação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. A comunidade científica recomenda fortemente o uso do *Método Científico*, porque ele é um procedimento sistemático, lógico e racional de investigação, cujo objetivo é facilitar a obtenção de conhecimentos sobre os fenômenos físicos, químicos e biológicos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. As investigações científicas podem se desenvolver de diversas maneiras. Mas o importante é que, quando os resultados das pesquisas se tornam públicos, a comunidade científica utilizará o *Método Científico* para verificar sua confiabilidade e possíveis fraudes.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE A NATUREZA DAS OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS

“É bastante discutido na História, Filosofia e Sociologia das Ciências se as observações experimentais realizadas por um grupo de cientistas foram influenciadas ou não por suas crenças pessoais, valores socioculturais, preferências teóricas e metodológicas, ideologias e, em especial, por suas expectativas futuras com os resultados da pesquisa: lucro, fama; prestígio etc.”.

09. Na sua opinião, é válido, razoável e seguro dizer que cientistas, agindo o mais honestamente possível, podem relatar observações experimentais diferentes, até mesmo contraditórias, na mesma época, para um mesmo fenômeno ou problema que está sendo investigado [por exemplo: uma doença infecciosa]?

A. Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque diferentes valores e crenças levam a diferentes expectativas que, por sua vez, influenciam na coleta e análise de dados.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque os cientistas formados na mesma área de pesquisa possuem ideias muito semelhantes.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque a excelente formação e treinamento acadêmico possibilitam que cientistas abandonem seus valores e crenças pessoais, tornando-se neutros e objetivos na condução de suas pesquisas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque as observações experimentais são exatamente aquilo que nós vemos e nada mais. Fatos são fatos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos. Embora a subjetividade não possa ser completamente eliminada na observação, a ciência adota mecanismos para melhorar sua objetividade, como a publicidade dos resultados e a revisão por pares.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, embora as imagens formadas na retina sejam exatamente iguais. Porém, a interpretação é não neutra, isto é, aquilo que cada cientista percebe é influenciado pelo contexto e por fatores subjetivos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE AS INFLUÊNCIAS HISTÓRICAS-SOCIAI-CULTURAIS NAS PESQUISAS CIENTÍFICAS

***Valores Socioculturais** são valores relacionados à cultura, à educação dos indivíduos e às normas de socialização. São exemplos: valores éticos, morais, humanos, religiosos, sociais, culturais, ambientais, ideológicos, entre outros. Os valores socioculturais podem variar de cultura para cultura, de época para época e, quase sempre, se modificam ao longo da história de cada sociedade. Dessa forma, em geral, não é raro que diferentes pessoas, instituições ou países defendam valores socioculturais totalmente contraditórios, tais como:*

SOLIDARIEDADE vs INDIVIDUALISMO
BEM-ESTAR SOCIAL e HUMANO vs PROPRIEDADE PRIVADA e LUCRO
SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL vs DOMINAÇÃO e EXPLORAÇÃO DA NATUREZA
IGUALDADE e DIVERSIDADE vs SUPREMACIA (racial, étnica, religiosa ou de gênero)

10. Nesse contexto, como você se posiciona quanto às afirmativas abaixo a respeito da influência ou não de elementos histórico-sociais na pesquisa científica?

A. Com excelente treinamento e formação acadêmica, os cientistas são capazes de dedicar-se de forma imparcial, autônoma e livre da influência de valores socioculturais na realização de suas investigações científicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. O conhecimento científico é neutro, ou seja, não político, não ideológico e autônomo. Além disso, requer e possui um elevado grau de imparcialidade e objetividade; portanto, é livre da influência e da interferência de valores socioculturais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Os valores socioculturais não influenciam nem a direção e nem a escolha dos temas das investigações científicas, mas as aplicações tecnológicas da ciência podem ser julgadas como “boas” ou “más” de acordo com os valores socioculturais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque o direcionamento das pesquisas, isto é, a escolha dos temas, fenômenos e problemas a serem investigados, responde apenas ao interesse em desenvolver cada vez mais o conhecimento científico por si só.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque ela trabalha de acordo com os princípios do *Método Científico*, ou seja, a escolha racional entre hipóteses e teorias não envolve questões relacionadas a valores.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque suas implicações lógicas não envolvem juízos de valor. Suas afirmações baseiam-se somente em evidências empíricas disponíveis, previsões teóricas e na argumentação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Os valores socioculturais podem influenciar o direcionamento e a escolha dos temas e fenômenos nas pesquisas científicas, exercendo um papel muito relevante, por exemplo, na avaliação de possíveis impactos negativos de futuras aplicações tecnológicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. A ciência não é neutra, isto é, não está livre da influência de valores socioculturais, pois os próprios cientistas são inevitavelmente influenciados pelos valores de sua sociedade, os quais podem refletir em suas observações experimentais e interpretações.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

I) A ciência não é neutra porque os fatores subjetivos não podem ser completamente eliminados, pois como atividade humana, a ciência é inevitavelmente influenciada por valores, crenças pessoais, vieses ideológicos, contextos políticos, econômicos e sociais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

J) A ciência é neutra (livre de valores socioculturais), porque as hipóteses e teorias científicas são aceitas ou rejeitadas com base no critério da adequação empírica entre experimentos e teorias; e esse processo certamente não inclui nenhum valor sociocultural.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

K) Embora a escolha de hipóteses e teorias científicas baseia-se na confiabilidade das evidências empíricas disponíveis, ainda assim, a neutralidade científica é um mito, pois valores socioculturais e outros fatores subjetivos certamente estão presentes na ciência.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

L) A sociedade, por meio da defesa dos valores socioculturais de sua época, ao menos em alguns momentos, é capaz julgar e interferir nos métodos e nas normas de trabalho da ciência, bem como até mesmo influenciar na escolha de uma teoria científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

M) Valores socioculturais e outros aspectos subjetivos não têm relação com os fatos científicos em si, no entanto, juízos de valor têm implicações e influências sobre o interesse, sobre a relevância e sobre a aceitação ou rejeição de certas afirmações científicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE AS INFLUÊNCIAS HISTÓRICAS-SOCIAL-CULTURAIS NAS PESQUISAS CIENTÍFICAS

Leia a história abaixo.

É o ano de 2030. Clara (Prof.^a A) e Lavínia (Prof.^a B) são cientistas em um centro de biotecnologia, e elas estão pesquisando a seleção e transferência de genes orgânicos. Se o projeto de pesquisa delas for bem-sucedido, humanos estarão livres de limitações congênitas. Além da prevenção total de doenças hereditárias, as pessoas estarão livres para escolher e transferir genes eugênicos. O mundo humano nunca mais terá deficiências hereditárias congênitas!

A pesquisa já entrou na última etapa, mas a população, em geral, se opõe, e até mesmo a própria instituição financiadora da pesquisa tem a intenção de reduzir o orçamento. Na verdade, Clara (Prof.^a A) já está começando a questionar a continuidade da pesquisa. Ela é uma cristã devotada e acredita que Deus abrirá portas para todos. Assim, mesmo que as pessoas nasçam com várias doenças e deficiências, a diversidade e a imprevisibilidade da humanidade estão no cerne da nossa história. Clara (Prof.^a A) não acredita que o desenvolvimento científico-tecnológico deveria mudar a essência do ser humano. Portanto, em sua opinião, quando valores socioculturais e crenças pessoais estão em conflito com os interesses das ciências naturais, a escolha deveria ser em prol da preservação dos valores socioculturais, porque os valores fundamentais da ciência dependem da própria "pessoa" em si.

Entretanto, Lavínia (Prof.^a B) não pensa da mesma maneira. Ela acredita que a natureza da ciência é absolutamente objetiva e que valores socioculturais são preferências momentâneas da população, sempre estão se modificando de acordo com o ambiente social e são uma representação bastante subjetiva dos valores socioculturais. Em outras palavras, para Lavínia (Prof.^a B), uma pesquisa científica que está sendo atualmente rejeitada pelos valores socioculturais poderia se tornar uma necessária aspiração da sociedade futuramente. Portanto, argumenta Lavínia (Prof.^a B), além de ser indigno, é uma bobagem abandonar a natureza objetiva constante das ciências naturais por causa de um determinado valor sociocultural subjetivo fugaz, efêmero e momentâneo.

As cientistas Clara (Prof.^a A) e Lavínia (Prof.^a B) inevitavelmente começam a discutir e a se desentender por causa do assunto. Após um longo período de reflexão, Clara (Prof.^a A) decide retirar-se do projeto de pesquisa, mas Lavínia (Prof.^a B) escolhe continuar desenvolvendo a investigação científica.

*Uma vez que não há motivos para jogar no lixo as técnicas bem-sucedidas e os valiosos instrumentos tecnológicos desenvolvidos durante a pesquisa, Clara (Prof.^a A) decide mudar o foco de sua pesquisa para a seleção e transferência genética em plantas, na tentativa de escolher um tema mais bem aceito pelos valores socioculturais dominantes. Clara (Prof.^a A) finalmente consegue transferir com sucesso os genes anticâncer de *Taxus mairei* para o centeio, criando centeio anticâncer. Olhando para trás, ela não se arrepende de ter saído do projeto anterior e acredita que, embora a natureza da ciência possa ser objetiva, a manifestação dos valores socioculturais deve eventualmente voltar à essência fundamental dos "seres humanos".*

Lavínia (Prof.^a B), persistindo em continuar com o projeto original, finalmente obteve sucesso em formas vivas de animais nos resultados da pesquisa e, futuramente, a tendência é avançar com a pesquisa em seres humanos. Ela também não se arrepende de sua escolha e até trabalha mais arduamente no projeto por acreditar que essa história não acaba aqui. Para Lavínia (Prof.^a B), toda natureza e o valor da investigação científica surgirão somente no futuro. Lavínia (Prof.^a B) afirma que é deixado para a história, ao invés de valores socioculturais, o julgamento acerca da importância e relevância de suas investigações.

Em sua opinião, atualmente, qual a possibilidade dessa história ocorrer dentro da comunidade científica?

- () baixíssima ou extremamente rara.
- () baixa e bastante improvável, talvez uma exceção pontual.
- () média, provável ou comum, talvez frequente.
- () alta e bastante provável, certamente frequente.
- () altíssima e extremamente provável.

11. Como você se posiciona quanto aos pensamentos divergentes das cientistas Clara (Profª. A) e Lavínia (Profª. B)?

A. Os cientistas devem ter consciência quando estão desenvolvendo e conduzindo pesquisas científicas (*Clara - Profª A*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Deve-se considerar simultaneamente a importância das pesquisas científicas e os valores socioculturais (*Clara - Profª A*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. As pesquisas científicas não devem ser totalmente separadas de valores socioculturais de sua época (*Clara - Profª A*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. As pesquisas científicas não devem colocar em risco a diversidade do ser humano (*Clara - Profª A*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. As pesquisas científicas devem ser completamente separadas de crenças pessoais (*Lavínia - Profª. B*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. As pesquisas científicas devem ser completamente separadas de valores socioculturais (*Lavínia - Profª. B*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Persistir sempre com o valor mais alto da ciência: buscar ininterruptamente a verdade (*Lavínia - Profª. B*).

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. Eu me vejo agindo como as duas, pois ambas pensam com espírito científico e são influenciadas por seus respectivos valores e crenças pessoais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

I. Eu não me vejo agindo como nenhuma das duas, pois ambas não estão sendo suficientemente neutras, imparciais e objetivas em suas pesquisas científicas, sendo fortemente influenciadas por seus respectivos valores e crenças pessoais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE A NATUREZA DA CIÊNCIA (geral)

“Em um congresso, um grupo de cientistas debateu a questão do aumento do aquecimento global, tendo como base trabalhos científicos publicados anteriormente. Ao final do debate, um grupo de cientistas (grupo 1) considerou que o aumento do aquecimento nos últimos anos foi intensificado pelas ações do ser humano em decorrência da crescente emissão de gases estufa. Para outro lado, para outro grupo (grupo 2), essa conclusão está equivocada, defendendo que o aumento da temperatura terrestre é decorrente de um fenômeno atmosférico natural (efeito estufa) e, portanto, independente das ações humanas. Houve ainda um terceiro grupo (grupo 3), que considerou que o impacto humano em escala global é nulo, e que a Terra está, na verdade, esfriando”.

12. Diante desse contexto, como você se posiciona quanto às afirmativas abaixo?

A. Caracteriza uma discussão, que é um evento comum na prática científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Neste caso, assim como na ciência em geral, apenas um dos grupos deve estar correto.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Não se caracteriza como uma prática científica, pois há pontos discordantes entre os cientistas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. O uso de argumentos para defender uma posição deve fazer parte da prática científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. Reduz a credibilidade da ciência, uma vez que não fornece uma verdade para a população e os tomadores de decisão.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. Revela a necessidade da revisão de pontos de vista pelos cientistas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Os grupos podem estar corretos dependendo da escala temporal de estudo.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. Abre a possibilidade de colaboração entre cientistas com pontos de vista semelhantes para fortalecer um dos posicionamentos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

I. Um dos grupos poderia convencer o outro, caso suas evidências fossem mais consistentes.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

J. Apenas um dos grupos está correto, pois na ciência não há mais de uma perspectiva teórica vigente sobre um determinado assunto.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

K. Os grupos só poderiam chegar a um consenso se utilizassem o mesmo contexto teórico para resolver o impasse.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

(a) L. O impasse só poderá ser resolvido com experimentação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

M. O impasse poderá ser resolvido independente do contexto político e econômico.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

N. O impasse poderá permanecer sem solução, pois a ciência pode estar sujeita a interesses políticos e econômicos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

O. O impasse deverá ser resolvido, pois a ciência é neutra.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

P. Impasses acontecem porque existe uma grande variação de personalidades humanas e, portanto, não há um único perfil de cientista.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

Q. Para ser aceito na comunidade científica, um posicionamento não precisa ser publicado em revista científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

R. Para ser aceito na comunidade científica, um posicionamento precisa ser divulgado em meios de comunicação acessíveis para a sociedade.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

S. Os posicionamentos científicos publicados em revistas de maior credibilidade tendem a ser os mais aceitos entre os cientistas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

T. O uso de uma analogia, como a contida no termo “efeito estufa”, descaracteriza um termo como científico.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

U. O uso da interdisciplinaridade descaracteriza o aquecimento global como um tema de interesse científico.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

V. Um cientista pode invalidar um posicionamento ao manipular os dados que favoreçam um posicionamento.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

W. Os temas de pesquisa de um cientista independem das fontes de financiamento.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Indeciso* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

X. Os posicionamentos publicados em revistas de alta credibilidade não são contestados.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

Y. A ciência busca formular hipóteses testáveis, mas não precisa confrontá-las com o mundo real.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

Z. Dois dos posicionamentos não podem ser considerados científicos, pois o erro não é uma possibilidade na ciência.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Indeciso* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

APÊNDICE C

QUESTIONÁRIO VOSE-EF

Questão	Aspectos da Natureza das Ciências (NdC)
1	Sobre a Natureza dos Modelos Científicos
2 e 3	Sobre a Natureza do Conhecimento Científico (<i>leis e teorias científicas</i>)
4	Sobre o Uso de Imaginação, Criatividade e Analogias
5	Sobre as Teorias e Leis Científicas (<i>definições</i>)
6	Sobre o Processo de Validação e Aceitação do Conhecimento Científico
7	Sobre Natureza das Observações Experimentais
8	Sobre o Processo de Investigação Científica (<i>metodologia científica</i>)
9	Sobre as Influências Histórico-Sociais-Culturais nas Pesquisas Científicas

INSTRUÇÕES

Cada questão deste questionário começa com uma afirmação sobre algum tema relacionado à Natureza da Ciência. A expressão Natureza da Ciência (NdC), geralmente, é usada por pesquisadores para se referir a questões tais como: O que a ciência é? Como se dá a atividade científica? Quais atividades humanas podem ser consideradas científicas? Como os cientistas atuam como grupo social? Como a sociedade e a ciência se influenciam mutuamente? De outro modo, entender a Natureza da Ciência significa responder à seguinte questão: Afinal de contas, o que são as Ciências Naturais e como se dá o processo de validação e aceitação do conhecimento científico?

Muitas afirmações neste questionário adotam uma certa posição que pode ser considerada radical. Naturalmente, você pode livremente concordar fortemente com elas, discordar fortemente ou ter outro pensamento sobre o assunto. Entretanto, em cada afirmação: **VOCÊ DEVE ESCOLHER UMA ÚNICA OPÇÃO!**

Cada pergunta (ou afirmação inicial) será seguida de 4 a 13 argumentos e respostas possíveis. Logo, primeiramente, faça uma leitura global, isto é, uma sondagem de todas as respostas, porém, sem ainda tomar posição totalmente definida. Após uma segunda (ou terceira) leitura, escolha uma das opções (**DF, D, I, C ou CF**) de acordo com seu entendimento sobre a atividade científica, sobre a comunidade científica e seus processos de construção e validação de afirmações científicas.

DF = Discordo Fortemente (quando você estiver em pleno desacordo com toda a afirmação).

D = Discordo (quando você estiver convicto que discorda de alguma parte da afirmação, mas ainda tem dúvidas ou até mesmo concorda com outras partes da afirmação).

I = Indeciso, Não Sei ou Sem Comentários (quando você não tiver conhecimento e/ou repertório sobre o tema).

C = Concordo (quando você estiver convicto que concorda com quase toda a afirmação, mas ainda ficou em dúvida com relação a algumas outras palavras ou termos utilizados. Neste caso, pode haver dúvidas, mas não discordâncias convictas).

CF = Concordo Fortemente (quando você estiver em pleno acordo com toda a afirmação).

É reforçada a recomendação de ler os itens afirmativos 02 (duas) ou 03 (três) vezes para que você não corra o risco de ser induzido a um posicionamento em particular devido à ordem de apresentação dos argumentos.

Observação: Os “temas”, as “questões” e as “suas respostas” dadas a este “Questionário sobre a Natureza da Ciência”, no dia de hoje, serão objetos de recorrentes análises, discussões e reflexões no decorrer toda essa disciplina. Além disso, a carga de leitura acadêmica na disciplina sobre o assunto “Natureza da Ciência”, bem como a necessidade de proposição de outras atividades adicionais, será considerada com base em seus conhecimentos prévios apresentados neste questionário. De tal forma que, quanto mais fidedignas forem suas respostas nesse momento, mais facilmente você poderá avaliar a “real” contribuição da disciplina de História das Ciências para sua formação como futuro(a) professor(a) de física

SOBRE A NATUREZA DOS MODELOS CIENTÍFICOS

Questão 01. Qual a relação entre os modelos científicos (*ex: modelo do Big-Bang, modelo de “quantum de luz”; modelo-padrão das partículas elementares*) e a realidade física tal qual ela é?

A. A construção de modelos científicos está fundamentada na corroboração empírica, porém, esse processo também reflete o papel essencial de leis e teorias subjacentes, uso de imaginação, criatividade e analogias por parte dos cientistas.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo*

B. Uma vez aceito e incorporado ao *corpus* de conhecimento das ciências, um modelo científico é considerado uma cópia fiel da realidade. Portanto, os modelos científicos atualmente aceitos representam de forma autêntica a realidade física.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo*

C. Os modelos científicos representam de forma simplificada a realidade física, a qual foi construída (não revelada) por meio de deduções matemática, da experimentação e observação rigorosas.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo*

D. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois isso é impossível. No entanto, os modelos são construídos para explicar de maneira satisfatória os fenômenos e as observações empíricas disponíveis.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo*

E. Os atuais modelos científicos, os quais são bastante abrangentes e precisos, representam de forma autêntica a realidade física, a qual foi revelada (não construída) por meio de deduções matemáticas, da experimentação e observação rigorosas.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

F. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois isso é impossível, uma vez que são construções humanas e, portanto, limitadas pela nossa compreensão e pelas observações empíricas disponíveis.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

G. Modelos científicos não representam de forma autêntica a realidade física, pois estão sujeitos a revisões diante de novas evidências, podendo sofrer ajustes e até mesmo serem substituídos por outros mais abrangentes e precisos.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

SOBRE A NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

(teorias científicas)

Questão 02. A teoria quântica da luz de Albert Einstein, cujo desenvolvimento teve início em 1905, embora tenha sido rejeitada por cerca de 20 anos, foi modificada ao longo do tempo, é atualmente aceita pela comunidade científica e possui muitas corroborações experimentais de seus enunciados. O que se pode afirmar acerca da validade dessa teoria nos próximos 100, 200, 300 e até 1000 anos?

A. Embora seja considerada bastante difícil, não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica sobre a natureza da luz no futuro. Dessa forma, diante de novas evidências (anomalias), pode ser necessário que a teoria quântica da luz tenha que ser substituída completamente por outra teoria.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

B. Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, sendo uma teoria amplamente aceita e corroborada nos dias de hoje, a teoria quântica da luz permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá ainda mais no futuro.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

C. Com a continuidade das pesquisas sobre a natureza da luz, com novos dados e informações, a teoria quântica da luz poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.

1.(☐) *Discordo Fortemente* 2.(☐) *Discordo* 4.(☐) *Concordo* 5.(☐) *Concordo Fortemente*

D. A teoria quântica da luz já foi corroborada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita pelos cientistas nos dias de hoje. Ela alcançou o status de verdade absoluta e está incorporada definitivamente ao “corpus” de conhecimento científico da humanidade. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

E. A “verdade científica” é uma flor muito frágil. Se no futuro os cientistas evidenciarem, sem sombra de dúvida, uma única nova observação empírica inconsistente e contraditória (anomalia) com a atual teoria quântica da luz, ela necessariamente terá de ser substituída por outra teoria científica.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

(leis científicas)

Questão 03. A lei do efeito fotoelétrico ($K_{\text{máx}} = h \cdot f - W_0$), derivada por Albert Einstein em 1905, enfatizada na descrição e justificativa de seu prêmio Nobel de Física de 1921, é atualmente aceita pela comunidade científica e possui muitas corroborações experimentais acerca de sua validade. O que se pode afirmar acerca da validade dessa lei científica nos próximos 100, 200, 300 e até 1000 anos?

A. Embora seja considerada bastante difícil, não é possível descartar completamente a chance de ocorrer uma mudança revolucionária na pesquisa científica sobre o efeito fotoelétrico no futuro. Dessa forma, diante de novas evidências, pode ser necessário que a “lei do efeito fotoelétrico de Einstein” tenha que ser substituída completamente por outra lei.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Os avanços científicos não ocorrem rapidamente, mas pelo contrário, necessitam de um longo processo acumulativo de evidências empíricas; portanto, sendo uma lei amplamente aceita e corroborada nos dias de hoje, a “lei do efeito fotoelétrico de Einstein” permanecerá totalmente preservada e se fortalecerá ainda mais no futuro.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Com a continuidade das pesquisas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, com novos dados e informações, essa lei poderá sofrer pequenas modificações evolutivas de desenvolvimento de rigor, de precisão e de aplicação, porém, sua essência e seu núcleo central ainda serão preservados no futuro.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. Nos últimos 100 anos, essa lei foi corroborada com base em inúmeras e variadas evidências empíricas, sendo amplamente aceita nos dias de hoje. Ela alcançou o *status* de verdade absoluta e está definitivamente incorporada ao “*corpus*” de conhecimento científico da humanidade. Não há mais possibilidades de questionamentos sérios a seu respeito.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. A “verdade científica” é uma flor muito frágil. Se no futuro os cientistas evidenciarem, sem sombra de dúvida, uma única nova evidência inconsistente e contraditória (anomalia) com a atual “lei do efeito fotoelétrico de Einstein”, ela necessariamente terá de ser substituída por outra lei científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE O USO DE IMAGINAÇÃO, CRIATIVIDADE E ANALOGIAS

Questão 04. Em sua percepção, por meio do estudo da História das Ciências, quando os cientistas estavam desenvolvendo suas pesquisas sobre a natureza da luz e da matéria (I. Newton, T. Young, A. Fresnel, J. C. Maxwell, H. Hertz, P. Lenard, J. J. Thomson, W. Wien, M. Planck, A. Einstein, R. Millikan e muitos outros), em algum momento, eles utilizaram a imaginação, a criatividade e analogias?

A. O uso da imaginação, da criatividade e de analogias são fontes essenciais para a inovação científica e tecnológica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Os cientistas utilizam pelo menos um pouco de imaginação, criatividade e analogias quando estão conduzindo uma pesquisa científica.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. O uso da imaginação, da criatividade e de analogias não são consistentes nem coerentes com o rigor e com os princípios lógicos e objetivos do trabalho científico.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. O uso da imaginação, da criatividade e de analogias é um meio legítimo para um cientista defender seu ponto de vista a qualquer custo.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. O uso da imaginação, da criatividade e de analogias prejudica a confiabilidade e credibilidade dos resultados científicos. Portanto é um meio ilegítimo para um cientista defender seu ponto de vista.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. Além da lógica matemática e de evidências empíricas disponíveis, os físicos teóricos (ex: J. Maxwell, M. Planck e A. Einstein) necessitaram recorrer à imaginação, criatividade e analogias para criar suas respectivas teorias científicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Os físicos experimentais (ex: P. Lenard, J. J. Thomson e R. Millikan) não precisaram recorrer à imaginação, criatividade ou analogias, porque eles observaram as propriedades da luz e dos elétrons com seus próprios olhos durante os seus respectivos testes experimentais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. Os físicos experimentais, (ex: P. Lenard, J. J. Thomson e R. Millikan) não precisaram recorrer à imaginação, criatividade ou analogias. Eles se dedicaram à coleta e análise de dados sobre a natureza da luz e da eletricidade, tarefas puramente técnicas que demandam apenas treinamento específico no uso de equipamentos e aplicação de lógica matemática.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE LEIS E TEORIAS CIENTÍFICAS

Questão 05. Considerando a importância do significado correto e preciso dos termos científicos, julgue os itens abaixo sobre teorias e leis científicas.

A. As teorias científicas são suposições hipotéticas sobre algum fenômeno, com pouquíssimas evidências empíricas para apoiá-las; portanto, não possuem tanta credibilidade e nem são tão confiáveis quanto às leis científicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Se uma teoria científica resiste a inúmeros e variados testes experimentais, então ela poderá se tornar uma lei científica; portanto, uma lei possui muito mais evidências empíricas de apoio e se aplica a um número maior de eventos e fenômenos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Existem teorias científicas que possuem mais evidências empíricas de apoio do que algumas leis científicas em fenômenos da mesma área de pesquisa.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. As teorias e as leis científicas são diferentes tipos de conceitos/categorias nas ciências naturais; portanto, elas não podem ser organizadas hierarquicamente quanto a algum grau de superioridade ou de certeza científica

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias idênticos, pois ambas podem ser refutadas ou invalidadas no futuro, bem como utilizadas para fazerem previsões sobre um fenômeno.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias diferentes, enquanto teorias produzem afirmações generalizadas e universais sobre a natureza, as leis científicas são mais específicas e restritas a casos particulares dos fenômenos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. As teorias e as leis científicas são conceitos/categorias diferentes, embora ambas possam fazer previsões acerca de um fenômeno, o que possibilita que ambas possam ser confirmadas ou refutadas/invalidadas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

H. Na História da Física, algumas leis científicas têm mostrado um período de corroboração científica (validade) relativamente mais duradouro em comparação com o tempo de vida das teorias científicas que as originaram. No entanto, é importante reconhecer que a validade científica de qualquer lei ou teoria científica está sujeita a um processo contínuo de investigação e revisão.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE O PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

Questão 06. Tomando como exemplo os três casos de controvérsias científicas históricas analisados durante esse curso de História das Ciências (*teoria corpuscular de Newton x teoria ondulatória de Young sobre a natureza da luz; interpretação inglesa [corpuscular] x germânica [ondulatória] sobre a natureza dos raios catódicos; teoria clássica do eletromagnetismo de Maxwell x teoria quântica de Einstein sobre a natureza da luz*), o que se concluir sobre os processos de aceitação de novos conhecimentos científicos? Julgue os itens a seguir considerando os fatores que podem influenciar esse processo.

Note e Adote: “Aceitar” uma teoria é uma postura adotada pela comunidade científica quando as pesquisas relevantes sobre um certo fenômeno são consideradas como efetivamente completadas. Logo, quando se diz que a teoria “T” foi “aceita”, significa que a comunidade científica considerou que essa teoria não necessita ser submetida a investigações futuras sobre seus fundamentos, de tal forma que ela já está bem estabelecida e consolidada a ponto de ser utilizada em novos projetos de ciência aplicada, e também incluída no seletor “*corpus* de conhecimentos científicos da humanidade”.

A. Diante de controvérsias científicas, os cientistas deixam temporariamente em aberto o julgamento e não aceitam nenhuma das teorias concorrentes antes de distinguir, por meio da argumentação e de novas evidências empíricas, qual delas era definitivamente a melhor.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Diante de controvérsias científicas, os cientistas aceitam as duas teorias científicas competidoras, porque ambas podem fornecer explicações racionais, plausíveis e com o apoio de evidências empíricas disponíveis, porém, com base em diferentes perspectivas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Diante de controvérsias científicas, observa-se que é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas e, portanto, os cientistas adotam atitude conservadora, isto é, a maioria deles escolhe continuar aceitando a teoria científica com a qual eles já estão mais familiarizados¹⁴⁵.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. Diante de controvérsias científicas, observa-se que a simplicidade é um critério importante no momento de escolha entre teorias competidoras e incompatíveis sobre um mesmo fenômeno.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

¹⁴⁵ **(Sugestão de alteração pela Banca Examinadora).** C. Diante de controvérsias científicas, observa-se que é bastante difícil abandonar ideias já amplamente aceitas e adotar novas e, portanto, os cientistas adotam atitude conservadora, isto é, a maioria deles escolhe continuar aceitando a teoria científica com a qual eles já estão mais familiarizados, até que novos estudos ou evidências mais conclusivas mostrassem a sua pertinência. Entende-se a essência do que está em jogo – a relutância à aceitação do novo – mas da forma como estava redigida, a afirmação era muito radical. Não fosse assim o conhecimento não teria a dinamicidade que tem.

E. Diante de controvérsias científicas, observa-se que o *status* acadêmico de cada grupo de cientistas (experiência, prestígio, reputação, gênero, nacionalidade etc.) é um fator importante e que influencia no processo de aceitação de uma teoria na comunidade científica.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

F. Diante de controvérsias científicas, observa-se que os cientistas quase sempre tendem a aceitar as novas teorias científicas, no entanto, preferencialmente aquelas que apresentam somente pequenas modificações com relação à teoria atualmente aceita.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

G. Diante de controvérsias científicas, observa-se que os cientistas usam, pelo menos um pouco, de intuição (pressentimento) para julgar subjetivamente a aceitação de uma das duas teorias científicas competidoras.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

H. Diante de controvérsias científicas, observa-se que a avaliação sobre o grau de alcance, de fecundidade e de “fertilidade” de cada uma das duas teorias, isto é, o potencial para no futuro próximo os cientistas investigarem novos fenômenos, bem como atrair recursos para pesquisas, é um fator importante no processo de escolha individual de cada cientista.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

SOBRE A NATUREZA DAS OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS

Questão 07. *“É bastante discutido na História, Filosofia e Sociologia das Ciências se as observações experimentais realizadas por um grupo de cientistas foram influenciadas ou não por suas crenças pessoais, valores socioculturais, preferências teóricas e metodológicas, ideologias e, em especial, por suas expectativas futuras com os resultados da pesquisa: lucro, fama; prestígio etc.”.*

Diante das informações compartilhadas nesse curso de História da Ciência, tomando como recorte principal as investigações científicas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no início do século XX, você considera válido, razoável e seguro dizer que cientistas, agindo o mais honestamente possível, podem relatar observações experimentais diferentes, até mesmo contraditórias, na mesma época, para um mesmo resultado experimental?

A. Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque diferentes preferências teóricas, valores e crenças pessoais levam a diferentes expectativas que, por sua vez, influenciam na coleta e análise de dados.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

B. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque os cientistas formados na mesma área de pesquisa possuem ideias muito semelhantes.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

C. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque a excelente formação e treinamento acadêmico possibilitam que cientistas abandonem suas preferências teóricas, valores, crenças e interesses, tornando-se neutros, imparciais e objetivos na condução de suas pesquisas.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

D. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos, porque as observações experimentais são exatamente aquilo que nós vemos e nada mais. As observações experimentais são meramente uma reprodução objetiva do mundo exterior. Fatos são fatos, e contra fatos científicos não há argumentos.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

E. Os relatos das observações experimentais devem ser praticamente os mesmos. Embora a subjetividade e os vieses pessoais não possam ser completamente eliminados, a prática científica adota mecanismos eficientes para melhorar sua objetividade e imparcialidade, como a publicidade dos estudos científicos e a revisão por pares.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

F. Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, embora as imagens formadas na retina sejam exatamente iguais. Porém, a interpretação é não neutra, isto é, aquilo que cada cientista percebe e compreende é influenciado pelo contexto e por fatores subjetivos.

☐ *Discordo Fortemente* ☐ *Discordo* ☐ *Concordo* ☐ *Concordo Fortemente*

G. Os relatos das observações experimentais podem ser diferentes, porque a complexidade dos fenômenos estudados, o conhecimento científico disponível e as limitações inerentes aos testes experimentais podem permitir diferentes interpretações para o mesmo resultado experimental.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

H. Os relatos das observações experimentais devem ser os mesmos, porque o uso rigoroso e diligente do Método Científico Hipotético-Dedutivo não admite interpretações diferentes para o mesmo resultado experimental.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

SOBRE A METODOLOGIA CIENTÍFICA

Questão 08a.

Afinal de contas, como funciona essa coisa chamada “Ciência[s]”? E qual sua relação com o tal do “Método Científico”? Analise os itens abaixo sobre o assunto.

A. O *Método Científico* é útil na maioria dos casos, mas não é nenhuma garantia de resultados válidos e positivos. Portanto, os cientistas normalmente precisam construir (elaborar / criar / inventar) novos métodos de investigação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. Na prática, não se pode dizer que existe o *Método Científico*, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. Se uma nova metodologia de investigação estiver apoiada no valor da evidência empírica, na lógica e na argumentação, ela será considerada válida e aceitável pela comunidade científica¹⁴⁶.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Na prática, não se pode dizer que existe o *Método Científico* fixo, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, descoberto (revelado / encontrado / localizado) acidentalmente¹⁴⁷.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. Existem diferentes tradições e diversas metodologias científicas que variam radicalmente de acordo com aquilo que se quer estudar (planetas, doenças, fósseis, átomos e moléculas); e é isto que determina a metodologia de investigação pela qual a pesquisa científica irá ocorrer.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. Desde que seja seguido rigorosamente, o *Método Científico* é uma garantia de resultados válidos, confiáveis, precisos, imparciais e objetivos. Por isso, a comunidade científica adota e aceita somente essa metodologia de investigação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. A comunidade científica apenas recomenda o uso do *Método Científico*, porque ele é um procedimento sistemático, lógico e racional de investigação, cujo objetivo é facilitar a obtenção de conhecimentos sobre os

¹⁴⁶ (Sugestão de alteração pela Banca Examinadora). B. Não existe um *Método Científico* fixo, universal e obrigatório para todas as pesquisas científicas. Desde que as metodologias de investigação estejam apoiadas no valor da evidência empírica, em teorias científicas consolidadas, na lógica e na argumentação, qualquer método é válido e aceitável. Certamente, não é apenas a evidência empírica que deve ser ressaltada, para não deixar margem a concepção (empírico-indutivista e atórica) de que é a partir dos fatos que se elaboram construções teóricas.

¹⁴⁷ (Sugestão de alteração pela Banca Examinadora). C. Na prática, não se pode dizer que existe o *Método Científico* fixo, rígido e obrigatório para o desenvolvimento de pesquisas científicas. O conhecimento científico pode ser, e foi muitas vezes, construído com base em observações acidentais.

fenômenos físicos, químicos e biológicos. No entanto, outros métodos de investigação também são considerados aceitáveis e válidos.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. As investigações científicas podem se desenvolver diversas maneiras. Mas o importante é que, quando os resultados das pesquisas se tornam públicos, a comunidade científica utilizará o *Método Científico* para verificar confiabilidade dos resultados, erros procedimentais e até mesmo possíveis fraudes.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

Questão 08b.

Como os cientistas conduzem suas investigações sobre os fenômenos naturais? Analise os itens abaixo sobre o assunto.

a. Todos os cientistas utilizam a mesma metodologia para conduzir suas pesquisas, o método científico universal.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

b. Os cientistas utilizam diferentes metodologias para conduzir suas pesquisas, até mesmo criam novas metodologias científicas caso necessário.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

c. Todos os cientistas utilizam alguma forma de metodologia científica para conduzir suas pesquisas, mas nem todas as pessoas que utilizam alguma metodologia científica em sua profissão podem ser consideradas cientistas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

Questão 08c.

Os cientistas J. J. Thomson, P. Lenard, E. Rutherford e N. Bohr propuseram seus respectivos modelos de estrutura atômica da matéria depois longos processos de investigação científica teórico-experimental. Como eles realizaram essas investigações científicas? Analise os itens abaixo sobre o assunto.

a. Todos os cientistas citados seguiram rigorosamente a mesma metodologia para conduzir suas pesquisas, o *Método Científico Universal*.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

b. Algum deles podem ter seguido rigorosamente o *Método Científico Universal* em suas pesquisas, enquanto outros podem ter adotado abordagens ligeiramente diferentes ou complementares.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

c. Em suas investigações científicas, os cientistas citados podem ter utilizado diferentes metodologias científicas, mas para validação e aceitação de seus resultados experimentais, eles seguiram rigorosamente as etapas do *Método Científico Universal*.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

d. Na prática, não se pode afirmar que existe o *Método Científico Universal* para realização de investigações científicas, pois admite-se o uso de diferentes abordagens e métodos de investigação para o mesmo fenômeno.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

SOBRE AS INFLUÊNCIAS HISTÓRICO-SOCIAIS-CULTURAIS NAS PESQUISAS CIENTÍFICAS

Questão 09. Diante das informações compartilhadas nesse curso de História da Ciência, tomando como recorte principal as investigações científicas sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico no início do século XX, como você se posiciona quanto às afirmativas abaixo a respeito da influência ou não de elementos histórico-sociais na pesquisa científica?

A. Com excelente treinamento e formação acadêmica, os cientistas são capazes de dedicar-se de forma imparcial, autônoma e livre da influência de valores socioculturais na realização de suas investigações científicas.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

B. O conhecimento científico é neutro, ou seja, não político, não ideológico e autônomo. Além disso, requer e possui um elevado grau de imparcialidade e objetividade; portanto, é livre da influência e da interferência de valores socioculturais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

C. Os valores socioculturais não influenciam nem a direção e nem a escolha dos temas das investigações científicas, mas as aplicações tecnológicas da ciência podem ser julgadas como “boas” ou “más” de acordo com os valores socioculturais.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

D. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque o direcionamento das pesquisas, isto é, a escolha dos temas, fenômenos e problemas a serem investigados, responde apenas ao interesse em desenvolver cada vez mais o conhecimento científico por si só.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

E. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque ela trabalha de acordo com os princípios do *Método Científico Universal*, ou seja, a escolha racional entre hipóteses e teorias não envolve questões relacionadas a valores.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

F. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais) porque suas implicações lógicas não envolvem juízos de valor. Suas afirmações baseiam-se somente em evidências empíricas disponíveis, previsões teóricas e na argumentação.

() *Discordo Fortemente* () *Discordo* () *Concordo* () *Concordo Fortemente*

G. Os valores socioculturais podem influenciar o direcionamento e a escolha dos temas e fenômenos nas pesquisas científicas, exercendo um papel muito relevante, por exemplo, na avaliação de possíveis impactos negativos de futuras aplicações tecnológicas.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

H. A ciência não é neutra, isto é, não está livre da influência de valores socioculturais, pois os próprios cientistas são inevitavelmente influenciados pelos valores de sua sociedade, os quais podem refletir em suas observações experimentais e interpretações.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

I. A ciência não é neutra porque os fatores subjetivos não podem ser completamente eliminados, pois como atividade humana, a ciência é inevitavelmente influenciada por valores, crenças pessoais, vieses ideológicos, contextos políticos, econômicos e sociais.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

J. A ciência é neutra (livre de valores socioculturais), porque as hipóteses e teorias científicas são aceitas ou rejeitadas com base no critério da adequação empírica entre experimentos e teorias; e esse processo certamente não inclui nenhum valor sociocultural.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

K. Embora a escolha de hipóteses e teorias científicas baseia-se na confiabilidade das evidências empíricas disponíveis, ainda assim, a neutralidade científica é um mito, pois valores socioculturais e outros fatores subjetivos certamente estão presentes na ciência.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

L. A sociedade, por meio da defesa dos valores socioculturais de sua época, ao menos em alguns momentos, é capaz julgar e interferir nos métodos e nas normas de trabalho da ciência, bem como até mesmo influenciar na escolha de uma teoria científica.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

M. Valores socioculturais e outros aspectos subjetivos não têm relação com os fatos científicos em si, no entanto, juízos de valor têm implicações e influências sobre o interesse, sobre a relevância e sobre a aceitação ou rejeição de certas afirmações científicas.

(☐) *Discordo Fortemente* (☐) *Discordo* (☐) *Concordo* (☐) *Concordo Fortemente*

APÊNDICE D

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO GERAL SOBRE A DISCIPLINA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA 2023-1

Questão	Aspectos Avaliativos (percepções dos estudantes ...)
1	Sobre a Participação/Engajamento dos Estudantes
2	Sobre a Qualidade dos Textos Seleccionados
3	Sobre os Prazos Estipulados para Entrega das Atividades
4	Sobre a Condução das Discussões e Reflexões por parte dos Professores-pesquisadores
5	Sobre a Organização Didático-Estrutural e Sequência Lógica dos Assuntos
6 e 11 (aberta)	Sobre a Influência da Disciplina para uma Compreensão Mais Precisa e Bem Informada sobre a Natureza da Ciência
7 e 12 (aberta)	Sobre a Influência da Disciplina para uma Formação Crítica quanto à Utilização de Narrativas (Pseudo)Históricas
8	Sobre a Qualidade Geral da Disciplina História da Ciência 2023-1
9 e 10 (aberta)	Sobre a Oferta da Disciplina História da Ciência na Matriz Curricular
13 (aberta)	Sobre as Possíveis Influências da Disciplina para a Futura Prática Docente
14 (aberta)	Sobre as Limitações, Obstáculos e Dificuldades na Disciplina
15 (aberta)	Comentários Livres

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO GERAL
SOBRE A DISCIPLINA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA 2023-1

1. (a) Como você avalia sua participação durante a disciplina de História das Ciências 2023-1 em termos de assiduidade, pontualidade, contribuição nas discussões e reflexões, entrega das atividades, leituras e comprometimento?

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

2. Como você avalia a qualidade dos textos históricos e leituras obrigatórias solicitadas durante o curso em relação à adequação da linguagem, abordagem satisfatória do conteúdo, acessibilidade, dimensão adequada para leitura completa dentro do tempo estipulado e relevância para sua formação crítica?

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

3. Como você avalia o prazo estipulado pelos professores para a realização e entrega das atividades de leitura extraclasse? Considere a extensão das leituras, a complexidade dos temas abordados e a carga horária da disciplina?

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

4. Como você avalia a condução das discussões e reflexões sobre a *Pseudo-História* e sobre a *Natureza das Ciências* pelos professores em sala de aula? Considere a clareza na apresentação dos conceitos, a promoção do debate entre os estudantes, o estímulo à participação ativa e a relevância dos exemplos e casos apresentados.

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

5. Como você avalia a organização estrutural e a sequência lógica dos assuntos abordados durante a disciplina? Considere a progressão dos temas, a conexão entre os conteúdos, a clareza na apresentação e a coerência na ordem dos tópicos.

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

6. Como você avalia a influência da disciplina de História das Ciências 2023-1 para a construção de uma imagem mais autêntica sobre a *Natureza das Ciências*?

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

7. Como você avalia a influência da disciplina de História das Ciências 2023-1 na sua formação crítica como futuro(a) professor(a) de física? Considere a ampliação do seu conhecimento sobre abordagens pedagógicas, a reflexão sobre os pressupostos da ciência e a capacidade de questionar e analisar criticamente os conteúdos da área.

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

8. No geral, como você avalia a qualidade da disciplina de História das Ciências 2023-1? Considere a clareza dos conteúdos apresentados, a qualidade das atividades propostas, o engajamento dos professores, a relevância dos materiais didáticos utilizados e a contribuição da disciplina para a sua formação acadêmica.

☐ Muito Insatisfatória ☐ Insatisfatória ☐ Satisfatória ☐ Muito Satisfatória

9. Considerando a matriz curricular do Curso de Licenciatura em Física, no formato atual, você considera que a disciplina de História das Ciências 2023-1 deve ser uma disciplina:

☐ Optativa ☐ Obrigatória

10. Considerando a matriz curricular do Curso de Bacharelado em Física, no formato atual, você considera que a disciplina de História das Ciências 2023-1 deve ser uma disciplina:

[] *Optativa*

[] *Obrigatória*

11. Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto à *Natureza das Ciências* sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos.

12. Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto ao uso didático da *História da Física* sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos

13. Sua concepção inicial (antes da disciplina) de prática docente futura sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Dê alguns exemplos.

14. Levando em consideração suas principais dificuldades e/ou obstáculos relacionados à disciplina História das Ciências 2023-1, quais aspectos você sugere que os professores tenham mais atenção em uma nova oportunidade de oferta dessa disciplina?

15. Caso você considere que alguns aspectos relevantes sobre o curso não foram abordados neste questionário, por favor, aproveite este espaço para fornecer comentários livres sobre o curso de História das Ciências 2023-1.

Sistematização Temática das Respostas às Questões Abertas 11 a 15.

As respostas dos estudantes foram organizadas de acordo com as críticas e sugestões relacionadas aos temas avaliados. Além disso, foram corrigidas ortograficamente e gramaticalmente para garantir clareza e precisão, sem alterar o conteúdo ou as ideias expressas. A intenção foi preservar a autenticidade e o estilo original das respostas, mantendo o significado e a intenção dos estudantes, com o objetivo exclusivo de aprimorar a compreensão do texto.

11. Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto à *Natureza das Ciências* sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos.

MUDANÇAS SIGNIFICATIVAS
Descrição: Alterações profundas nas concepções dos estudantes sobre a NdC, bem como reestruturação significativa de ideias pré-existentes, incluindo o entendimento de que a ciência é influenciada por fatores sociais, culturais, econômicos e políticos. Justificativa: Muitos estudantes indicaram que, após a disciplina, adquiriram uma nova visão mais crítica sobre a ciência e seus processos, especialmente no reconhecimento da subjetividade e das influências externas no trabalho científico.
E2: "Não tinha trabalhado antes, então as aulas me ajudaram a aprender novos conceitos e significados" (Q. 11). E3: "Sim, eu acho que antes dessa disciplina eu ainda tinha muitos pensamentos errados (mesmo no terceiro ano). Hoje em dia, sei analisar melhor a pseudo-história" (Q. 11). E4: "Minha concepção inicial alterou-se significativamente após a disciplina. Pude entender mais sobre leis e teorias científicas e o contexto social da construção do conhecimento científico" (Q. 11). E5: "Sim, além de ampliar e incentivar os conhecimentos sobre a construção da história da física, a disciplina trouxe, em muitas aulas, a visão do cientista. Também trouxe aspectos socioculturais importantes" (Q. 11). E6: "Sim, desde o significado de algumas palavras até a elaboração e a estrutura na hora de explicar ou escrever um texto" (Q. 11). E7: "Sim. Após a disciplina História da Ciência 2023-1, consegui adquirir conhecimentos de física e matemática que me auxiliaram nas aulas que ministrei. Um exemplo disso é a abordagem matemática e física do efeito fotoelétrico. Como a disciplina foi focada nesse tema, ela forneceu um conhecimento amplo sobre o assunto. As informações transmitidas nas aulas sobre a natureza da ciência contribuíram para as discussões em sala de aula" (Q. 11). E9: "Sim. Após a disciplina, consegui compreender melhor como a natureza das ciências é importante para a história e como aplicá-la de forma correta" (Q. 11). E12: "Sim, sofreu mudanças. Começo pela palavra 'Ciência'. A consideração de que existem vários processos em torno de apenas uma palavra é algo mais claro para mim no momento. A questão da neutralidade científica também foi um aspecto que se tornou mais claro na minha percepção" (Q. 11). E14: "Sim. Acreditava que a ciência era realmente sempre imparcial e livre de valores socioculturais" (Q. 11). E17: "Sim. Antes de cursar a disciplina de História da Ciência, minha visão sobre a natureza da ciência (NdC) era um pouco arbitrária, mas agora consigo ter uma visão mais clara" (Q. 11). E19: "Sim. Anteriormente, eu possuía um entendimento totalmente equivocado a respeito da NdC" (Q. 11). E21: "Sim, pois percebi a importância de usar os termos certos, corrigindo os errados. No futuro, não confundirei os alunos com concepções errôneas sobre a natureza da ciência" (Q. 11). E22: "Sim, os fatos sobre o efeito fotoelétrico para mim eram exclusivos de Einstein" (Q. 11).

APROFUNDAMENTO E REFINAMENTO	
Descrição: A disciplina aprimorou a compreensão bem informada (ou parcialmente informada) dos estudantes, esclarecendo conceitos e proporcionando um entendimento mais detalhado. A principal contribuição foi o amadurecimento e a reorganização de ideias já formadas.	
Justificativa: Os estudantes que já possuíam uma base sólida sobre alguns aspectos da NdC relataram que a disciplina consolidou seus conhecimentos, permitindo um entendimento mais robusto.	
E1: "Sim. Alguns conceitos e 'imagens' ficaram mais claros ou até foram alterados, levando-me a ter um pensamento crítico com as leituras. Um exemplo básico foi a distinção entre leis, teorias e postulados" (Q. 11).	
E10: "Sim. Minha visão sobre a imparcialidade, e não a neutralidade, do cientista e, consequentemente, sobre a própria interpretação dos dados experimentais brutos, foi corroborada. Ainda vejo a ciência como um modelo que se baseia em dados experimentais observados, mas agora a enxergo como um modelo construído por pessoas sujeitas à influência de fatores sociais, culturais, econômicos e políticos. Em última instância, os dados experimentais são os mais importantes, mas entendo a influência de fatores humanos em suas interpretações" (Q. 11).	
E11: "Acho que houve um bom aprimoramento. Tenho a concepção de que tudo que vimos de alguma forma já estava em minha mente, por eu simplesmente ler bastante sobre isso. Por isso, acredito que a disciplina amadureceu minhas ideias, mas uma coisa 'nova' foi o debate sobre as diferenças entre leis e teorias científicas, que eu ainda não tinha refletido sobre" (Q. 11).	
E16: "Sim, mesmo havendo o contato em outras disciplinas, como metodologia, acredito que o tema não havia sido debatido mais 'a fundo', pois sempre fomos questionados ao longo da disciplina sobre isso, por exemplo, em debates, apresentações e textos" (Q. 16).	
E18: "Sim. Eu não tinha noção das diferenças e semelhanças entre leis e teorias científicas" (Q. 11).	
E20: "Sim. Antes da disciplina, o conceito de NdC para mim era um pouco abstrato. Após as discussões em sala de aula, durante os seminários e a leitura dos textos, essa concepção se tornou mais clara para mim" (Q. 11).	
PERCEPÇÕES DE POUCA ALTERAÇÃO	
Descrição: Alguns estudantes relataram que já tinham uma concepção bem informada sobre a NdC, e a disciplina serviu apenas para aprofundar ou reafirmar o que já sabiam.	
Justificativa: As respostas mostram que, para esses estudantes, o impacto da disciplina foi menor, funcionando mais como um ajuste ou confirmação de ideias pré-existentes.	
E8: "Não sofreu muitas alterações. A professora Sandra Gatti trabalhou muito bem, mas essa disciplina conseguiu aprofundar o conteúdo de forma excelente" (Q. 11).	
E13: "Sim, mas não muito. Eu já tinha uma boa noção sobre aspectos da Natureza da Ciência (NdC) e História da Ciência (HC)" (Q. 11).	
Outros	
Descrição: Agrupa respostas que não se encaixam nas outras categorias ou que falam de aspectos variados.	
Justificativa: A categoria "Outros" foi criada para respostas que mencionam diferentes aspectos que não abordam diretamente as concepções da NdC, mas que ainda são pertinentes ao impacto da disciplina.	
E15: "Sim, minha concepção inicial sofreu muitas modificações. Inicialmente, achei que iríamos estudar várias teorias/leis científicas, e não apenas focar em um único evento ou fenômeno" (Q. 11).	

Questão 12. Sua concepção inicial (antes da disciplina) quanto ao uso didático da *História da Física* sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Por favor, compartilhe alguns exemplos

Questão 13. Sua concepção inicial (antes da disciplina) de prática docente futura sofreu alguma modificação após a disciplina História das Ciências 2023-1? Se sim ou se não, justifique sua resposta. Dê alguns exemplos.

CONCEPÇÕES E IMPORTÂNCIA DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA	
Descrição: Agrupa percepções gerais sobre o valor e a relevância da História da Ciência no aprendizado e na formação acadêmica. Justificativa: As respostas refletem uma compreensão mais profunda sobre a importância da História da Ciência, consolidando a visão dos estudantes ao longo do curso.	
E1: <i>Sim. Não sabia ao certo como era a História da Ciência e acabava por não perceber alguns fatores que influenciaram na história (Q.12).</i> E3: <i>Sim, hoje em dia acho mais válido o uso da História da Física, até porque não se faz Física/Ciência sem história (Q.12).</i> E4: <i>Sim, houve um reforço da ideia de que a natureza da ciência e a história da física são essenciais na formação do físico (Q.12).</i> E6: <i>Sim, vejo a importância do uso da História da Ciência na formação de alunos de qualquer ano, já que, dessa maneira, evita-se a propagação de ideias equivocadas (Q.13).</i> E7: <i>Sim. A disciplina História da Ciência ajudou a perceber a importância da abordagem dessa área na aula. Com a disciplina, várias informações foram fornecidas e poderão ser utilizadas em breve, quando eu for licenciada (Q.12).</i> E9: <i>Sim, adquiri experiências na área da História das Ciências, e com as aulas aprendi sobre a propagação da pseudo-história, entre outros temas abordados (Q.12).</i> E11: <i>Sim, pois anteriormente parecia algo que não precisava ser aprofundado, mesmo sabendo dos problemas. Tinha a impressão de que seria mais um recurso para fugir da mesmice teórico-matemática das aulas, mas agora vejo que, para entender o internalismo e o externalismo da ciência, a História da Ciência é muito necessária (Q.12).</i> E12: <i>Sim, sofreu mudanças. Antes, os benefícios da História da Ciência estavam mais voltados à estratégia válida para o aprendizado. No entanto, notei que existem questões mais profundas que dizem respeito ao próprio modo de fazer ciência (Q.12).</i> E13: <i>Sim, a coisa mais marcante para mim foi a frase dita por um dos docentes: 'O uso da História da Ciência pode ser benéfico ou não, depende da abordagem'. História da Ciência pode ajudar e atrapalhar, é preciso saber como trabalhar com ela (Q.12).</i> E14: <i>Sim. A história da física é uma ferramenta poderosa para disseminar o conhecimento, uma vez que entender as motivações e os problemas da época em que as teorias foram formuladas contribui para o entendimento da teoria (Q.12).</i> E15: <i>Sempre considere que a história da física seria extremamente útil para fins didáticos, e esta concepção continua prevalecendo (Q.12).</i> E17: <i>Sim, com certeza, minha visão de História da Física teve uma melhora, principalmente envolvendo o contexto histórico (Q.12).</i> E18: <i>Não, eu já tinha noção da importância desse curso devido às aulas de metodologia (Q.12).</i> E19: <i>Não, sempre tive em mente que a História da Física era importante para o ensino de física, pois fórmulas jogadas não contribuem em nada para o desenvolvimento do aluno (Q.12).</i> E20: <i>Sim, lendo os textos propostos pelos professores, percebi que entender os contextos por trás dos trabalhos é muito importante (Q.12).</i> E20: <i>Não, sempre achei a parte filosófica muito importante para o ensino de física (Q.13).</i>	
APLICAÇÕES DIDÁTICAS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA	
Descrição: Concentra respostas relacionadas às aplicações práticas da História da Ciência no ensino, com foco na docência, na produção de materiais didáticos e nos desafios para sua implementação. Justificativa: Esta categoria lida com a prática docente, desafios e dificuldades de implementar a História da Ciência em sala de aula. Os temas interligados dialogam sobre como a disciplina pode ser aplicada no ensino e os cuidados necessários, bem como as percepções sobre o papel do professor.	
E1: <i>Sim, principalmente sobre os livros didáticos e como eles ocultam várias partes da ciência (Q.13).</i> E2: <i>Sempre achei que o uso didático fosse muito importante para o professor e o aluno, pois, às vezes, há conteúdos que não apresentam realidade ou que não auxiliam verdadeiramente no entendimento e assimilação do conhecimento (Q.12).</i> E4: <i>Sim, pude visualizar o uso da História da Ciência dentro da sala de aula como futura docente (Q.13).</i> E5: <i>Acredito que, a partir da disciplina, seja necessária a implementação de aspectos nas aulas para uma maior aproximação entre aluno e ciência (Q. 13).</i> E6: <i>Sim, um simples ajuste em alguma aula ou o uso da História da Ciência pode melhorar o conteúdo e evitar ideias erradas. Além disso, deixa o conteúdo mais rico (Q.12).</i> E7: <i>Sim. A didática da história da física é muito importante. A disciplina mostrou como a história da física pode tornar a aula mais dinâmica e didática, facilitando a transmissão do conhecimento para os alunos (Q.13).</i>	

- E8:** Não, pois é difícil abordá-la com pouco tempo no ensino médio, mesmo com sua importância (Q.12).
- E10:** Sim, vejo hoje a utilização da História da Ciência dentro da sala de aula como fundamental para a compreensão dos conceitos físicos. Isso porque, para entender os conceitos, precisamos saber como surgiram e se modificaram ao longo do tempo (Q.12).
- E11:** Sim, agora sempre vou travar quando um aluno perguntar se fulano descobriu alguma coisa, vou entrar em crise existencial (Q.13).
- E12:** Sim, sofreu mudanças. Hoje noto mais benefícios para empregar a História da Ciência em sala de aula. E também percebo desvantagens, como o risco de cair em um 'relativismo exacerbado', algo que eu não havia considerado anteriormente (Q.13).
- E14:** Como faço parte do bacharelado em física e não pretendo cursar licenciatura, em nenhum momento vi o curso como algo relevante para a prática docente (Q.13).
- E15:** Sim, a partir desta disciplina, pude perceber o cuidado que devemos ter no papel de professores ao abordar a Física e suas diversas teorias e leis científicas, para não acabar transmitindo uma visão errada acerca da ciência (Q.13).
- E16:** Sim, me fez buscar incorporá-la em planos de aula, por exemplo, durante a disciplina de metodologia. Além disso, me fez prestar atenção ao uso incorreto da História da Ciência, que pode causar consequências para os alunos (Q.12).
- E16:** Sim e não. Quando decidi ir para a licenciatura, já tinha ponderado sobre o tipo de professor que gostaria de ser. Mas houve acréscimos em relação às formas como gostaria de fazer uso da História da Ciência em sala de aula e até mesmo em pesquisas futuras (Q.13).
- E19:** Não. Como dito na questão anterior, sempre tive uma visão clara de qual professor quero ser futuramente (Q.13).
- E22:** Médio. De maneira geral, acredito que o curso me impactou muito, mas transmitir isso em sala de aula é bastante complicado (Q.13).

IMPACTO NA FORMAÇÃO ACADÊMICA E PROFISSIONAL

Descrição: Inclui respostas que falam sobre como a disciplina contribuiu para a formação crítica, reflexiva e profissional dos estudantes, seja como docentes ou pesquisadores.

Justificativa: Essa categoria reflete tanto a formação profissional quanto a ampliação da visão crítica dos estudantes sobre a natureza da ciência.

- E2:** Sempre achei um grande desafio trazer com seriedade e tratar com cuidado o material utilizado. Não pretendo exercer a docência, mas acredito que na divulgação científica o mesmo cuidado deve ser aplicado (Q.13).
- E3:** Acredito que serei uma profissional melhor depois dessa disciplina. Tiveram momentos difíceis, mas não posso negar os aprendizados gerados pelos debates e aulas (Q.13).
- E5:** A disciplina de História da Ciência atendeu às expectativas, além de até mesmo surpreender, trazendo assuntos relativamente 'polêmicos' para uma maior e melhor construção do conhecimento (Q. 12).
- E10:** Sinceramente, não me enxergo muito como docente, mas mais como pesquisador. Este tema não foi suficientemente pensado por mim para ser desenvolvido. Exceto como descrito na questão 12, sobre o uso da História da Física para complementar conceitos físicos (Q.13).
- E13:** Sim, acredito que serei um professor melhor, sabendo como contribuir para uma construção mais fiel da natureza da ciência (Q.13).
- E17:** Sim, pude perceber que posso ser uma docente melhor e não apenas passar o conteúdo (Q.13).
- E18:** Sim, percebi que o uso da História da Física é mais do que necessário (Q.13).
- E21:** Sim, quando vou preparar um trabalho, tenho maior cautela para pesquisar o assunto (Q.12).
- E21:** Sim, agora vejo a importância de introduzir tal tema no ensino médio (Q.13).
- E22:** Sim, comecei a dar aulas e inseri fatos reais sobre a ciência (Q.12).

Outros

Descrição: Agrupa respostas que não se encaixam nas outras categorias ou que falam de aspectos variados.

- E8:** Não. Isso já foi explicado na questão anterior (Q.13).
- E9:** Sim, os docentes foram flexíveis em alguns aspectos, como a criação do Google Classroom e a flexibilização dos prazos de entrega das atividades. Contudo, sugiro a redução da carga de atividades semanais, considerando a complexidade de outras disciplinas e o estágio (Q.13).

Questão 14: Levando em consideração as suas principais dificuldades e/ou obstáculos relacionados à disciplina *História das Ciências 2023-1*, quais aspectos você sugere que os professores considerem com mais atenção em uma futura oferta dessa disciplina?

TEMAS AVALIADOS	COMENTÁRIOS
Participação Discente	(Sem comentários registrados)
Qualidade dos Textos	(Sem comentários registrados)
Prazos das Atividades	E1: "As leituras de grandes artigos, aliadas aos prazos de entrega, tornam-se muito difíceis e exaustivas. Entender que há outras disciplinas interfere na capacidade de cumprir as demandas." E2: "A quantidade de trabalhos, pois, em alguns momentos, os alunos ficam sobrecarregados e não conseguem entregar as atividades a tempo." E3: "O conteúdo é muito denso, e há muitas atividades. Três seminários?? Não há necessidade, nem em Metodologia temos tantos seminários assim." E4: "Diminuir a demanda de trabalhos semanais." E5: "Reduzir a quantidade de exercícios e tarefas propostas. De resto, acredito que está tudo bem elaborado." E6: "Reavaliar os prazos para a entrega de atividades semanais." E8: "O tempo para realização das atividades foi satisfatório para mim, mas entendo que muitas pessoas trabalham, o que pode dificultar." E9: "Em minha sincera opinião, minha maior dificuldade foi realizar todas as atividades com o mesmo grau de qualidade devido ao curto prazo, considerando também as demais disciplinas. O curso foi extremamente satisfatório, mas as atividades semanais tornaram-se um obstáculo para vários colegas da turma." E15: "Propor prazos de entrega mais acessíveis para as atividades." E16: "Considerar a grade curricular dos discentes, pois isso pode impactar a disponibilidade de horários para as atividades. Sugerir tempos de execução adequados." E17: "Aumentar o prazo de algumas atividades. As atividades realizadas em todas as aulas tornam-se cansativas." E19: "Levar em consideração a grade curricular e o cansaço dos alunos. Diminuir a frequência de trabalhos." E21: "Controlar a quantidade de trabalhos extraclasse, considerando que grande parte dos alunos do período noturno trabalha para se sustentar. A carga atual dificulta e desanima o processo de aprendizagem." E22: "Atentar-se aos prazos, organização e filtragem dos conteúdos propostos."
Condução das Discussões e Reflexões pelos professores	E3: "Caluzi, dê mais aulas! Ouvir você falar é ótimo." E10: "Principalmente no retorno aos alunos. É importante que saibam como estão suas reflexões sobre a NdC. Talvez, se houvesse menos reflexões escritas, os professores poderiam dar mais retornos. Isso tornaria o desenvolvimento das ideias mais efetivo." E12: "O tempo de fala dos alunos deve ser ajustado. É importante evitar o uso de palavras ou termos menos formais nas discussões." E15: "E serem mais claros nos apontamentos e observações." E16: "Apresentar um discurso mais claro, com perguntas cujas respostas já estejam pré-estabelecidas pelos professores, não tão difíceis de compreender". E19: "Questionar os alunos de forma mais construtiva."
Estrutura e Sequência Lógica	E7: "Abordar mais conteúdos relacionados à matemática." E15: "Também seria interessante abordar mais eventos e fenômenos físicos durante as aulas." E18: "Retomar o formato original do curso e seguir uma sequência cronológica abrangente da História da Física, e não focar em um único tema." E16: "Evitar a redundância com conteúdo abordados em outras disciplinas." E20: "Abordar mais conteúdos de Física, em vez de se aprofundar totalmente em apenas um tópico."

Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência	<i>(Sem comentários registrados)</i>
Influência na Formação Crítica	E13: "Trabalhar tópicos relacionados à condição elitista da sociedade, além de temas como racismo, machismo e sexismo."
Avaliação Geral	E11: "A única sugestão seria, no início, consultar a turma sobre a aceitação do método de avaliação contínua."
Outros	E14: "Tornar as atividades propostas mais claras, evidenciando seus objetivos e a metodologia requerida. Dar mais atenção aos alunos do bacharelado, mesmo que o curso seja voltado para a licenciatura. Além disso, dar dicas e feedback sobre a postura de apresentação oral."

Questão 15. Caso você considere que alguns aspectos relevantes sobre o curso não foram abordados neste questionário, por favor, aproveite este espaço para fornecer comentários livres sobre o curso de História das Ciências 2023-1.

TEMAS AVALIADOS	COMENTÁRIOS
Participação Discente	E14: Gostaria de ver uma abordagem voltada para o pessoal do bacharelado, ou seja, para futuros cientistas. Na verdade, seria ótimo ter essa disciplina como obrigatória no bacharelado, porém de forma adequada para esse público. E19: Tentar cativar mais os alunos de alguma maneira, pois a disciplina é bastante cansativa. Isso poderia ser feito com a escolha de outro tema ou método.
Qualidade dos Textos	E5: Acredito que, devido ao calendário apertado, não foi possível realizar tudo. No entanto, eu, particularmente, gostaria de mais conteúdo experimental ou reportagens que estimulassem o conhecimento. E7: Seria interessante mais aplicação matemática. O assunto escolhido nas aulas foi bem interessante, e seria ainda mais enriquecido se houvesse mais discussões sobre a parte matemática, além de exercícios com cálculos. E21: Tentar abordar um tema que não seja tão avançado para a compreensão. Isso facilitaria para os alunos realizarem as atividades de maneira mais proveitosa.
Prazos das Atividades	E5: Acredito que, devido ao calendário apertado, não foi possível realizar tudo. [...]. E9: [...] No geral, o principal aspecto a ser revisado é a quantidade de atividades. E22: De maneira geral, não consegui entregar todas as reflexões. Não me sinto bem nesta turma, pois são pessoas complicadas e não assumem os próprios erros. É necessária uma mudança em relação aos prazos e metas.
Condução das Discussões e Reflexões pelos professores	<i>(Sem comentários registrados)</i>
Estrutura e Sequência Lógica	E19: Tentar cativar mais os alunos de alguma maneira, pois a disciplina é bastante cansativa. Isso poderia ser feito com a escolha de outro tema ou método.
Influência na Compreensão sobre a Natureza da Ciência	<i>(Sem comentários registrados)</i>
Influência na Formação Crítica	<i>(Sem comentários registrados)</i>
Avaliação Geral	E8: Eu gosto dessa abordagem. Para mim, se retirassem física-matemática do currículo e dessem 10 horas para HC, seria muito melhor, já que, para a licenciatura, física-matemática não tem utilidade, e HC é suficientemente denso para ter 120 horas na licenciatura. Para o bacharelado, isso é mais complicado. E9: Na minha opinião, a ideia do curso foi muito interessante. Porém, é necessário atualizar o plano de ensino, pois os discentes podem acabar criando

	certas expectativas ao ler o plano de aula antigo, o que acaba sendo um ponto negativo.
	E10: Acredito que o curso de HC foi muito importante para a minha formação como cientista. Nunca esquecerei algumas das reflexões que fiz durante a disciplina, e elas serão importantes no desenvolvimento do meu trabalho.
	E11: Estou bastante satisfeita com a disciplina. Se dependesse de mim, teria HC II na grade. Vocês são professores fantásticos.