

**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ARARAQUARA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE
NACIONAL**

Desenvolvimento e aplicação de uma Sequência Didática para a compreensão das tecnologias e potencialidades da utilização do hidrogênio como fonte de energia.

Renan Ramon Goulart

Dissertação de Mestrado



PROFQUI
PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM QUÍMICA
EM REDE NACIONAL

**Araraquara
2026**

Desenvolvimento e aplicação de uma Sequência Didática para a compreensão das tecnologias e potencialidades da utilização do hidrogênio como fonte de energia.

Dissertação apresentada ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora: Prescila Glaucia Christianini Buzolin
Coorientadora: Marcela Marques de Freitas Lima

G694d	Goulart, Renan Ramon Desenvolvimento e aplicação de uma Sequência Didática para a compreensão das tecnologias e potencialidades da utilização do hidrogênio como fonte de energia / Renan Ramon Goulart. -- Araraquara, 2026 88 f. : fotos + objeto educacional Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara Orientadora: Prescila Glaucia Christianini Buzolin Coorientadora: Marcela Marques de Freitas Lima 1. Hidrogênio. 2. Material Didático. 3. Tecnologia Educacional. 4. Eletroquímica. 5. Ciência Estudo e ensino. I. Título.
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento e aplicação de uma Sequência Didática para a compreensão das tecnologias e potencialidades da utilização do hidrogênio como fonte de energia

AUTOR: RENAN RAMON GOULART

ORIENTADORA: PRESCILA GLAUCIA CHRISTIANINI BUZOLIN

COORDINADORA: MARCELA DE FREITAS LIMA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Química, área: Química pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
PRESCILA GLAUCIA CHRISTIANINI BUZOLIN
Data: 26/02/2026 13:47:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a PRESCILA GLAUCIA CHRISTIANINI BUZOLIN (Participação Virtual)
Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru

Prof.^a Dr.^a LORENA OLIVEIRA PIRES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara

Prof. Dr. MARLON HERBERT FLORA BARBOSA SOARES (Participação Virtual)
Instituto de Química / Universidade Federal de Goiás - UFG - Goiânia

Araraquara, 26 de fevereiro de 2026.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, cuja trajetória marcada pela docência sempre me ensinou o valor da educação como instrumento de transformação social.

À minha esposa, Luana, pelo apoio incondicional, pela paciência diante das ausências impostas pelo percurso acadêmico e pela presença constante nos momentos de dúvida e cansaço, tornando-se meu principal alicerce durante esta jornada.

Aos meus pais Ailton e Ednéia, exemplos de caráter, esforço e dedicação, que desde cedo despertaram em mim o respeito pelo conhecimento e o compromisso com o ensino.

À minha avó Leonei (in memoriam), professora e inspiração permanente, cuja memória permanece viva em cada conquista. Tenho a certeza de que sua alegria acompanha este momento.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este percurso fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, às minhas orientadoras, pela condução ética, sensível e rigorosa ao longo de todo o processo de pesquisa. Suas palavras de incentivo nos momentos mais desafiadores e suas contribuições acadêmicas foram decisivas para a consolidação deste trabalho. Levo comigo não apenas os ensinamentos científicos, mas também o exemplo humano.

Aos professores do programa de mestrado, pela excelência das aulas, pelo comprometimento com a formação crítica e pelas reflexões que ampliaram minha compreensão sobre educação, ciência e sociedade.

Ao professor Anderson, pelo apoio direto durante a aplicação da sequência didática e pela parceria no desenvolvimento das atividades em sala de aula.

Aos estudantes participantes da pesquisa, que escolheram permanecer nas atividades mesmo tendo outras opções no ambiente escolar, demonstrando interesse, curiosidade e envolvimento. Suas contribuições tornaram este estudo vivo e significativo.

Aos colegas do mestrado, pela convivência, companheirismo e apoio mútuo, que transformaram desafios em aprendizados compartilhados.

Aos amigos que incentivaram meus projetos e sonhos, oferecendo palavras de encorajamento ao longo da caminhada.

Aos meus animais de estimação, cuja presença trouxe leveza aos dias intensos de escrita e reflexão.

A todos que cruzaram meu caminho durante esta trajetória, mesmo que por breves momentos, mas que deixaram marcas importantes no meu processo de formação.

Por fim, agradeço a mim mesmo pela persistência diante dos obstáculos, pela coragem de seguir adiante e pelo compromisso contínuo com o conhecimento, a educação e a construção de uma sociedade mais justa.

“A ciência não é nada além de uma perversão de si mesma, a menos que tenha como objetivo final o bem-estar da humanidade.” Nikola Tesla

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver, implementar e analisar uma sequência didática interdisciplinar voltada ao ensino de Ciências da Natureza, com ênfase nos conceitos de energia e na produção de hidrogênio por eletrólise da água, articulando dimensões científicas, tecnológicas, sociais e ambientais. O estudo integrou práticas de Aprendizagem Baseada em Projetos, Ensino por Investigação e uso de tecnologias digitais, incluindo microcontroladores e ferramentas de Inteligência Artificial, em contexto real de ensino médio. A proposta envolveu atividades experimentais, coleta e análise de dados, elaboração de protótipos e desenvolvimento de projetos tecnológicos, realizadas por estudantes organizados em grupos de trabalho. A produção dos dados ocorreu por meio da articulação de diferentes instrumentos e fontes, incluindo pré e pós-testes conceituais, questionários, registros em diário de laboratório, observações em sala e análise das produções discentes. Os dados quantitativos foram tratados por meio de estatísticas descritivas, enquanto os dados qualitativos foram analisados a partir de seus significados no contexto investigado. Os resultados indicaram avanços na compreensão dos processos eletroquímicos, maior apropriação de conceitos de eletrônica e automação, fortalecimento de habilidades investigativas e aumento da autoconfiança no uso de tecnologias digitais. Observou-se ainda maior engajamento nas atividades práticas e ampliação da capacidade de articular conhecimentos científicos a problemáticas sociais relacionadas à energia. Conclui-se que a sequência didática contribuiu para o desenvolvimento da alfabetização científica e tecnológica, para a ampliação do protagonismo estudantil e para a compreensão crítica das implicações socioambientais das escolhas energéticas, evidenciando potencial de aplicação em outros contextos educacionais.

Palavras-chave: Hidrogênio. Material Didático. Tecnologia Educacional. Eletroquímica. Educação Científica.

Abstract

This study aimed to develop, implement, and analyze an interdisciplinary didactic sequence focused on Natural Sciences education, with emphasis on energy concepts and hydrogen production through water electrolysis, integrating scientific, technological, social, and environmental dimensions. The study incorporated Project-Based Learning, Inquiry-Based Science Education, and the use of digital technologies, including microcontrollers and Artificial Intelligence tools, in a real high school context. The proposal involved experimental activities, data collection and analysis, prototype development, and technological project design, carried out by students organized in working groups. Data were collected through the articulation of multiple instruments and sources, including conceptual pre- and post-tests, questionnaires, laboratory journals, classroom observations, and analysis of students' productions. Quantitative data were treated using descriptive statistics, while qualitative data were analyzed based on their meanings within the investigated context. The results indicated improvements in the understanding of electrochemical processes, greater appropriation of electronics and automation concepts, strengthening of investigative skills, and increased confidence in the use of digital technologies. Higher levels of engagement in practical activities were also observed, along with an enhanced ability to relate scientific knowledge to social issues related to energy. It is concluded that the didactic sequence contributed to the development of scientific and technological literacy, the strengthening of student protagonism, and the critical understanding of the socio-environmental implications of energy choices, demonstrating potential for application in other educational contexts.

Keywords: Hydrogen. Instructional Materials. Educational Technology. Electrochemistry. Science Education.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo de Desenvolvimento da SD: Da Problematização ao Protótipo.	38
Figura 2 – Estudantes durante a montagem da cuba eletrolítica com materiais acessíveis	46
Figura 3 – Gráfico construído pelos estudantes relacionando corrente elétrica e produção de gás hidrogênio	47
Figura 4 – Registro da medição de corrente elétrica com multímetro inserido em série no circuito	50
Figura 5 – Solução eletrolítica apresentando tonalidade amarelada após o experimento	51
Figura 6 – Modelo utilizado para visualização de pH da solução eletrolítica no laboratório	51
Figura 7 – Simulação digital do controle de corrente elétrica do experimento de eletrólise (representando a geração de H ₂ pela intensidade do LED) no ambiente Tinkercad	52
Figura 8 – Estudantes utilizando potenciômetro para controle analógico da tensão	52
Figura 9 – Programação em blocos utilizada para demonstração das potencialidades do uso do Micro:bit, possibilitando a medição da variável de temperatura do sistema	53
Figura 10 – Imagem em ampliação dos slides utilizados pelos estudantes do Projeto 2, por meio de I.A. generativa para apresentação dos desenvolvimentos de projeto do grupo.	54
Figura 11 - Representação esquemática realizada pelos estudantes por meio de I.A. generativa do sistema de produção descentralizada de hidrogênio e sua aplicação.	55
Figura 12 – Esboço de uma “Fonte de Energia Portátil”.	55
Figura 13 – Representação esquemática realizada pelos estudantes por meio de I.A. generativa do sistema de mobilidade urbana sustentável.	57

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTSA – Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente
DBR – *Design Based Research*
EA – Educação Ambiental
EC – Educação em Ciências
H₂ – Hidrogênio
IA – Inteligência Artificial
IBSE – Inquiry-Based Science Education (Ensino de Ciências por Investigação)
MQ-8 – Sensor de detecção de gás hidrogênio
PBL – *Project-Based Learning* (Aprendizagem Baseada em Projetos)
SD – Sequência Didática
SMQ-II – *Science Motivation Questionnaire II*
USB – *Universal Serial Bus*
V – Volt
A – Ampère
pH – Potencial hidrogeniônico

Sumário

1 Introdução	17
2. Objetivos	23
2.1 Objetivo Geral	23
2.2 Objetivos Específicos	23
3. Aportes Teóricos	25
3.1 Educação científica contemporânea e os desafios do século XXI	25
3.2 O ensino de energia como campo estratégico da educação científica	26
3.3 O hidrogênio como tema sociocientífico	27
3.4 Alfabetização científica e ensino contextualizado	28
3.5 A abordagem CTSA como eixo epistemológico	29
3.6 Escola pública e contextos de vulnerabilidade social	29
3.7 Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL) e sua relevância para a educação científica	30
3.8 Ensino por Investigação (IBSE) e a centralidade da pergunta	31
3.9 Aprendizagem ativa e engajamento cognitivo	32
3.10 Interdisciplinaridade como princípio epistemológico e pedagógico	33
3.11 Tecnologias educacionais como mediação pedagógica	33
3.12 Protagonismo estudantil e formação integral	34
4. Procedimentos Metodológicos	34
4.1 Enquadramento metodológico: Design-Based Research (DBR)	34
4.2 Natureza da pesquisa	36
4.3 Papel do professor-pesquisador	36
4.4 Considerações éticas	37
4.5 Desenho da sequência didática	37
4.6 Fases da DBR	39
4.6.1 Análise e diagnóstico do contexto	39
4.6.2 Concepção e desenvolvimento do protótipo pedagógico	39
4.6.3 Implementação em contexto real	40
4.6.4 Análise, refinamento e redesenho	41
4.7 Instrumentos de coleta de dados	41
4.7.1 Questionários	42
4.7.2 Diários de campo e registros reflexivos	42
4.7.3 Produções dos estudantes	42
4.7.4 Observações em sala de aula	42
4.8 Critérios de análise	43
4.9 Integração analítica dos dados no contexto da pesquisa	43
4.10 Validação da proposta	44
5 Resultados e Discussão	44
5.1 Caracterização do contexto empírico e organização dos dados	44
5.2 Diagnóstico inicial e evolução conceitual sobre eletrólise e hidrogênio	46

5.3 Engajamento, participação e aprendizagem experiencial	48
5.4 Desenvolvimento das práticas experimentais e construção de evidências empíricas	48
5.5 Investigação de fenômenos emergentes e aprofundamento conceitual	50
5.6 Integração entre experimentação, tecnologia e controle de variáveis	51
5.7 Desenvolvimento dos projetos estudantis e articulação CTSA	53
5.7.1 Projeto 1 – Produção descentralizada de hidrogênio em usinas hidrelétricas e geração portátil de energia	54
5.7.2 Projeto 2 – Mobilidade urbana sustentável: carro a hidrogênio e posto de abastecimento solar	56
5.7.3 Avaliação entre pares e uso crítico da Inteligência Artificial Generativa	58
6 Considerações Finais, Limitações e Perspectivas Futuras	60
6.1 Síntese dos principais achados	60
6.2 Contribuições para a educação científica e para a prática docente	61
6.3 Limitações do estudo	62
6.4 Perspectivas para investigações futuras	63
6.5 Considerações finais	63
Referências	66
APÊNDICES	64
APÊNDICE A – Proposta de Intervenção Pedagógica: Sequência Didática (SD)	69
APÊNDICE B: Rubrica de Avaliação do Protótipo (PBL)	75
APÊNDICE C: Rubrica de Avaliação Técnica (Código/Sistema)	76
APÊNDICE D: Rubrica de Reflexão Crítica (CTSA)	77
APÊNDICE E: Checklist de Observação (Formador)	78
APÊNDICE F: Modelo de Diário de Laboratório (Ficha de Ensaio)	79
APÊNDICE G: Pré-teste / Pós-teste Conceitual (12 questões)	80
APÊNDICE H: Questionário de Motivação (SMQ-II Adaptado)	82
APÊNDICE I: Roteiro de Entrevista Semiestruturada	83
APÊNDICE J: Rubrica de Avaliação por Pares	84
APÊNDICE K: Ficha de avaliação da apresentação (professor)	85
APÊNDICE L: Checklist de Segurança (Montagem)	86
APÊNDICE M: Tabelas Avaliativas entre pares	87
APÊNDICE N: Esboços Conceituais dos estudantes	88

Apresentação

Minha trajetória acadêmica e profissional foi construída a partir da convergência entre tecnologia, ciência e educação. Desde o início da minha formação, sempre me movi pela inquietação diante dos desafios técnicos e pela convicção de que o conhecimento é uma ferramenta concreta de transformação social.

Iniciei minha jornada no Ensino Superior na Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC), onde me graduei em Automação Industrial. Nesse período, desenvolvi projetos voltados ao controle de sistemas, programação de dispositivos automatizados e integração entre eletrônica e processos industriais. Foi ali que consolidei minha base técnica e compreendi o potencial da engenharia como instrumento de otimização e inovação.

Posteriormente, cursei o Bacharelado em Engenharia Elétrica, aprofundando estudos nas áreas de sistemas elétricos, controle e produção energética. Durante essa fase, comecei a direcionar meu interesse para a temática do hidrogênio e das energias renováveis, investigando possibilidades de integração entre sistemas elétricos, mecânicos e processos de conversão energética. Ao mesmo tempo, iniciei estudos na área de Inteligência Artificial, especialmente em Aprendizado de Máquina, buscando compreender como tecnologias emergentes poderiam contribuir para a eficiência de processos energéticos.

Paralelamente à formação acadêmica, atuei profissionalmente na área industrial e de engenharia aplicada. Trabalhei como estagiário em Engenharia na empresa Tecumseh, onde desenvolvi atividades relacionadas à automatização de processos, auditorias internas, aplicação de metodologias da qualidade e melhoria contínua. Posteriormente, atuei como engenheiro eletricitista responsável técnico e como profissional autônomo, elaborando e executando projetos na área elétrica. Essas experiências fortaleceram minha visão sistêmica, minha responsabilidade técnica e minha capacidade de articulação entre teoria e prática.

Buscando ampliar minha qualificação técnica, realizei pós-graduação em Engenharia da Qualidade, aprofundando conhecimentos em controle estatístico de processos, Lean Manufacturing e metodologias Six Sigma. Essa formação contribuiu para consolidar uma postura analítica rigorosa diante de problemas complexos. Em momento posterior, motivado pela vivência crescente na docência, concluí também a

Licenciatura em Matemática, compreendendo que o domínio técnico ganha maior significado quando compartilhado e problematizado em contextos formativos.

Minha atuação docente iniciou-se na rede pública do Estado de São Paulo, onde leciono Matemática, Programação e Robótica. Ao longo desse percurso, percebi que a integração entre ciência, tecnologia e ensino poderia gerar experiências mais significativas para os estudantes. Passei a investir na incorporação de metodologias investigativas, cultura *maker* e tecnologias digitais como estratégias para tornar o aprendizado mais ativo e contextualizado. Atualmente, atuo também como Professor Multiplicador pela EFAPE-SP, contribuindo para a formação continuada de docentes em programação, robótica e inovação pedagógica, além de exercer a função de Professor Orientador na UNIVESP, acompanhando projetos acadêmicos na área de Tecnologia e Computação.

Ingressei no Programa de Pós-Graduação em Química da UNESP com o propósito de integrar minha formação em engenharia e minha experiência docente em uma investigação que dialogasse com desafios energéticos contemporâneos. A temática do hidrogênio, que já vinha sendo explorada em minha trajetória técnica, passou a ser analisada sob a perspectiva do ensino de Ciências, articulando fundamentos científicos, experimentação, tecnologias digitais e problematizações sociais.

A pesquisa que ora apresento representa, portanto, a síntese de um percurso marcado pela interdisciplinaridade. Ela não surgiu de maneira isolada, mas como desdobramento natural de inquietações acumuladas ao longo dos anos: como aproximar a ciência escolar das tecnologias emergentes? Como formar estudantes capazes de compreender criticamente as transformações energéticas e tecnológicas em curso? Como integrar engenharia, química, programação e investigação em uma proposta formativa coerente?

Além das atividades acadêmicas e profissionais, participei como representante discente no Conselho de Pós-Graduação em Química, experiência que ampliou minha compreensão sobre os processos institucionais da pesquisa científica e a importância da gestão acadêmica responsável. Também integro a Rede de Inovação e Pesquisa em Ensino de Química (RIPEQ), espaço que tem sido fundamental para o amadurecimento teórico e metodológico da minha atuação investigativa.

Ao olhar para minha trajetória, reconheço que cada etapa contribuiu para este momento. A formação técnica forneceu base sólida; a atuação profissional consolidou

responsabilidade e visão prática; a docência trouxe sentido social ao conhecimento; e o mestrado permitiu sistematizar essas experiências em forma de pesquisa científica. Esta dissertação simboliza não apenas um requisito acadêmico, mas a materialização de um percurso construído com esforço, curiosidade intelectual e compromisso com a inovação responsável.

Sigo compreendendo minha formação como um processo em contínua construção. A engenharia, a pesquisa e a educação não são campos isolados em minha trajetória, mas dimensões complementares de um mesmo projeto de vida: contribuir, por meio da ciência e da tecnologia, para a construção de soluções que dialoguem com a realidade e ampliem possibilidades para as próximas gerações.

1 Introdução

O processo de aprendizagem é imprescindível para que o estudante agregue novos saberes e desenvolva habilidades essenciais ao cotidiano. Ao longo de sua trajetória, é esperado que ele utilize os conhecimentos aprendidos para solucionar problemas com autonomia. Consequentemente, a educação promove o refinamento do raciocínio crítico e da capacidade de interpretação, preparando o estudante para enfrentar desafios complexos em diversos contextos sociais e profissionais.

Nesta presente pesquisa, o processo se dará por intermédio de aprendizados fundamentados em sequências didáticas (SD) as quais abordam o tema de energia, especificamente sobre o hidrogênio e a compreensão de tecnologias associadas, principalmente quanto à produção, armazenamento e aplicações. A concepção dos objetos de estudo fundamenta-se em conceitos da ciência, tecnologia e sociedade (CTS), construídos em uma perspectiva de um meio ambiente sustentável (CTSA).

A evolução das sociedades humanas sempre esteve intrinsecamente ligada à capacidade de manipular e transformar fontes de energia, impulsionando profundas mudanças econômicas e sociais ao longo da história. Contudo, os desafios contemporâneos exigem superar a visão puramente utilitarista dos recursos naturais, integrando a dimensão tecnológica às urgentes questões ambientais e sociais. Nesse cenário, a energia deixa de ser apenas um insumo produtivo para se tornar um tema central na formação cidadã, exigindo práticas educativas que articulem o desenvolvimento científico com a sustentabilidade global (Goldemberg; Lucon, 2008; Fourez, 1995).

Os contextos históricos e o ensino de ciências desempenham um papel fundamental na formação dos estudantes, fornecendo conhecimentos e habilidades necessárias para compreender os princípios científicos e aplicá-los em sua vida cotidiana. No contexto do ensino sobre energia, as abordagens pedagógicas utilizadas são desenvolvidas a fim de inovar a forma a qual o conteúdo é comumente ensinado, estruturando-se nos conceitos CTSA, interligando sobretudo conceitos da ciência física e química, de forma a garantir a compreensão aprofundada desse tema multifacetado, com outro aspecto relevante de que o aprendizado permita que os estudantes tenham acesso a oportunidades de trabalho e de desenvolvimento pessoal, instruindo-os para diversas atuações profissionais da área da tecnologia e energia, bem como para a vida em uma sociedade mais sustentável ambientalmente.

Na sociedade moderna, as diferenças entre os níveis de consumo de energia¹ por habitante e realidades tão distintas entre países, podem contribuir para classificá-los como desenvolvidos ou em desenvolvimento (Neto e Carvalho, 2012), além de existir uma crescente preocupação global com a sustentabilidade energética², objetivando suprimentos confiáveis de energia e redução no impacto das emissões de gases como o dióxido de carbono, especialmente associadas ao uso de combustíveis fósseis (Abbasi T. e Abbasi S., 2011; Owusu e Sarkodie, 2016).

Uma fonte de energia promissora tem despertado grande interesse, conforme evidenciado pelo Programa Nacional do Hidrogênio:

O hidrogênio se tornou prioridade na estratégia de energia e climática de diversos países, sobretudo, por prover uma alternativa para setores de difíceis abatimento de emissões de carbono (*hard-to-abate sectors*) e por se constituir também em um vetor de energia, possibilitando o armazenamento de energia e favorecendo o acoplamento do setor de energia aos setores de indústria e transporte. Mesmo nos transportes leves, o hidrogênio pode ter papel importante, trazendo mais uma alternativa tecnológica para o processo de eletrificação de veículos (diretamente, por meio de células a combustível ou, indiretamente, por meio de combustíveis sintéticos – *e-fuels*). (Brasil, 2021).

O hidrogênio (H) é o elemento mais abundante e comum no universo e na Terra, permanecendo quase que completamente na forma de compostos, geralmente associado com outros elementos químicos para formar moléculas, ao exemplo da água (H₂O), constituindo a aproximadamente 70% da superfície do planeta (Linardi, 2011). Portanto, em termos de quantidade, o hidrogênio é extremamente comum e predominante, demonstrando ser um recurso importante a ser pesquisado e desenvolvido para a produção de energia, devendo ser fomentado no Brasil, o qual possui recursos hídricos em abundância.

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE):

No Brasil, cujos recursos naturais renováveis são abundantes e cuja matriz energética possui elevada participação de fontes energéticas renováveis, o desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio certamente contribuirá para uma utilização mais eficiente dessas fontes energéticas, além de possibilitar uma participação importante no mercado mundial de

¹ O termo “consumo de energia” representa as necessidades socioeconômicas que exigem o uso da energia para poderem ser satisfeitas; atua, portanto, como elo entre a dimensão socioeconômica e a dimensão física do sistema energético.

² Sustentabilidade energética é o uso responsável e equilibrado de recursos energéticos para suprir as necessidades presentes sem comprometer o futuro, por meio de práticas eficientes, fontes renováveis e respeito ao meio ambiente.

equipamentos e serviços relacionados às energias renováveis e ao hidrogênio. Dessa forma, o engajamento do país na corrida para a implantação da economia do hidrogênio é altamente estratégico dos pontos de vista econômico, tecnológico e ambiental. (CGEE, 2010).

O desenvolvimento da economia do hidrogênio³ é uma oportunidade para o país integrar na sua economia os benefícios desse novo setor, possibilitando a absorção de novas tecnologias que impulsionarão o setor industrial e o desenvolvimento social, decorrente da geração de novos empregos e investimentos para as capacitações dos trabalhadores e diante disso faz-se necessário iniciativas educacionais para assegurar esse avanço tecnológico.

Ao aprofundar nos produtos desta pesquisa, priorizou-se o desenvolvimento e a aplicação de atividades experimentais de eletrólise da água com foco no uso de materiais acessíveis e de baixo custo, viabilizando a realização dos experimentos em diferentes contextos escolares. A proposta envolveu a utilização de componentes simples de células eletrolíticas e dispositivos eletrônicos para interação nos experimentos, proporcionando aos estudantes uma experiência direta com os fundamentos e a compreensão prática do processo de produção de hidrogênio, integrando conhecimentos de tecnologia eletrônica e ciências, tornando-os participantes ativos no papel de cientistas e engenheiros, viabilizando a exploração do processo de produção de hidrogênio a partir da eletricidade, constituindo uma experiência tangível destinada a ampliar os horizontes da aprendizagem.

Como parte da estratégia pedagógica delineada nesta pesquisa, propõe-se a utilização de recursos que possibilitem a interação dos estudantes em ambientes virtuais, ampliando sua autonomia no acesso, organização e exploração de informações relacionadas aos conteúdos trabalhados, além de favorecer o desenvolvimento de habilidades associadas à investigação, ao uso consciente de tecnologias digitais e à construção do conhecimento. Esses ambientes contribuem para a mediação das interações entre os estudantes, estruturando processos de compartilhamento, registro e discussão de ideias, ao mesmo tempo em que possibilitam um acompanhamento pedagógico mais ajustado às necessidades individuais, no qual a interação mediada por esses recursos favorece a identificação

³ A terminologia “Economia do Hidrogênio” está relacionada à capacidade do hidrogênio ser um portador de energia capaz de atuar como vetor energético, e remonta à década de 70, durante a crise do petróleo (EPE, 2021a).

de lacunas conceituais e a realização de intervenções direcionadas, fortalecendo processos específicos de aprendizagem.

A proposta centrada no estudante o prepara para enfrentar um cenário profissional em que a adaptabilidade se apresenta como uma competência essencial, favorecendo o desenvolvimento de uma mentalidade flexível e proativa. Nesse contexto, a abordagem adotada amplia as possibilidades formativas em relação a abordagens pedagógicas centradas majoritariamente na transmissão de conteúdos, perspectiva amplamente problematizada por Paulo Freire (1996) ao discutir modelos de ensino pouco dialógicos, e também por Moran (2015) ao defender a superação de práticas expositivas tradicionais. Dessa forma, a proposta contribui para a formação dos estudantes em lidarem com os desafios dinâmicos do ambiente profissional contemporâneo e a se destacarem por meio da inovação e da capacidade de adaptação, aspectos fundamentais para a formação de profissionais preparados e engajados com as demandas atuais.

Contudo, é essencial reconhecer e superar alguns obstáculos educacionais, conforme evidenciados pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (IBGE, 2019) que aponta elevados índices de evasão, influenciados, entre outros fatores, pela necessidade de inserção precoce no trabalho e pela falta de perspectivas e interesse nos conteúdos. Com vistas a enfrentar esses desafios, a sequência didática desta pesquisa é desenvolvida e estruturada de forma mais dinâmica, incorporando momentos de experimentação que favorecem o engajamento dos estudantes e despertam a curiosidade científica, possibilitando que assumam um papel mais ativo em seus processos de aprendizagem, fortalecendo sua autonomia e participação no próprio percurso formativo. Adicionalmente os conhecimentos e práticas explorados ao longo da sequência didática apresentam potencial para serem utilizados como complemento formativo em disciplinas, cursos livres, oficinas ou minicursos voltados à disciplinas de ciências e/ou a área de energia e hidrogênio, ampliando as possibilidades de aprofundamento conceitual e contribuindo para a qualificação de estudantes em contextos educacionais diversos.

A educação científica desempenha um papel fundamental, promovendo habilidades como o pensamento crítico e fornecendo uma compreensão mais aprofundada do mundo real. Ao aprender ciência, os indivíduos passam a compreender e analisar processos naturais, tomar decisões baseadas em evidências e enfrentar problemas complexos, além de estimular a curiosidade e promover a

criatividade. Nessa perspectiva, o ensino de Ciências favorece a participação ativa dos sujeitos na sociedade, contribuindo para o debate informado e para a atuação em questões públicas. A ciência constitui um elemento central nos processos de inovação em diversas áreas, o que a torna relevante para a compreensão dos desafios contemporâneos. Assim, torna-se fundamental garantir a qualidade da formação científica, oferecendo bases consistentes para o desenvolvimento individual e coletivo em um mundo cada vez mais permeado por ciência e tecnologia.

Há um expressivo aumento do interesse global por desenvolvimentos e práticas ambientais mais sustentáveis, denotando que as compreensões das interrelações humanas com a natureza devem ser aprimoradas, a qual visão dominante no passado era apenas o progresso pelo progresso, desprezando muitas vezes os impactos ambientais e separando o ambiente das questões socioeconômicas. A UNESCO (2005) afirmou que a educação para o desenvolvimento sustentável tenha um futuro duradouro, o desenvolvimento sustentável deve ser incluído como um princípio sistêmico e uma questão transversal, e não como um campo separado. Os docentes devem não apenas estar convencidos da necessidade, mas também ter uma forma de incorporá-la à prática pedagógica.

A educação assume papel estratégico na formação de cidadãos críticos, criativos e comprometidos com os desafios do século XXI. Nessa perspectiva, adota-se a abordagem CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente) em sua vertente crítica, conforme discutido por Aikenhead (1994) e Santos e Mortimer (2002), que propõe a problematização das relações entre ciência e sociedade, indo além da simples contextualização de conteúdos. Ao propor uma jornada de aprendizagem centrada no hidrogênio como eixo integrador, esta pesquisa visa estimular a formação de estudantes protagonistas, capazes de compreender e atuar de forma transformadora frente aos desafios da sustentabilidade energética.

A proposta tem início na exploração de conceitos fundamentais da eletroquímica e do hidrogênio como vetor energético, promovendo a construção de saberes de forma contextualizada. Em seguida, os estudantes são envolvidos em atividades experimentais acessíveis, utilizando materiais de baixo custo e reaproveitáveis, o que favorece a aproximação entre teoria e prática. A jornada culmina na elaboração de miniprojetos autorais, nos quais são incorporadas ferramentas digitais e recursos de inteligência artificial. Todo o percurso foi pensado para consolidar uma aprendizagem significativa, na medida em que estabelece

conexões entre os conhecimentos prévios dos estudantes, suas vivências cotidianas e os novos conteúdos científicos, proporcionando não apenas a memorização de conceitos, mas a compreensão crítica e a capacidade de aplicação dos saberes em contextos reais e desafiadores.

A educação assume papel estratégico na formação de cidadãos críticos, criativos e comprometidos com os desafios do século XXI (Delors et al., 1998). Nessa perspectiva, a abordagem CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente) configura-se como uma via potente para articular conhecimentos científicos e tecnológicos à reflexão sobre seus impactos sociais, econômicos, ambientais e éticos. Ao adotar o hidrogênio como eixo integrador das atividades propostas, delineia-se uma trajetória de aprendizagem que favorece o protagonismo estudantil e a compreensão da sustentabilidade energética como um problema científico, tecnológico e socialmente situado. A organização das práticas educativas fundamenta-se em pressupostos pedagógicos contemporâneos como a Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL), o Ensino por Investigação (IBSE) e a Design Based Research (DBR), conferindo intencionalidade pedagógica às práticas propostas, promovendo a investigação, a contextualização e a construção ativa do conhecimento.

A proposta foi implementada em uma escola estadual de período integral do estado de São Paulo, que atende exclusivamente ao Ensino Médio e está inserida em um contexto de vulnerabilidade social. Tal cenário reforça a relevância de estratégias pedagógicas que promovam o engajamento, a autonomia e o sentido do aprender. O percurso didático inicia-se com a exploração de conceitos fundamentais da eletroquímica e do hidrogênio como vetor energético, avançando para atividades experimentais acessíveis, desenvolvidas com materiais de baixo custo e reaproveitáveis, aproximando teoria e prática. A culminância ocorre na elaboração de miniprojetos autorais, nos quais são incorporadas ferramentas digitais e recursos de inteligência artificial. Esse conjunto de ações foi concebido para favorecer aprendizagens com significado, ao articular conhecimentos prévios, experiências cotidianas e novos conceitos científicos, promovendo não apenas a compreensão conceitual, mas também a capacidade de aplicar esses saberes em contextos reais e socialmente relevantes.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar uma sequência didática fundamentada em pressupostos pedagógicos contemporâneos, voltada ao ensino de Ciências da Natureza, com ênfase nos conceitos de energia e na produção de hidrogênio por eletrólise da água, articulando dimensões científicas, tecnológicas, sociais e ambientais, conforme a abordagem CTSA.

A proposta foi estruturada de modo a promover a compreensão investigativa dos processos físico-químicos envolvidos na geração, transformação e uso do hidrogênio como vetor energético, integrando atividades experimentais acessíveis, práticas investigativas, elementos de pensamento projetual e recursos tecnológicos educacionais, buscando favorecer o desenvolvimento de competências científicas, pensamento crítico, autonomia intelectual e protagonismo estudantil no ambiente escolar.

A sequência didática é concebida como um artefato pedagógico intencionalmente estruturado, alinhado a metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Projetos (*Project-Based Learning* – PBL), o Ensino por Investigação (*Inquiry-Based Science Education* – IBSE) e a Pesquisa Baseada em Design (*Design-Based Research* – DBR). A organização das atividades considera a articulação entre experimentação, investigação orientada e uso de tecnologias educacionais, de modo a possibilitar a construção de conhecimentos científicos em contextos significativos para os estudantes.

Almeja-se, com o desenvolvimento desta pesquisa, contribuir para a formação de estudantes capazes de compreender, analisar e posicionar-se de maneira fundamentada diante das transformações científicas e tecnológicas que permeiam a sociedade contemporânea, bem como oferecer subsídios teórico-metodológicos e materiais didáticos que possam ser adaptados a diferentes realidades escolares.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram definidos de modo a orientar o desenvolvimento, a aplicação e a análise de uma sequência didática voltada ao ensino

de energia, com ênfase na eletrólise da água e na produção de hidrogênio, considerando sua inserção em um contexto interdisciplinar e mediado por tecnologias.

A definição desses objetivos buscou assegurar coerência entre a proposta pedagógica, os referenciais teóricos adotados e as condições reais de implementação no ambiente escolar.

Inicialmente, a pesquisa teve como propósito desenvolver uma sequência didática capaz de articular conteúdos de Química, Física e Tecnologia, organizando as atividades de forma progressiva e orientada à compreensão dos processos de transformação de energia. Essa organização considerou a necessidade de superar abordagens fragmentadas do currículo, propondo uma estrutura que possibilitasse aos estudantes compreender relações entre fenômenos eletroquímicos, variáveis elétricas e aplicações tecnológicas associadas à produção de hidrogênio.

A proposta contemplou também a implementação de atividades experimentais com materiais acessíveis, de modo a possibilitar a realização das práticas em contextos escolares diversos. A experimentação foi concebida como elemento central do processo de aprendizagem, permitindo aos estudantes observar fenômenos, realizar medições e estabelecer relações entre os dados obtidos e os conceitos científicos envolvidos. Essa abordagem buscou tornar os conceitos mais concretos e acessíveis, favorecendo a construção de significados a partir da experiência.

Outro aspecto considerado nos objetivos da pesquisa refere-se à organização das atividades sob uma perspectiva investigativa, incentivando os estudantes a formular hipóteses, analisar dados e construir explicações fundamentadas. Essa orientação está alinhada aos princípios do Ensino por Investigação, nos quais o estudante assume um papel mais ativo no processo de aprendizagem, participando da construção do conhecimento a partir da interação com os fenômenos estudados.

A integração de recursos tecnológicos também constituiu um elemento relevante da proposta, incluindo o uso de microcontroladores, simulações digitais e ferramentas de apoio à análise de dados. Essa integração teve como finalidade ampliar as possibilidades de exploração dos fenômenos experimentais, permitindo maior controle das variáveis envolvidas e aproximando os estudantes de práticas contemporâneas da ciência e da tecnologia.

A pesquisa buscou ainda incorporar a discussão de aspectos relacionados às interações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente, tomando o hidrogênio como um tema articulador. Essa abordagem permitiu situar os conteúdos trabalhados

em um contexto mais amplo, relacionado às questões energéticas contemporâneas, seus desafios e implicações.

Por fim, a investigação teve como objetivo analisar os efeitos da sequência didática no contexto de sua aplicação, considerando tanto a compreensão conceitual dos estudantes quanto suas formas de interação com as atividades propostas. A análise dos dados possibilitou identificar elementos que contribuíram para a aprendizagem, bem como aspectos que demandam ajustes, permitindo a proposição de aprimoramentos na sequência didática em consonância com os pressupostos da *Design-Based Research*.

3. Aportes Teóricos

3.1 Educação científica contemporânea e os desafios do século XXI

A educação científica, no contexto contemporâneo, assume um papel estratégico na formação de sujeitos capazes de compreender, interpretar e intervir criticamente na realidade em que estão inseridos. Em um cenário marcado por rápidas transformações tecnológicas, intensificação das crises ambientais, instabilidades socioeconômicas e disputas geopolíticas em torno de recursos energéticos, torna-se insuficiente conceber o ensino de Ciências como um processo restrito à transmissão de conteúdos conceituais descontextualizados. Ao contrário, exige-se uma abordagem que articule conhecimentos científicos, reflexão ética, análise social e desenvolvimento de competências investigativas (Bybee, 2014).

Essa perspectiva dialoga com a compreensão de educação como processo formativo integral, voltado não apenas à aquisição de informações, mas à construção de sentidos, valores e modos de participação social. O relatório coordenado por Delors *et al.* (1998) já destacava que a educação do século XXI deve apoiar-se em pilares que ultrapassem o domínio cognitivo, envolvendo aprender a conhecer, a fazer, a conviver e a ser. Tal compreensão amplia o escopo da educação científica, deslocando-a de uma lógica puramente instrumental para uma lógica formativa, crítica e emancipatória.

No campo da Educação em Ciências, essa mudança de paradigma tem sido acompanhada por uma crítica crescente aos modelos tradicionais de ensino, baseados na memorização, na fragmentação disciplinar e na centralidade do

professor como transmissor do saber. Esses modelos, além de pouco eficazes em termos de aprendizagem profunda, tendem a afastar os estudantes da ciência, reforçando a percepção de que se trata de um campo inacessível, abstrato e desvinculado de suas experiências cotidianas. Autores como Chassot (2003) defendem que a alfabetização científica deve possibilitar ao estudante “ler o mundo” a partir da ciência, compreendendo como os conhecimentos científicos e tecnológicos atravessam sua vida cotidiana, influenciam decisões políticas, moldam relações sociais e produzem impactos ambientais. Essa leitura crítica exige que o ensino se organize em torno de problemas reais, controvérsias sociocientíficas e situações que demandem posicionamento, e não apenas reprodução de definições.

As Ciências implicam em formar sujeitos capazes de interpretar dados, avaliar argumentos, identificar fontes confiáveis, compreender incertezas e lidar com a complexidade. Essa concepção fundamenta-se na ideia de que aprender ciência não é apenas acumular informações, mas compreender como o conhecimento é produzido, validado e utilizado socialmente.

3.2 O ensino de energia como campo estratégico da educação científica

Entre os diversos temas que atravessam a educação científica, a energia se destaca como um eixo estruturante, tanto do ponto de vista conceitual quanto social. Trata-se de um conceito transversal, presente em diferentes áreas do conhecimento, e que se manifesta de forma concreta na vida cotidiana dos estudantes: no consumo de eletricidade, nos combustíveis, nos transportes, na alimentação, nos processos industriais e nos impactos ambientais.

Apesar dessa centralidade, o ensino de energia tem sido historicamente marcado por abordagens fragmentadas, centradas em fórmulas, classificações e exercícios descontextualizados. Essa forma de abordagem tende a esvaziar o potencial formativo do tema, reduzindo-o a um conjunto de abstrações matemáticas e definições técnicas.

Quando tratado como um problema sociocientífico, o tema energia adquire outra densidade pedagógica. Questões como matriz energética, fontes renováveis, justiça ambiental, segurança energética, mudanças climáticas e transição energética passam a integrar o currículo de forma problematizadora, exigindo dos estudantes não

apenas compreensão conceitual, mas também posicionamento ético, análise social e tomada de decisões fundamentadas.

Solomon (1993) argumenta que temas sociocientíficos permitem a articulação entre conhecimento científico e valores sociais, promovendo uma aprendizagem mais complexa e significativa. Ao discutir energia sob essa perspectiva, o ambiente educacional contribui para a formação de sujeitos capazes de compreender que as decisões tecnológicas não são neutras, mas atravessadas por interesses econômicos, disputas políticas e impactos ambientais.

Ao integrar o tema energia à educação científica, cria-se a possibilidade de discutir, por exemplo, as matrizes energéticas, os impactos de combustíveis fósseis, a transição para fontes renováveis e os desafios tecnológicos associados a esse processo. Tais discussões são particularmente relevantes em contextos escolares marcados por vulnerabilidades sociais, onde os efeitos das crises ambientais e energéticas tendem a ser mais intensos e desiguais.

3.3 O hidrogênio como tema sociocientífico

A escolha do hidrogênio como eixo temático desta pesquisa não é aleatória. Trata-se de um vetor energético que ocupa posição central nos debates contemporâneos sobre transição energética, sustentabilidade e inovação tecnológica. Ao mesmo tempo, é um tema pouco explorado no currículo da educação básica, o que o torna especialmente fértil do ponto de vista pedagógico.

Do ponto de vista científico, o hidrogênio permite o trabalho com conceitos fundamentais da Química e da Física, como reações de oxirredução, eletrólise, conservação de energia, eficiência energética e transformação de matéria. Do ponto de vista tecnológico, articula-se a sistemas de armazenamento, células a combustível, sensores, automação e microcontroladores. Já no plano social e ambiental, suscita debates sobre riscos, custos, impactos ecológicos, desigualdade de acesso e políticas públicas.

Segundo Sadler (2004), temas sociocientíficos caracterizam-se por envolver controvérsias, múltiplos pontos de vista e incertezas, exigindo que os estudantes mobilizem não apenas conhecimentos científicos, mas também competências argumentativas, éticas e sociais.

Ao trabalhar o hidrogênio sob essa perspectiva, o processo ensino-aprendizagem amplia o horizonte formativo da educação científica, conectando ciência, tecnologia e sociedade de forma indissociável.

Complementarmente o hidrogênio permite a construção de experimentos acessíveis, como a eletrólise da água, que tornam visíveis processos abstratos e favorecem a compreensão por meio da observação direta, da manipulação de variáveis e da coleta de dados. Essa dimensão prática é fundamental para a construção de significados e para a consolidação de aprendizagens duradouras.

3.4 Alfabetização científica e ensino contextualizado

A alfabetização científica, entendida como a capacidade de compreender e utilizar conhecimentos científicos em situações reais, constitui um dos pilares da educação contemporânea. Para autores como Sasseron e Carvalho (2011), ser alfabetizado cientificamente implica compreender conceitos, procedimentos e atitudes associados à ciência, além de reconhecer sua natureza histórica, social e cultural.

Ser alfabetizado cientificamente significa ser capaz de mobilizar conhecimentos científicos para interpretar situações do cotidiano, avaliar informações, tomar decisões e participar de debates públicos. Essa concepção amplia significativamente o processo ensino-aprendizagem, exigindo práticas pedagógicas que promovam investigação, problematização e reflexão crítica.

O ensino contextualizado emerge, nesse cenário, como uma estratégia fundamental. Contextualizar não é apenas exemplificar conteúdos com situações do cotidiano, mas integrar os saberes pedagógicos a problemas reais, relevantes e socialmente situados. Freire (1996) já apontava que a educação deve partir da realidade concreta dos sujeitos, valorizando seus saberes e experiências como ponto de partida para a construção do conhecimento.

No caso do ensino de energia e hidrogênio, a contextualização pode ocorrer por meio da análise de problemas ambientais locais, do debate sobre fontes de energia, do impacto das contas de luz nas famílias, das notícias veiculadas pela mídia e das políticas públicas relacionadas à transição energética. Essas conexões conferem sentido ao conteúdo e ampliam o engajamento dos estudantes.

3.5 A abordagem CTSA como eixo epistemológico

A abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) constitui um referencial teórico-metodológico que busca integrar diferentes dimensões do conhecimento científico, rompendo com visões reducionistas e tecnicistas da ciência. Essa perspectiva deriva dos movimentos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e da Educação Ambiental, incorporando a dimensão ecológica como elemento central.

Segundo Auler e Delizoicov (2001), a abordagem CTS visa problematizar a ciência como uma construção humana, situada histórica e socialmente, permeada por interesses, valores e disputas de poder. Ao incorporar o “A” de Ambiente, a abordagem CTSA amplia essa discussão, destacando os impactos ecológicos das decisões tecnocientíficas.

Essa abordagem rompe com a visão positivista de ciência como conjunto de verdades absolutas, promovendo uma compreensão mais crítica e histórica do conhecimento científico. No contexto do ensino de energia, essa perspectiva é particularmente relevante, pois permite discutir, por exemplo, os impactos socioambientais das matrizes energéticas, os interesses econômicos envolvidos na exploração de recursos naturais e as desigualdades no acesso à energia.

Luz, Queiroz e Prudêncio (2019) destacam a importância da aproximação entre Educação em Ciências e Educação Ambiental, argumentando que ambas se complementam na construção de práticas pedagógicas críticas e socialmente comprometidas. Essa integração é particularmente relevante quando se trata de temas como energia e hidrogênio, cujos impactos ambientais e sociais são significativos.

3.6 Escola pública e contextos de vulnerabilidade social

A realização desta pesquisa em uma escola pública de ensino médio integral, situada em contexto representativo da realidade brasileira, não é apenas uma delimitação empírica, mas uma escolha epistemológica e política. A educação brasileira enfrenta desafios estruturais que atravessam desigualdades econômicas, precarização de recursos, evasão e desvalorização social.

Nesse contexto, a educação científica pode desempenhar um papel emancipatório, desde que não reproduza modelos elitistas e tecnicistas. Ao contrário,

é necessário construir propostas que dialoguem com as realidades dos estudantes, reconhecendo suas experiências e potencialidades.

Autores como Arroyo (2012) defendem que o ambiente educacional deve ser compreendido como um espaço em que se confrontam diferentes concepções de sociedade, envolvendo valores, interesses e perspectivas sobre o papel da educação. Ao trabalhar temas como energia e hidrogênio sob a perspectiva CTSA, a aula pode se tornar um espaço de reflexão crítica sobre desigualdades, injustiças ambientais e possibilidades reais de transformação social.

As práticas investigativas, experimentais e interdisciplinares tendem a ampliar o engajamento dos estudantes, especialmente nos contextos em que o currículo mal concebido é frequentemente percebido como distante de suas realidades. A construção de protótipos, a realização de experimentos e o desenvolvimento de projetos conferem sentido ao aprendizado e fortalecem a identidade dos estudantes como sujeitos capazes de produzir conhecimento.

3.7 Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL) e sua relevância para a educação científica

A Aprendizagem Baseada em Projetos, conhecida como *Project-Based Learning* (PBL), estrutura-se a partir da proposição de problemas ou desafios autênticos que mobilizam os estudantes na construção de soluções, produtos ou na realização de investigações. Diferentemente de abordagens instrucionais tradicionais, nas quais comumente os conteúdos são apresentados de forma fragmentada e sequencial, o PBL organiza a aprendizagem em torno de uma questão central que articula diferentes saberes e competências.

Thomas (2000) caracteriza o PBL como uma abordagem que promove a aprendizagem profunda ao exigir que os estudantes planejem, investiguem, tomem decisões e avaliem criticamente suas próprias produções. Essa estrutura favorece o desenvolvimento da autonomia, da responsabilidade intelectual e da capacidade de trabalhar colaborativamente, aspectos essenciais para a formação científica contemporânea.

No âmbito da educação em Ciências, o PBL adquire especial relevância, pois aproxima a teoria, que é essencial, às práticas e da forma como o conhecimento científico é produzido na realidade de ciências e da tecnologia. A produção do

conhecimento científico não ocorre por meio da simples recepção de informações, mas pela formulação de problemas, pela investigação sistemática e pela validação de hipóteses. Ao vivenciarem essas etapas em projetos pedagógicos, os estudantes passam a compreender a ciência como um processo dinâmico, histórico e socialmente situado.

Ao trabalhar temas como energia e hidrogênio sob a lógica do PBL, os estudantes são instigados a investigar variáveis, testar protótipos, analisar dados, discutir implicações sociais e apresentar soluções fundamentadas. Essa dinâmica rompe com a lógica da memorização e favorece a construção de conhecimentos significativos, contextualizados e aplicáveis.

3.8 Ensino por Investigação (IBSE) e a centralidade da pergunta

O Ensino por Investigação, também conhecido como *Inquiry-Based Science Education* (IBSE), fundamenta-se na ideia de que aprender ciência implica investigar, questionar e construir explicações a partir de evidências. Essa abordagem desloca o foco da transmissão de respostas prontas para a formulação de perguntas relevantes e para o desenvolvimento de estratégias investigativas.

Pedaste et al. (2015) descrevem o IBSE como um processo cíclico composto por fases interdependentes, que incluem orientação, conceitualização, investigação, conclusão e discussão. Em cada uma dessas etapas, os estudantes são convidados a mobilizar conhecimentos prévios, formular hipóteses, realizar experimentos, interpretar resultados e comunicar suas conclusões.

Essa perspectiva é particularmente relevante no ensino de conceitos abstratos e contraintuitivos, como os relacionados à energia, às reações químicas e à eletrólise. Ao investigarem esses fenômenos de forma empírica, os estudantes têm a oportunidade de confrontar suas concepções iniciais com evidências observáveis, promovendo processos de reorganização conceitual.

Ao incorporar o IBSE à sequência didática, esta pesquisa busca criar situações em que os estudantes possam formular perguntas como: “Quais fatores influenciam a produção de hidrogênio na eletrólise?”, “Como otimizar esse processo?”, “Quais são os riscos e benefícios dessa tecnologia?”. Essas questões não apenas orientam as atividades, mas também conferem sentido ao aprendizado.

No contexto desta pesquisa, o IBSE articula-se à Aprendizagem Baseada em Projetos (*Project-Based Learning* – PBL), na medida em que as investigações realizadas pelos estudantes estão inseridas em um processo mais amplo de resolução de problemas e desenvolvimento de soluções. Enquanto o IBSE orienta a construção do conhecimento científico por meio da investigação e análise de evidências, o PBL organiza essas aprendizagens em torno de um projeto significativo, no qual os estudantes são desafiados a propor, testar e aprimorar soluções relacionadas à produção e ao uso do hidrogênio. Dessa forma, investigação e projeto não se configuram como abordagens isoladas, mas complementares, contribuindo conjuntamente para a construção de conhecimentos e para o desenvolvimento de competências científicas e tecnológicas.

Além disso, o IBSE contribui para o desenvolvimento de competências epistêmicas, como argumentação, avaliação de evidências, controle de variáveis e construção de modelos explicativos. Essas competências são fundamentais para a alfabetização científica e para a formação de sujeitos capazes de participar de debates públicos informados.

3.9 Aprendizagem ativa e engajamento cognitivo

As abordagens PBL e IBSE inscrevem-se em um campo mais amplo denominado aprendizagem ativa. Trata-se de uma concepção segundo a qual os estudantes aprendem de forma mais eficaz quando participam ativamente do processo de construção do conhecimento, envolvendo-se em tarefas que exigem reflexão, tomada de decisões, produção e diálogo.

Bonwell e Eison (1991) afirmam que a aprendizagem ativa envolve estratégias pedagógicas que exigem dos estudantes mais do que a escuta passiva, eles precisam ler, escrever, discutir, criar, experimentar e refletir. Tais práticas contribuem para a consolidação do conhecimento, pois mobilizam diferentes processos cognitivos.

No ensino de Ciências, a aprendizagem ativa é especialmente importante, pois os conceitos científicos frequentemente se distanciam da experiência cotidiana. A experimentação, a modelagem e a construção de protótipos funcionam como mediadores entre o mundo empírico e os modelos teóricos, favorecendo a compreensão e permitindo que os estudantes confrontem suas ideias iniciais com evidências empíricas, promovendo reestruturações conceituais.

3.10 Interdisciplinaridade como princípio epistemológico e pedagógico

A interdisciplinaridade constitui um dos eixos estruturantes desta proposta, não apenas como estratégia didática, mas como princípio epistemológico. A fragmentação do conhecimento curricular em disciplinas estanques dificulta a compreensão de problemas complexos, como os relacionados à energia, à sustentabilidade e à transição tecnológica.

Fazenda (2002) compreende a interdisciplinaridade como um processo de diálogo entre diferentes campos do saber, no qual as fronteiras disciplinares são atravessadas em função de objetivos comuns. Não se trata de eliminar as disciplinas, mas de promover articulações que ampliem o horizonte interpretativo.

No ensino de energia e hidrogênio, essa articulação é particularmente necessária, pois envolve conceitos da Física, da Química, da Tecnologia e da Computação. A compreensão do fenômeno da eletrólise, por exemplo, exige conhecimentos químicos sobre reações redox, princípios físicos relacionados à corrente elétrica e noções tecnológicas sobre dispositivos e sensores.

Ao trabalhar esses conteúdos de forma integrada, a sequência didática possibilita que os estudantes desenvolvam uma visão sistêmica dos fenômenos, reconhecendo a interdependência entre diferentes áreas do conhecimento.

3.11 Tecnologias educacionais como mediação pedagógica

O uso de tecnologias digitais no contexto educacional não deve ser compreendido como um fim em si mesmo, mas como um meio para potencializar processos de aprendizagem. Moran (2015) argumenta que as tecnologias podem ampliar as possibilidades pedagógicas quando utilizadas de forma crítica, intencional e contextualizada.

Na presente pesquisa, o uso de sensores, microcontroladores, simuladores e plataformas digitais não visa apenas à aquisição de habilidades técnicas, mas à compreensão de como essas tecnologias se inserem em processos científicos e sociais mais amplos. Essa perspectiva rompe com uma visão instrumentalista e aproxima-se de uma concepção emancipatória da tecnologia.

O uso de tecnologias acessíveis e de baixo custo contribui para a democratização do acesso ao conhecimento científico, especialmente em contextos

de má distribuição da renda e ingerência dos impostos públicos, colaborando para reduzir barreiras de acesso e promovendo a inclusão.

3.12 Protagonismo estudantil e formação integral

O protagonismo estudantil constitui um princípio central desta proposta pedagógica. Trata-se da concepção de que os estudantes devem ser reconhecidos como sujeitos ativos, capazes de tomar decisões, formular problemas e produzir conhecimentos.

Dewey (1938) defende que a educação deve ser baseada na experiência, permitindo que os estudantes aprendam fazendo e refletindo sobre suas ações. Essa perspectiva dialoga com o PBL e o IBSE ao valorizar a aprendizagem ativa, a resolução de problemas e a reflexão sobre a prática. No PBL, isso se concretiza na elaboração de projetos que exigem tomada de decisão e construção de soluções. No IBSE, manifesta-se na investigação orientada, com formulação de hipóteses, manipulação de variáveis e análise de evidências.

A formação integral, por sua vez, refere-se ao desenvolvimento não apenas de competências cognitivas, mas também sociais, emocionais e éticas. Essa perspectiva amplia o sentido da educação científica, vinculando-a à formação de cidadãos críticos, solidários e comprometidos com o bem comum.

No contexto de uma escola pública situada em área de fragilidade econômica, o protagonismo estudantil assume uma dimensão ainda mais significativa. Ao reconhecer os estudantes como sujeitos capazes de criar, investigar e transformar, a estrutura educacional contribui para a construção de identidades positivas e para a ampliação de horizontes de futuro.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Enquadramento metodológico: *Design-Based Research*

Esta pesquisa insere-se no campo das investigações educacionais de natureza empírica, adotando como eixo estruturante a abordagem metodológica da *Design-Based Research* (DBR), também denominada Pesquisa Baseada em *Design*. Tal escolha decorre da necessidade de articular, de forma indissociável, a produção de

conhecimento teórico com a transformação concreta das práticas pedagógicas em contextos reais de ensino.

Diferentemente de abordagens experimentais clássicas, que tendem a isolar variáveis em ambientes controlados, a DBR parte do reconhecimento da complexidade inerente aos fenômenos educacionais. Essa complexidade manifesta-se nas interações entre sujeitos, conteúdos, contextos socioculturais, políticas educacionais, condições materiais e dinâmicas institucionais. Nesse sentido, a DBR não busca eliminar a complexidade, mas compreendê-la e trabalhar a partir dela.

De acordo com o DBR-*Collective* (2003), a DBR caracteriza-se pela construção, implementação, análise e refinamento iterativo de intervenções educacionais, com o objetivo de produzir simultaneamente soluções pedagógicas e conhecimento teórico sobre os processos de ensino e aprendizagem. Essa perspectiva rompe com a dicotomia entre teoria e prática, ao reconhecer que o conhecimento educacional emerge do diálogo entre concepções teóricas e experiências concretas.

No campo da Educação em Ciências, a DBR tem sido amplamente defendida por permitir que propostas pedagógicas sejam concebidas com base em referenciais sólidos, testadas em situações reais de sala de aula e continuamente aprimoradas a partir da análise crítica de seus resultados. Kneubil e Pietrocola (2017) destacam que essa abordagem possibilita compreender não apenas se uma inovação funciona, mas como, por que, em que condições e para quais sujeitos ela produz determinados efeitos.

Ao adotar a DBR, esta pesquisa assume que a sequência didática não é um produto finalizado desde o início, mas um artefato em permanente construção. Cada aplicação da proposta constitui uma oportunidade de coleta de dados, reflexão teórica e redesenho pedagógico. Esse movimento iterativo fortalece o rigor da pesquisa, pois evita soluções prescritivas e universalizantes, valorizando a contextualização e a responsividade às necessidades reais dos estudantes.

Complementarmente, a DBR permite que o pesquisador atue como agente implicado no processo educativo. Essa implicação se materializa em etapas como planejamento da intervenção com base teórica, aplicação em contexto real, coleta sistemática de dados, análise dos resultados e proposição de ajustes na sequência didática. Esse processo exige elevado nível de reflexividade, sistematização e transparência metodológica, uma vez que o pesquisador precisa explicitar suas decisões e os caminhos analíticos adotados.

4.2 Natureza da pesquisa

Do ponto de vista epistemológico, esta investigação caracteriza-se como uma pesquisa de natureza empírica, com abordagem predominantemente qualitativa, articulando diferentes fontes de dados, incluindo registros qualitativos e dados quantitativos tratados de forma descritiva. Essa opção metodológica decorre da compreensão de que os fenômenos educacionais não podem ser adequadamente apreendidos por meio de um único tipo de dado ou perspectiva analítica.

A dimensão qualitativa da pesquisa é fundamental para compreender os significados atribuídos pelos estudantes às atividades propostas, suas formas de engajamento, suas interpretações sobre os conteúdos, suas interações sociais e os sentidos que constroem em relação à ciência, à tecnologia e às questões sociocientíficas. Essa dimensão permite acessar aspectos subjetivos, simbólicos e contextuais que não podem ser reduzidos a números.

Por outro lado, a dimensão quantitativa contribui para a identificação de padrões, tendências e variações nos desempenhos conceituais, atitudinais e procedimentais dos estudantes ao longo da implementação da sequência didática. Instrumentos como questionários, escalas e testes diagnósticos permitem observar mudanças, avanços e persistências de determinadas concepções.

A integração entre essas duas dimensões possibilita uma compreensão mais abrangente e robusta do impacto da proposta pedagógica, bem como a articulação entre diferentes fontes de dados possibilita a triangulação das evidências, o cruzamento de perspectivas e o aprofundamento interpretativo, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do fenômeno investigado.

4.3 Papel do professor-pesquisador

Nesta investigação, o professor assume simultaneamente o papel de educador e pesquisador. Essa dupla posição exige uma postura ética, reflexiva e sistemática, na qual a prática pedagógica não é apenas executada, mas analisada, problematizada e reconstruída.

Essa concepção dialoga com a ideia de professor reflexivo proposta por Schön (1983), segundo a qual o profissional constrói conhecimento a partir da reflexão sobre

a ação. Ao registrar, analisar e reinterpretar sua prática, o professor-pesquisador transforma a experiência cotidiana em objeto legítimo de investigação científica.

Na perspectiva da DBR, essa atuação é central, pois permite captar nuances, tensões e emergências que dificilmente seriam observadas por um pesquisador externo. O professor-pesquisador atua como mediador entre os objetivos da pesquisa e as demandas reais da sala de aula.

4.4 Considerações éticas

A pesquisa observa rigorosamente os princípios éticos que regem as investigações em educação. Todos os participantes foram previamente informados sobre os objetivos, procedimentos e possíveis desdobramentos do estudo, sendo assegurados o anonimato, a confidencialidade das informações e o direito à desistência a qualquer momento, sem prejuízo de qualquer natureza.

O projeto foi submetido à apreciação do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), tendo sido aprovado conforme parecer consubstanciado registrado na Plataforma Brasil, sob o Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE) nº 74536623.9.0000.5400, com situação “Aprovado”.

As produções dos estudantes foram utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos, sendo garantida a preservação de suas identidades em todas as formas de divulgação dos resultados. Ademais, a proposta pedagógica foi planejada de modo a integrar-se ao processo formativo dos estudantes, não configurando intervenção externa prejudicial, mas uma ampliação das práticas educativas desenvolvidas em sala de aula.

4.5 Desenho da sequência didática

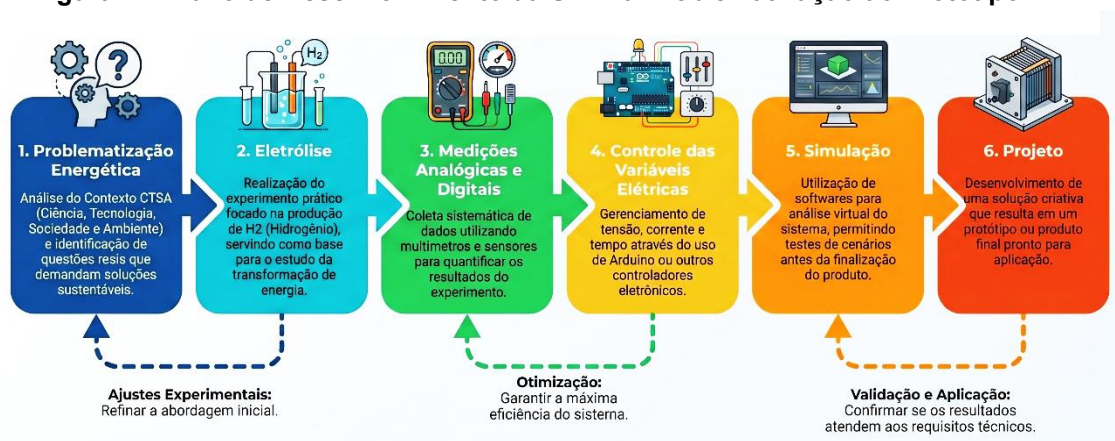
A sequência didática (SD) constitui o eixo organizador desta pesquisa e configura-se como o principal artefato pedagógico desenvolvido, implementado, analisado e refinado ao longo do processo investigativo. Não se trata de um simples encadeamento de atividades, mas de uma arquitetura pedagógica intencional, fundamentada em pressupostos teóricos claros, objetivos formativos bem definidos e

estratégias metodológicas coerentes com a abordagem CTSA, com as metodologias ativas e com o enquadramento da DBR.

De acordo com Zabala (1998), uma sequência didática caracteriza-se como um conjunto articulado de atividades organizadas em função de objetivos educacionais previamente definidos, cuja progressão permite aos estudantes avançarem conceitual, procedimental e atitudinalmente. Nessa perspectiva, a SD não é apenas um instrumento de organização do trabalho docente, mas um dispositivo de mediação didática que orienta a construção do conhecimento ao longo do tempo.

A SD foi concebida a partir de uma lógica progressiva, investigativa e interdisciplinar, estruturada em momentos que se articulam de modo espiralado. Inicialmente, os estudantes são convidados a problematizar situações relacionadas à produção e ao uso da energia, com foco no hidrogênio como vetor energético. Em seguida, são conduzidos a atividades de investigação empírica, experimentação, coleta de dados e análise de variáveis associadas à eletrólise da água. Posteriormente, essas experiências são sistematizadas conceitualmente, articuladas a discussões sociocientíficas e culminam em produções autorais, como projetos, relatórios, protótipos ou apresentações.

Figura 1 – Fluxo de Desenvolvimento da SD: Da Problemática ao Protótipo.



Fonte: Autor.

Essa organização dialoga com propostas de ensino de ciências que defendem a centralidade da problematização, da investigação e da experimentação como elementos estruturantes da aprendizagem (Hodson, 1994; Bybee, 2014; Delizoicov; Angotti; Pernambuco, 2011), rompendo com modelos fragmentados e excessivamente expositivos.

4.6 Fases da DBR

O desenvolvimento da SD orientado pelos princípios da DBR, tem como por natureza ser interventiva, iterativa e situada, diferentemente de modelos de pesquisa que buscam controlar variáveis em ambientes artificiais, a DBR reconhece a complexidade dos contextos educacionais reais e valoriza a interação contínua entre teoria e prática (*The Design-Based Research Collective*, 2003; Barab; Squire, 2004).

Nesta investigação, o ciclo da DBR foi operacionalizado em quatro fases principais, que se articulam de forma dinâmica e não linear:

4.6.1 Análise e diagnóstico do contexto

A primeira fase consistiu na análise aprofundada do contexto curricular, do perfil dos estudantes, das condições infraestruturais e das demandas pedagógicas específicas do ambiente escolar. Esse diagnóstico envolveu não apenas a aplicação de um pré-teste conceitual, mas também observações iniciais em sala, interações dialógicas com os estudantes e análise de suas falas e registros durante as primeiras atividades.

A partir desses elementos, buscou-se identificar não apenas o domínio conceitual dos estudantes sobre energia e hidrogênio, mas também suas interpretações, dúvidas recorrentes e formas de explicar os fenômenos, caracterizando suas concepções iniciais.

Essa etapa é fundamental para assegurar a pertinência sociocultural da proposta, em consonância com a perspectiva freireana de que o ensino deve partir da realidade concreta dos sujeitos (Freire, 1996). O diagnóstico, portanto, não foi concebido como uma etapa meramente descritiva, mas como um processo de escuta, observação e análise das formas de compreensão dos estudantes diante dos fenômenos investigados.

4.6.2 Concepção e desenvolvimento do protótipo pedagógico

Com base nos dados obtidos na fase de diagnóstico, foi desenvolvido um protótipo inicial da sequência didática. Esse protótipo incorporou os referenciais da educação CTSA, da aprendizagem baseada em projetos (PBL), do ensino por

investigação (IBSE) e da interdisciplinaridade, buscando articular esses elementos de forma coerente e alinhada aos objetivos da pesquisa.

Nessa fase, foram elaborados os roteiros de atividades, os materiais de apoio, os instrumentos de registro e os critérios preliminares de acompanhamento da aprendizagem. O protótipo não foi concebido como uma versão definitiva, mas como uma estrutura inicial, aberta a ajustes, revisões e aprimoramentos ao longo do processo investigativo.

A elaboração do protótipo considerou também os aspectos éticos da pesquisa, estando o projeto previamente submetido e aprovado pelo Comitê de Ética conforme detalhado na seção 4.4.

4.6.3 Implementação em contexto real

A terceira fase correspondeu à aplicação da sequência didática em contexto real de sala de aula, com caráter interventivo. Nessa etapa, o pesquisador atuou diretamente na condução das atividades, mediando as interações, orientando os procedimentos experimentais e acompanhando o desenvolvimento das tarefas pelos estudantes.

Na implementação realizada, foram desenvolvidas atividades experimentais, medições elétricas, construção de registros e elaboração de projetos tecnológicos. Durante esse processo, foram utilizados diferentes instrumentos de coleta de dados, incluindo pré e pós-testes, registros em diário de campo, observações sistemáticas, produções escritas dos estudantes e gravações pontuais de falas.

As observações foram orientadas por um *checklist* previamente elaborado, permitindo registrar aspectos como participação, engajamento, colaboração entre os grupos, dificuldades recorrentes e estratégias de resolução de problemas. Paralelamente, os estudantes registraram dados experimentais e construíram representações, como tabelas e gráficos, que também foram analisadas como evidências de aprendizagem.

Essa etapa possibilitou identificar, de forma situada, como os estudantes interagiram com a proposta, quais conceitos foram mobilizados, quais dificuldades emergiram e como as atividades contribuíram para a construção do conhecimento, constituindo base empírica para a fase de análise e refinamento.

4.6.4 Análise, refinamento e redesenho

A quarta fase consistiu na análise crítica dos dados coletados ao longo da implementação da sequência didática, com foco na identificação de potencialidades, limitações e aspectos passíveis de aprimoramento. Essa análise foi realizada por meio da triangulação de diferentes fontes de dados, incluindo pré e pós-testes, registros em diário de campo, observações sistemáticas, produções dos estudantes e questionários de motivação.

Diferentemente de uma abordagem qualitativa descritiva, que se limita à interpretação dos dados produzidos, a *Design-Based Research* se caracteriza pela articulação entre análise e intervenção, orientada à melhoria do próprio artefato educacional. Nesse sentido, a análise não teve como finalidade apenas compreender o que ocorreu durante a aplicação, mas subsidiar o aperfeiçoamento da sequência didática.

A partir dos resultados obtidos, foram identificados aspectos que demandam ajustes, como a reorganização de determinadas atividades, o aprimoramento das estratégias de mediação pedagógica e a adequação de instrumentos de acompanhamento da aprendizagem.

Em função das delimitações temporais da pesquisa, não foi possível realizar um novo ciclo de reimplementação da sequência didática. No entanto, foram sistematizadas propostas de refinamento fundamentadas nos dados empíricos obtidos, mantendo o princípio iterativo da DBR no nível analítico e projetivo.

O produto educacional resultante desta pesquisa corresponde à sequência didática analisada e ajustada a partir das evidências obtidas na aplicação, acompanhada de recomendações estruturadas para sua adaptação e aprimoramento em futuras implementações. Essa perspectiva está alinhada aos pressupostos da DBR, que concebe os produtos educacionais como construções situadas, abertas a ciclos sucessivos de revisão e aperfeiçoamento.

4.7 Instrumentos de coleta de dados

A coleta de dados foi organizada de modo a contemplar diferentes dimensões do processo investigado, por meio do uso articulado de múltiplos instrumentos. Foram considerados tanto registros de natureza qualitativa quanto informações quantitativas

expressas em frequências e percentuais, possibilitando a análise do fenômeno em suas dimensões conceituais, processuais e formativas.

Os principais instrumentos utilizados foram:

4.7.1 Questionários

Aplicados em diferentes momentos do processo, os questionários buscaram identificar concepções iniciais e finais dos estudantes sobre energia, hidrogênio, ciência e tecnologia, bem como atitudes em relação à aprendizagem científica e às questões sociocientíficas.

Os instrumentos utilizados encontram-se disponíveis no Apêndice, permitindo ao leitor acesso integral às questões aplicadas e à estrutura dos instrumentos de coleta de dados.

4.7.2 Diários de campo e registros reflexivos

O professor-pesquisador manteve registros sistemáticos ao longo da implementação da SD, documentando observações, falas dos estudantes, dificuldades encontradas, estratégias adotadas e ajustes realizados. Esses registros foram fundamentais para a análise qualitativa do processo.

4.7.3 Produções dos estudantes

Foram analisadas produções escritas, relatórios, esquemas, registros experimentais, projetos finais e apresentações multimídia. Esses materiais permitiram avaliar a apropriação conceitual, o desenvolvimento de habilidades investigativas e o nível de integração entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente.

4.7.4 Observações em sala de aula

As observações tiveram caráter descritivo e interpretativo, buscando compreender como os estudantes interagiram entre si, como negociavam significados e como se posicionavam frente às problemáticas sociocientíficas.

4.8 Critérios de análise

A análise dos dados foi orientada por critérios alinhados aos objetivos da pesquisa e aos referenciais teóricos adotados. Entre os principais eixos analíticos, destacam-se:

- Evolução do entendimento conceitual sobre energia, eletrólise e hidrogênio;
- Desenvolvimento de habilidades investigativas;
- Capacidade de articulação entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente;
- Níveis de protagonismo e autonomia;
- Engajamento nas atividades;
- Qualidade das produções autorais;
- Mudanças atitudinais em relação à ciência.

Os dados qualitativos foram organizados e interpretados por meio de procedimentos de categorização temática, com base em referenciais da análise de conteúdo (Bardin, 2011), enquanto os dados quantitativos foram tratados por meio de estatísticas descritivas.

Os dados qualitativos foram organizados e interpretados por meio de procedimentos de categorização temática, com base em referenciais da análise de conteúdo (Bardin, 2011), enquanto os dados quantitativos foram tratados por meio de estatísticas descritivas.

Em alinhamento aos pressupostos da DBR, a análise foi conduzida de modo a compreender como os estudantes interagiram com a proposta, quais elementos favoreceram a aprendizagem e quais dificuldades emergiram ao longo da implementação. Essa perspectiva permitiu relacionar os resultados obtidos às escolhas pedagógicas realizadas, contribuindo para uma interpretação situada dos dados.

4.9 Integração analítica dos dados no contexto da pesquisa

A análise dos dados nesta investigação foi orientada pela articulação entre diferentes fontes e instrumentos de coleta, possibilitando uma leitura mais abrangente dos fenômenos educacionais analisados. Essa integração envolveu o uso conjunto de

registros qualitativos, como observações, produções dos estudantes e registros em diário de campo, bem como dados quantitativos expressos em frequências e percentuais, utilizados como apoio à interpretação dos resultados.

Essa articulação ocorreu principalmente no momento de análise, quando informações provenientes de diferentes instrumentos foram consideradas de forma complementar, permitindo identificar convergências, contrastes e relações entre os dados. Tal procedimento contribuiu para o fortalecimento das interpretações, ao possibilitar a triangulação das evidências e a construção de inferências fundamentadas sobre os efeitos da sequência didática no contexto investigado.

Essa perspectiva é coerente com a natureza da pesquisa, que busca compreender o fenômeno educacional em sua complexidade, considerando tanto os aspectos observáveis quanto os significados atribuídos pelos participantes ao longo do processo de aprendizagem.

4.10 Validação da proposta

A validação da SD ocorreu por meio de múltiplas estratégias, incluindo:

- Coerência entre objetivos e resultados observados;
- Engajamento dos estudantes;
- Consistência interna das atividades;
- Adequação ao contexto curricular;
- Possibilidade de replicação;
- Feedback dos participantes.

Esses critérios permitiram avaliar não apenas a eficácia pedagógica da proposta, mas também sua viabilidade prática e seu potencial de disseminação.

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização do contexto empírico e organização dos dados

A aplicação da Sequência Didática ocorreu em uma turma composta por 12 estudantes do Ensino Médio, organizados em dois grupos de trabalho, no contexto de

uma escola pública de período integral. A proposta foi desenvolvida ao longo de quatro aulas consecutivas de 50 minutos, conforme o planejamento descrito anteriormente, envolvendo atividades experimentais, uso de tecnologias digitais, programação básica e elaboração de projetos investigativos.

Desde o início da intervenção, observou-se um elevado nível de curiosidade e expectativa por parte dos estudantes, especialmente diante da proposta de produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água e explorar suas possíveis aplicações energéticas. Esse interesse inicial foi registrado tanto por meio do *checklist* de observação docente quanto pelas falas espontâneas dos estudantes durante a sensibilização, quando questionamentos como “isso dá pra usar em carro?”, “dá pra fazer energia só com água?” e “isso é perigoso?” emergiram de forma recorrente.

A condução das atividades foi realizada de maneira colaborativa entre dois professores: um docente da área de Química, responsável principalmente pela mediação conceitual relacionada à eletroquímica (oxirredução, cátodo, ânodo, eletrólito), e o pesquisador-professor, que assumiu a mediação dos aspectos tecnológicos, incluindo eletrônica básica, uso de multímetro, potenciômetro, microcontroladores (Arduino/Micro:bit), simulações no *Tinkercad* e reflexão sobre aplicações reais.

Essa divisão de papéis favoreceu uma abordagem interdisciplinar efetiva, permitindo que os estudantes transitassem continuamente entre conceitos científicos, procedimentos experimentais e desenvolvimento tecnológico, em consonância com os princípios da abordagem CTSA e da DBR.

Os dados analisados nesta etapa da pesquisa foram organizados em três grandes eixos:

1. Dados quantitativos, provenientes do pré-teste, pós-teste conceitual e do Questionário de Motivação (escala Likert adaptada), tratados por meio de estatísticas descritivas, como frequências e percentuais;
2. Dados qualitativos obtidos por meio das transcrições de áudio das aulas, registros em diário de laboratório, observações em sala e avaliação por pares;
3. Produções dos estudantes, incluindo gráficos, rascunhos, esquemas, protótipos conceituais, apresentações elaboradas com apoio de Inteligência Artificial Generativa e propostas de projeto.

Essa organização possibilitou uma análise integrada dos dados, articulando evidências relacionadas à aprendizagem conceitual, ao engajamento dos estudantes e ao desenvolvimento de habilidades investigativas, sem a pretensão de generalização estatística, mas com foco na compreensão do fenômeno em seu contexto.

Figura 2 - Estudantes durante a montagem da cuba eletrolítica com materiais acessíveis.



Fonte: Autor.

5.2 Diagnóstico inicial e evolução conceitual sobre eletrólise e hidrogênio

Como pode ser visto no APÊNDICE G, o pré-teste aplicado na primeira aula evidenciou que, embora todos os estudantes já tivessem tido contato prévio com conceitos básicos de oxirredução, apenas 5 dos 12 alunos (aproximadamente 42%) conseguiam explicar corretamente o processo de eletrólise da água como uma separação induzida por corrente elétrica. Da mesma forma, somente 4 estudantes identificaram corretamente o cátodo como local de produção do hidrogênio. Esses dados sugerem a necessidade de uma abordagem mais experiencial e investigativa, reforçando a pertinência da estrutura IBSE adotada na SD.

Após a realização das atividades experimentais, medições elétricas e discussão coletiva dos resultados, o pós-teste localizado no APÊNDICE G indicou avanços significativos. Ao final da sequência:

- 10 estudantes ($\approx 83\%$) passaram a identificar corretamente o cátodo como polo de produção de H_2 ;

- 9 estudantes ($\approx 75\%$) explicaram adequadamente o papel da corrente elétrica na taxa de produção do gás;
- 10 estudantes reconheceram ao menos duas medidas de segurança essenciais durante a eletrólise (ventilação, baixa tensão, uso de óculos).

Esses resultados evidenciam uma ampliação consistente da compreensão conceitual, especialmente quando associada à vivência prática. A manipulação direta dos materiais, aliada à visualização das bolhas de gás, medições com multímetro e construção de gráficos, contribuiu para transformar conceitos abstratos em fenômenos observáveis.

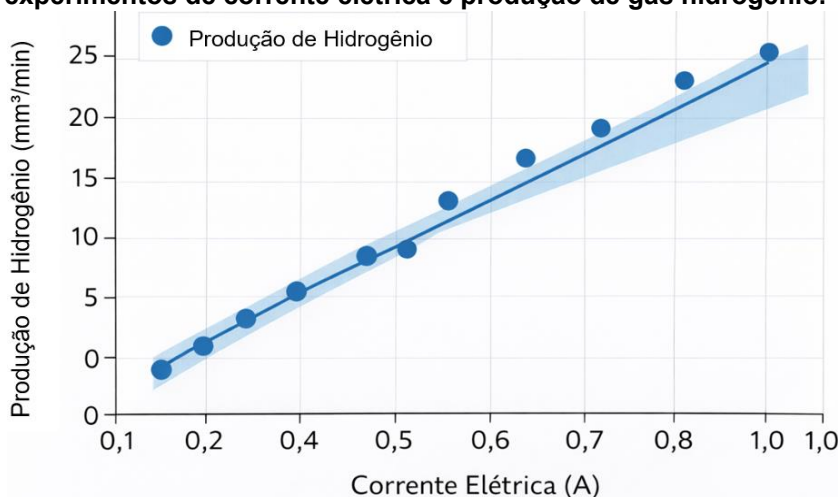
Durante as atividades, os próprios estudantes passaram a levantar hipóteses, como registrado em áudio:

“Professor, quando aumenta a corrente, faz mais bolha... então deve produzir mais hidrogênio.”

Esse tipo de inferência demonstra o desenvolvimento de pensamento científico elementar, alinhado à proposta de investigação guiada.

A Figura 3 apresenta um dos gráficos construídos pelos estudantes a partir dos dados coletados durante o experimento. Para sua elaboração, os grupos registraram medidas de corrente elétrica e volume de gás produzido ao longo do tempo, organizando essas informações inicialmente em tabelas e, posteriormente, representando-as graficamente por meio de I.A. generativa. A construção do gráfico ocorreu de forma orientada, com mediação do professor, incentivando a análise da relação entre as variáveis envolvidas.

Figura 3 - Gráfico construído pelos estudantes utilizando I.A. generativa relacionando os dados obtidos nos experimentos de corrente elétrica e produção de gás hidrogênio.



Fonte: Autor.

5.3 Engajamento, participação e aprendizagem experiencial

A análise do *checklist* de observação indicou participação ativa de praticamente todos os estudantes ao longo das quatro aulas. Em média, 10 dos 12 alunos apresentaram níveis altos de engajamento, colaborando na montagem das cubas, realização das medições e registro dos dados.

O Questionário de Motivação revelou que:

- 9 estudantes (75%) declararam alto interesse em aprender mais sobre hidrogênio como fonte de energia;
- 8 estudantes ($\approx 67\%$) afirmaram sentir-se capazes de compreender eletrólise por meio de atividades práticas;
- 3 estudantes (25%) relataram confiança inicial no uso de microcontroladores, número que aumentou para 8 após as atividades com Arduino e Micro:bit.

Esse crescimento indica que o contato direto com programação em blocos e sensores contribuiu para reduzir barreiras cognitivas associadas à tecnologia, conforme previsto pelo referencial adotado.

A aprendizagem experiencial também se evidenciou em momentos não planejados, mas altamente formativos, aprofundado no tópico 5.5, o qual ilustra claramente a integração entre investigação, colaboração, tecnologia e mediação docente, caracterizando um ciclo autêntico de aprendizagem científica situada.

5.4 Desenvolvimento das práticas experimentais e construção de evidências empíricas

A implementação da sequência didática evidenciou um envolvimento progressivo dos estudantes com as práticas experimentais propostas, especialmente a partir da montagem e execução da cuba eletrolítica. Desde as primeiras atividades práticas, observou-se que a manipulação direta dos materiais como: recipientes plásticos, eletrodos, fontes de baixa tensão, multímetros e dispositivos de controle favoreceu a compreensão dos conceitos abstratos relacionados à eletrólise da água, aproximando-os de situações concretas e observáveis.

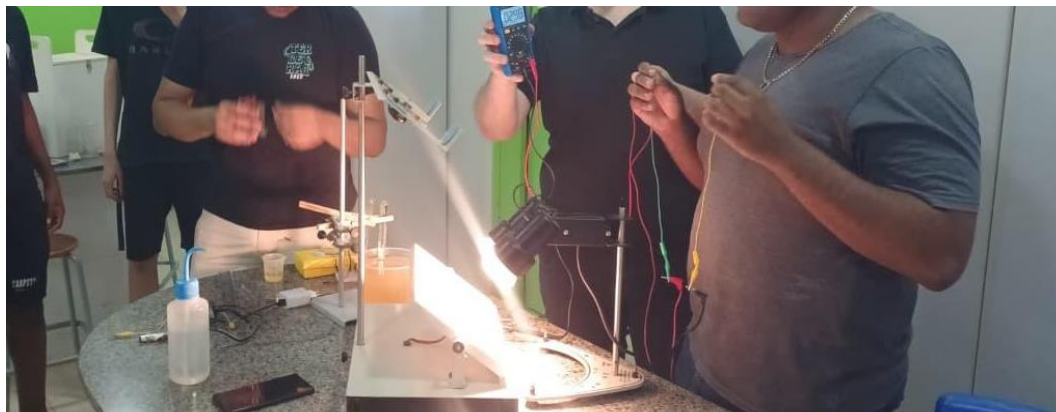
Cada grupo foi responsável por montar sua própria cuba eletrolítica, realizar medições de tensão e corrente, registrar dados em diário de laboratório e discutir coletivamente os resultados obtidos. Essa organização favoreceu a colaboração, a divisão de tarefas e a corresponsabilização pelo processo investigativo, uma vez que os estudantes precisaram distribuir funções entre si, como montagem do sistema, realização das medições, registro dos dados e acompanhamento das variáveis experimentais. Observou-se que, ao longo das atividades, os grupos passaram a negociar decisões, discutir procedimentos e compartilhar responsabilidades, o que contribuiu para a construção coletiva do conhecimento.

As medições elétricas realizadas com o auxílio do multímetro constituíram um dos momentos centrais da atividade experimental. Os estudantes foram orientados quanto à diferença entre medições de tensão e corrente, compreendendo a necessidade de inserir o multímetro em série para a medição da corrente e em paralelo para a medição da tensão. Essa distinção, inicialmente pouco clara para parte do grupo, tornou-se mais compreensível à medida que os próprios estudantes realizaram os procedimentos e observaram variações nos valores medidos.

Os registros nos diários de laboratório indicam que os estudantes relacionaram, de forma progressiva, o aumento da corrente elétrica com a intensificação da liberação de bolhas de gás no cátodo. A partir das observações e anotações realizadas ao longo do tempo de experimento, os grupos passaram a formular explicações baseadas na relação entre corrente elétrica e taxa de produção de hidrogênio. Por exemplo, durante a análise dos dados, os estudantes passaram a associar variações nos valores de corrente às mudanças na intensidade da liberação de bolhas no eletrodo, utilizando essas observações para justificar diferenças nos resultados obtidos entre os grupos. Esse movimento indica avanço na compreensão dos processos envolvidos.

A construção de gráficos simples, relacionando corrente elétrica e tempo de produção do gás, constituiu outro elemento relevante do processo. A Figura 4 apresenta um exemplo dessa produção, elaborada pelos estudantes a partir dos dados coletados durante o experimento. Embora os gráficos tenham sido construídos com apoio do professor, os estudantes participaram ativamente da interpretação dos dados, discutindo tendências, variações e possíveis fontes de erro experimental. Esse momento contribuiu para a compreensão de que os dados experimentais não são absolutos, mas dependem de condições controladas, instrumentos utilizados e procedimentos adotados.

Figura 4 - Registro da medição de corrente elétrica com multímetro inserido em série no circuito.



Fonte: Autor

A observação sistemática, registrada por meio do *checklist* do formador, indicou que ambos os grupos mantiveram níveis elevados de participação e colaboração, especialmente durante as fases de montagem e medição. Em mais de 75% dos momentos observados, os estudantes demonstraram autonomia ao organizar o experimento, conectar os componentes do circuito, ajustar a fonte de tensão, realizar medições com o multímetro e registrar os dados sem necessidade de intervenção direta. Também foram observadas situações em que os próprios estudantes propuseram ajustes no procedimento, como reposicionamento dos eletrodos ou revisão das conexões, recorrendo ao professor principalmente para validação conceitual ou esclarecimento de dúvidas pontuais.

5.5 Investigação de fenômenos emergentes e aprofundamento conceitual

Um aspecto particularmente relevante do processo experimental foi a emergência de situações não previstas inicialmente no roteiro da SD, mas que se converteram em oportunidades pedagógicas significativas. Um exemplo marcante foi a observação, por parte dos estudantes, de uma tonalidade amarelada na solução eletrolítica após determinado tempo de funcionamento da cuba (Figura 5).

Essa alteração visual gerou questionamentos espontâneos entre os estudantes, que passaram a discutir possíveis causas para o fenômeno observado. Inicialmente, surgiram hipóteses relacionadas à contaminação da água, à degradação dos eletrodos e à concentração do eletrólito. Diante dessas hipóteses, os próprios estudantes sugeriram buscar informações em fontes digitais, promovendo uma consulta orientada a materiais online e trocas entre os grupos.

Após a socialização das informações encontradas, os estudantes dialogaram com o professor, que conduziu uma discussão coletiva sobre possíveis reações secundárias, liberação de impurezas e alterações químicas no meio. Para aprofundar a análise, foi utilizado um kit de medição de pH (Figura 6) disponível no laboratório da escola, permitindo que os estudantes realizassem medições em momentos diferentes do experimento.

Os resultados indicaram uma variação no pH da solução, o que possibilitou estabelecer relações entre o processo eletroquímico, a composição do eletrólito e as alterações observadas visualmente. Esse momento revelou-se particularmente rico do ponto de vista didático, pois integrou conceitos de química, física e tecnologia, além de reforçar a importância da observação atenta e da investigação sistemática.

Figura 5 - Solução eletrolítica apresentando tonalidade amarelada após o experimento.



Fonte: Autor.

Figura 6 - Modelo utilizado para visualização de pH da solução eletrolítica no laboratório.



Fonte: Gerada por I.A.

A incorporação desse episódio ao desenvolvimento da SD evidenciou a flexibilidade do planejamento e a capacidade de adaptação às demandas emergentes do processo de aprendizagem, em consonância com os princípios da DBR. Ao invés de tratar o fenômeno como um erro experimental, ele foi ressignificado como oportunidade de aprofundamento conceitual e ampliação do repertório científico dos estudantes.

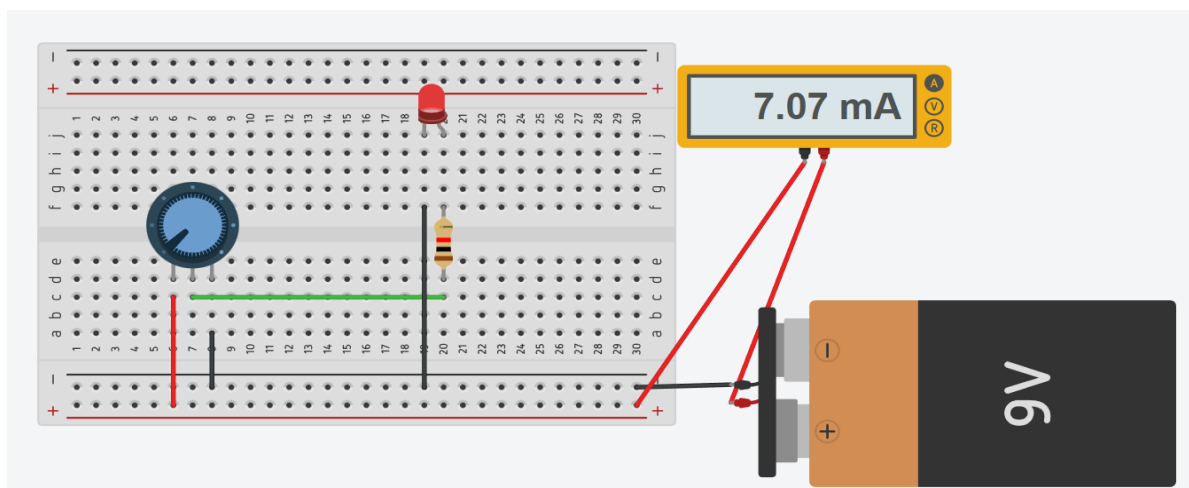
5.6 Integração entre experimentação, tecnologia e controle de variáveis

Referindo-se à introdução de elementos de eletrônica e automação no controle do experimento, inicialmente os estudantes utilizaram um potenciômetro para ajustar manualmente a tensão aplicada à cuba eletrolítica, observando como pequenas variações influenciavam a intensidade da corrente e a produção de gás.

Posteriormente, esse controle analógico foi comparado com o controle digital realizado por meio do Arduino, utilizando o ambiente de simulação Tinkercad. Os estudantes programaram rotinas simples para leitura e controle das variáveis elétricas, visualizando os dados de forma digital e compreendendo a equivalência funcional entre o potenciômetro físico e o controle via *software*.

Os registros indicam que aproximadamente 30% dos estudantes demonstraram, inicialmente, insegurança quanto ao uso de microcontroladores, especialmente no que se refere à programação. No entanto, ao final da sequência didática, os dados do questionário de motivação apontaram que 67% dos participantes se declararam confiantes para utilizar microcontroladores em contextos experimentais, evidenciando um avanço significativo nesse aspecto.

Figura 7 - Simulação digital do controle de corrente elétrica do experimento de eletrólise (representando a geração de H₂ pela intensidade do LED) no ambiente Tinkercad.



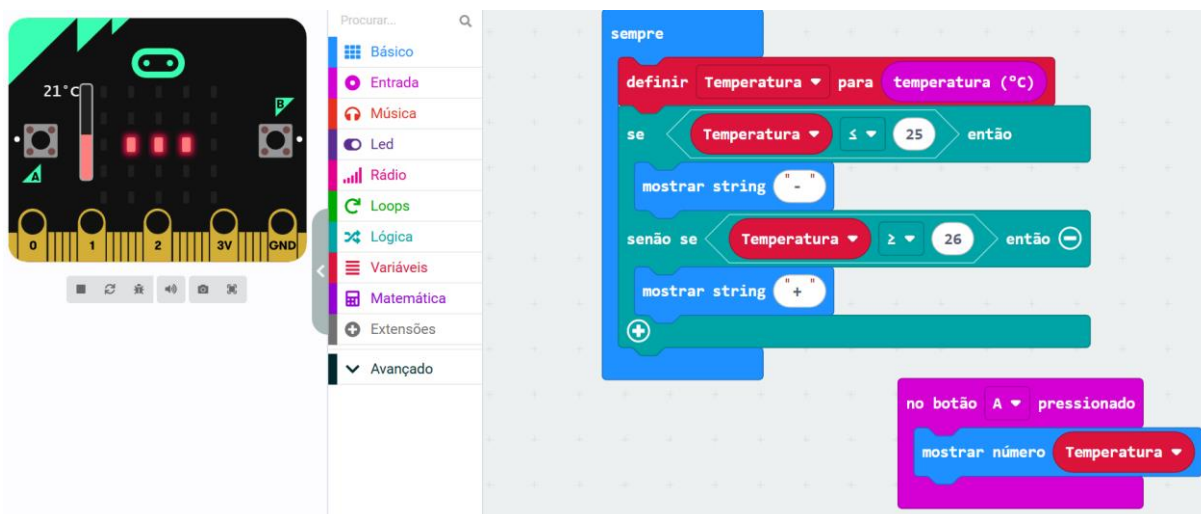
Fonte: Autor.

Figura 8 - Estudantes utilizando potenciômetro para controle analógico da tensão.



Fonte: Autor.

Figura 9 - Programação em Blocos utilizada para demonstração de potencialidades do uso do Micro:bit. Possibilitando a medição da variável de temperatura do sistema.



Fonte: Autor.

Essa progressão reforça a importância da abordagem gradual e contextualizada no ensino de tecnologias digitais, permitindo que os estudantes construam confiança a partir da experimentação concreta e da compreensão funcional dos sistemas envolvidos.

5.7 Desenvolvimento dos projetos estudantis e articulação CTSA

Após as etapas de experimentação, medições elétricas e exploração inicial de recursos tecnológicos, os estudantes foram convidados a elaborar propostas aplicadas que mobilizassem os conhecimentos construídos. Essa fase, organizada sob princípios da Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL), constituiu o momento de maior integração entre conceitos, procedimentos e tomada de decisão em contexto sociocientífico.

A escolha dos temas emergiu de discussões coletivas realizadas em momentos de problematização e análise dos resultados experimentais. Alguns exemplos que foram discutidos: (i) limitações de acesso à energia em regiões isoladas; (ii) alternativas de baixo custo para geração distribuída; (iii) o hidrogênio como vetor energético; (iv) implicações ambientais das diferentes matrizes; (v) acessibilidades a tecnologias e (vi) custos financeiros gerais. Registros no diário de campo do professor-pesquisador indicam recorrência de questões como “onde isso poderia ser usado na

vida real?” e “quanto custaria fazer isso fora da escola?”, o que orientou a seleção dos problemas de projeto.

As produções finais foram apresentadas em formato de slides, acompanhadas de esquemas conceituais e desenhos dos sistemas propostos. Parte desses materiais encontra-se ilustrada na Figura 10 e no Apêndice N (esboços dos grupos). As rubricas de avaliação entre pares, aplicadas na socialização, também foram coletadas e analisadas, as quais foram adaptadas em tabelas para melhor leitura, disponível no Apêndice M, permitindo rastrear critérios utilizados pelos próprios estudantes (clareza do funcionamento, viabilidade, segurança e impacto social).

Figura 10 - Imagem em ampliação dos slides utilizados pelos estudantes do Projeto 2, por meio de I.A. generativa para apresentação dos desenvolvimentos de projeto do grupo.

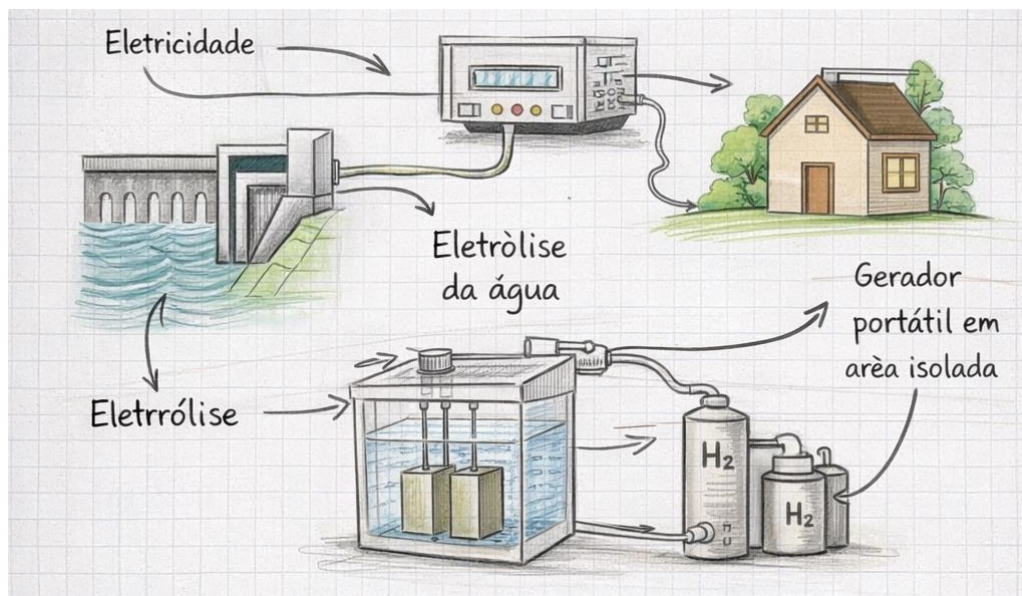


Fonte: Autor.

5.7.1 Projeto 1 – Produção descentralizada de hidrogênio em usinas hidrelétricas e geração portátil de energia

O primeiro grupo estruturou uma proposta de produção descentralizada de hidrogênio associada a usinas hidrelétricas, prevendo o uso de parte da energia gerada para a eletrólise da água, armazenamento do gás e posterior utilização em geradores residenciais de pequeno porte. Nos slides do grupo (Figura 11), observa-se a representação das etapas do sistema: fonte elétrica → célula eletrolítica → armazenamento → uso final.

Figura 11 - Representação esquemática realizada pelos estudantes por meio de I.A. generativa do sistema de produção descentralizada de hidrogênio e sua aplicação.

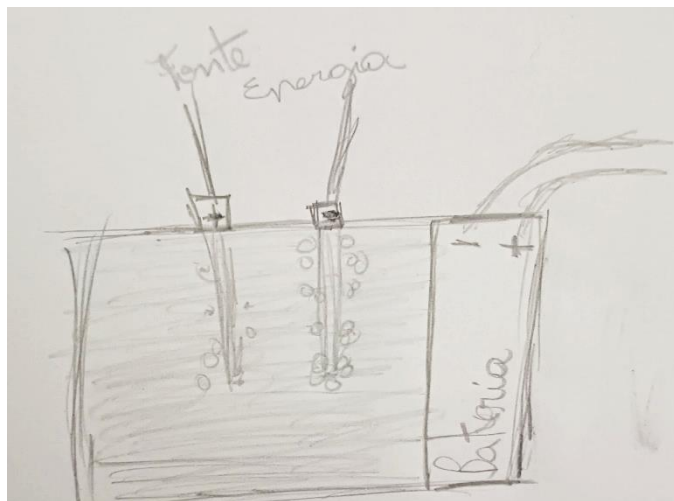


Fonte: Autor.

Durante a apresentação, os estudantes detalharam o fluxo de energia e equipamentos no sistema, articulando variáveis elétricas (corrente/tensão) com a taxa de produção de gás. Nos esquemas elaborados por eles, aparecem componentes básicos (eletrodos, fonte, reservatório), evidenciando apropriação dos elementos do experimento realizado em aula.

O grupo também propôs um gerador portátil de baixo custo para comunidades com acesso limitado à rede elétrica. Esse protótipo conceitual foi registrado por meio de desenhos esquemáticos, conforme a figura 12, nos quais se observam a disposição dos eletrodos, o recipiente de eletrólise e conexões elétricas simplificadas. A materialidade desses registros permite acompanhar como os estudantes traduziram o experimento em solução aplicada.

Figura 12: Esboço de uma “Fonte de Energia Portátil”.



Fonte: Autor.

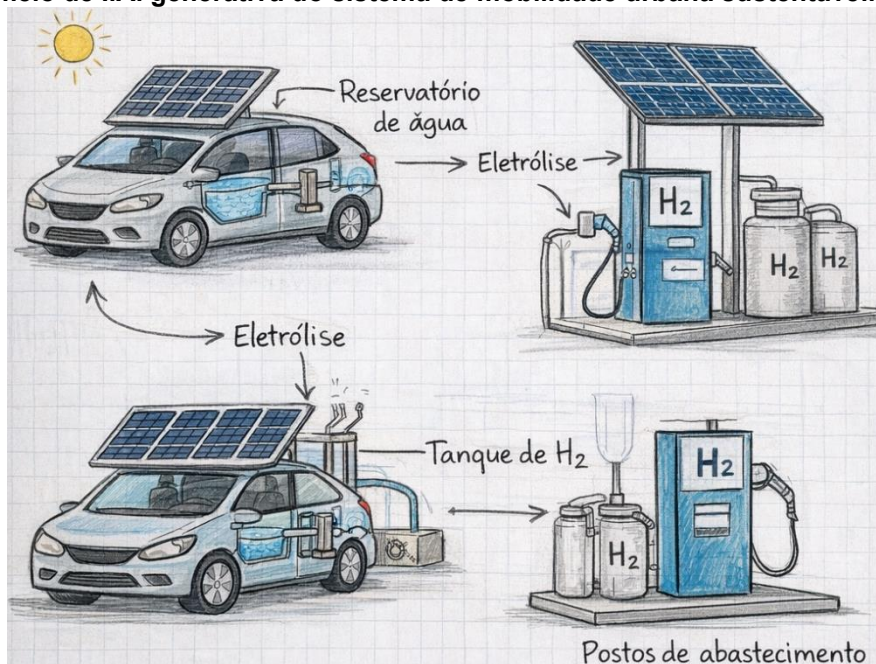
Nos registros de campo, aparecem formulações que indicam generalização do fenômeno observado. Exemplo representativo de fala (extraído de anotações do professor-pesquisador): “Se a gente consegue produzir mais bolhas com mais corrente, então aqui dá para pensar em produzir mais gás se tiver mais energia disponível na usina”. Essa inferência conecta diretamente a observação empírica ao desenho do sistema proposto.

A dimensão social da proposta foi explicitada quando os estudantes discutiram o uso do sistema em regiões isoladas. Nas rubricas de avaliação por pares, colegas apontaram questões como segurança do armazenamento do hidrogênio e custo de implementação. Exemplo representativo de comentário em rubrica: “O que fariam de medida de segurança para armazenamento do hidrogênio? E quanto custaria para uma família em média?”. Tais intervenções exigiram que o grupo justificasse escolhas e reconhecesse limitações, caracterizando um processo de tomada de decisão em contexto sociocientífico (Aikenhead, 1994; Santos & Mortimer, 2002).

A análise conjunta dos registros (slides, esquemas e rubricas) indica que o grupo não apenas compreendeu o processo de eletrólise, mas conseguiu situá-lo em um problema real, incorporando critérios técnicos e sociais, um resultado alinhado à vertente crítica da abordagem CTSA.

5.7.2 Projeto 2 – Mobilidade urbana sustentável: carro a hidrogênio e posto de abastecimento solar

O segundo grupo desenvolveu uma proposta voltada à mobilidade urbana sustentável, centrada em um veículo movido a hidrogênio integrado a um sistema de geração solar. Nas representações de imagens apresentadas (Figura 10 e Figura 13), os estudantes representaram os principais subsistemas: painéis fotovoltaicos, unidade de eletrólise, armazenamento de H_2 e uso no motor.



Fonte: Autor.

A explicação do funcionamento evidenciou articulação entre diferentes etapas do sistema. Os estudantes indicaram que a energia solar captada alimentaria a eletrólise, produzindo hidrogênio para uso posterior. Exemplo representativo de fala (registro de campo): “A placa gera energia, essa energia separa a água e o hidrogênio vira combustível depois”. Embora simplificada, a formulação demonstra integração conceitual coerente com o modelo apresentado.

Além do veículo, o grupo propôs um posto de abastecimento compacto baseado em energia solar. Esquemas presentes nos slides mostram a disposição de painéis, unidade de eletrólise e armazenamento. Durante a apresentação, os estudantes destacaram benefícios ambientais (redução de emissões) e reconheceram desafios de custo e infraestrutura. Exemplo representativo de comentário do grupo: “É mais limpo, mas precisa de investimento e estrutura; não é algo simples de implementar”.

A produção dos slides contou com apoio de ferramenta de IA generativa, utilizada para organização textual e visual. Esse uso foi mediado pelo professor, com revisão crítica das informações. Registros no diário de campo indicam intervenções do tipo: “De onde veio esse dado?” e “Isso bate com o que vocês mediram no experimento?”. Esse processo favoreceu a validação das informações e evitou a aceitação acrítica das respostas da IA.

Na avaliação entre pares, foram recorrentes critérios como clareza do sistema, viabilidade e segurança. Estudantes de outros grupos questionaram, por exemplo, a capacidade de armazenamento e a necessidade de infraestrutura urbana. Tais

interações ampliaram o debate e exigiram que o grupo refinasse sua argumentação, evidenciando desenvolvimento de competências comunicativas e argumentativas.

A análise dos materiais (slides, esquemas, rubricas e registros de mediação) indica apropriação consistente dos conceitos de eletrólise e do hidrogênio como vetor energético, além da capacidade de articular ciência, tecnologia e implicações sociais em consonância com a abordagem CTSA e com a lógica investigativa do IBSE.

5.7.3 Avaliação entre pares e uso crítico da Inteligência Artificial Generativa

A etapa de avaliação entre pares constituiu um momento fundamental de consolidação dos conhecimentos construídos ao longo da sequência didática, articulando diretamente os projetos desenvolvidos pelos grupos com processos de análise crítica e argumentação. Após a apresentação das propostas descritas nos itens 5.7.1 e 5.7.2, os estudantes foram convidados a avaliar os trabalhos dos colegas com base em rubricas previamente definidas, que contemplavam critérios como clareza conceitual, viabilidade da proposta, coerência do sistema apresentado e implicações sociais e ambientais.

Durante essa atividade, observou-se que os estudantes não se limitaram à atribuição de avaliações superficiais, mas passaram a justificar suas análises com base em aspectos técnicos e conceituais discutidos ao longo das aulas. Nos registros das rubricas, é possível identificar comentários que evidenciam esse movimento, como questionamentos sobre a segurança do armazenamento do hidrogênio, a eficiência energética dos sistemas propostos e a viabilidade econômica das soluções apresentadas. Esse processo exigiu escuta atenta, interpretação das propostas e elaboração de argumentos, configurando um espaço de aprendizagem no qual os estudantes passaram a assumir um papel ativo também na avaliação.

A dinâmica de avaliação entre pares também favoreceu a revisão das próprias produções. Em diferentes momentos, os grupos retomaram aspectos de seus projetos a partir das críticas recebidas, ajustando explicações e reconhecendo limitações das propostas. Esse movimento indica um avanço na compreensão dos fenômenos estudados e na capacidade de refletir sobre o próprio processo de aprendizagem, em consonância com abordagens que valorizam a metacognição e a construção coletiva do conhecimento.

Paralelamente a essa etapa, os estudantes foram orientados a interagir com ferramentas de Inteligência Artificial generativa, formulando questões relacionadas aos próprios projetos, como estratégias de otimização da eletrólise, alternativas de uso de energia solar e cuidados com o armazenamento do hidrogênio. As respostas obtidas foram analisadas coletivamente, sendo confrontadas com os dados experimentais produzidos durante as atividades e com os conceitos discutidos em sala.

Esse momento revelou aspectos importantes do desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes. Em vez de aceitar as respostas da IA de forma imediata, os grupos passaram a questionar a ausência de referências, a generalidade de algumas recomendações e a aplicabilidade prática das soluções sugeridas. Em registros do diário de campo, observa-se, por exemplo, a recorrência de questionamentos como “isso funciona mesmo na prática?” ou “como sabemos que essa informação está correta?”, indicando a mobilização de critérios de validação do conhecimento.

A mediação docente foi essencial nesse processo, orientando os estudantes a confrontar as informações fornecidas pela IA com evidências empíricas e fundamentos científicos. Esse exercício contribuiu para deslocar a percepção da tecnologia como fonte absoluta de respostas, reforçando a ideia de que o conhecimento científico se constrói a partir da análise crítica, da experimentação e da validação.

Ao articular a avaliação entre pares com o uso crítico da Inteligência Artificial, essa etapa consolidou elementos centrais da proposta pedagógica, evidenciando a integração entre investigação, argumentação e reflexão sociotécnica. Os estudantes demonstraram capacidade de analisar propostas, sustentar posicionamentos e revisar suas próprias ideias, o que se alinha aos pressupostos da abordagem CTSA em sua vertente crítica, ao promover a compreensão da ciência e da tecnologia como práticas situadas, passíveis de questionamento e análise.

Dessa forma, a atividade não apenas ampliou a compreensão conceitual dos conteúdos trabalhados, mas também contribuiu para o desenvolvimento de competências relacionadas à autonomia intelectual, à argumentação e à alfabetização científico-tecnológica, constituindo-se como um dos momentos mais significativos da sequência didática.

6 Considerações Finais, Limitações e Perspectivas Futuras

6.1 Síntese dos principais achados

Esta pesquisa teve como propósito investigar o potencial pedagógico de uma Sequência Didática voltada à produção de hidrogênio por eletrólise, articulando experimentação científica, metodologias ativas, tecnologias digitais e abordagem CTSA no contexto de uma escola pública de ensino médio integral.

Os resultados obtidos evidenciam que a proposta foi capaz de promover aprendizagens significativas em múltiplas dimensões: conceitual, procedimental, tecnológica e sociocientífica. Os estudantes demonstraram avanço consistente na compreensão dos princípios da eletrólise, da função dos eletrodos, da relação entre corrente elétrica e taxa de produção de hidrogênio, bem como no reconhecimento dos cuidados de segurança envolvidos no processo.

Os dados do pré e pós-teste indicaram aumento expressivo na apropriação conceitual, com destaque para:

- compreensão correta da eletrólise da água;
- identificação do cátodo como local de formação do hidrogênio;
- reconhecimento da influência da corrente elétrica na velocidade de produção do gás;
- maior clareza quanto às medidas de segurança necessárias.

Paralelamente, observou-se desenvolvimento de habilidades investigativas, como registro sistemático de dados, elaboração de gráficos, formulação de hipóteses, análise de variáveis e proposição de melhorias experimentais.

No campo tecnológico, os estudantes demonstraram progressiva autonomia no uso de multímetros, sensores, microcontroladores e ambientes de programação em blocos, ampliando sua alfabetização científico-tecnológica. O crescimento da confiança no uso dessas ferramentas foi confirmado pelo questionário de motivação, no qual aproximadamente 8 dos 12 participantes passaram a se declarar seguros para utilizar dispositivos digitais em contextos experimentais.

Outro achado relevante foi o fortalecimento do protagonismo estudantil. Os estudantes não apenas executaram roteiros, mas tomaram decisões, levantaram

problemas, buscaram explicações adicionais e desenvolveram projetos próprios. A iniciativa espontânea de investigar a coloração amarelada da solução eletrolítica, realizar medições de pH e socializar os resultados entre os pares constitui um exemplo emblemático desse engajamento ativo.

No plano sociocientífico, os projetos elaborados pelos grupos evidenciaram compreensão ampliada das relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. As propostas de produção local de hidrogênio em hidrelétricas para abastecimento de comunidades vulneráveis e de sistemas de mobilidade urbana sustentáveis demonstram que os estudantes conseguiram extrapolar o espaço escolar, articulando conhecimentos científicos e problemáticas reais.

Esses resultados indicam que a integração entre PBL, IBSE, CTSA e DBR, operacionalizada por meio da Sequência Didática, contribuiu para uma formação mais ampla, crítica e contextualizada, alinhada aos objetivos contemporâneos da educação científica.

6.2 Contribuições para a educação científica e para a prática docente

A pesquisa oferece contribuições relevantes tanto no campo acadêmico quanto na prática pedagógica. Do ponto de vista educacional, evidencia-se que temas emergentes como o hidrogênio podem ser abordados de forma acessível na escola pública, desde que organizados em propostas didáticas bem estruturadas, com materiais de baixo custo e metodologias ativas. A experiência mostrou que é possível trabalhar conteúdos complexos de Física, Química e Tecnologia de forma integrada, sem recorrer exclusivamente a equipamentos sofisticados.

A Sequência Didática desenvolvida apresenta-se como um produto educacional replicável, capaz de ser adaptado a diferentes realidades escolares. Sua estrutura modular permite ajustes de tempo, recursos e profundidade conceitual, preservando os princípios investigativos e sociocientíficos.

Para a formação docente, o estudo evidencia o potencial da DBR como metodologia de desenvolvimento profissional. O papel do professor-pesquisador, atuando simultaneamente como mediador pedagógico e analista do processo, favoreceu uma postura reflexiva e autoral, permitindo ajustes contínuos da proposta a partir das evidências coletadas em sala de aula.

Além disso, a pesquisa demonstra que a integração entre experimentação, tecnologia digital e discussão ética não apenas amplia o engajamento dos estudantes, mas também fortalece a coerência curricular, rompendo com a fragmentação disciplinar tradicional.

6.3 Limitações do estudo

Embora os resultados sejam promissores, algumas limitações precisam ser reconhecidas. A primeira refere-se ao número reduzido de participantes, restrito a 12 estudantes organizados em dois grupos. Esse recorte impede generalizações estatísticas mais amplas, situando os achados no campo das evidências contextualizadas.

O tempo efetivamente disponível para a implementação da Sequência Didática. Embora o planejamento prevísse quatro aulas, parte desse período foi naturalmente destinada à organização da turma, orientações iniciais, distribuição de materiais e cuidados com os protocolos de segurança, aspectos inerentes a propostas experimentais em contexto escolar. Além disso, a própria complexidade da SD, que integrou investigação científica, uso de tecnologias digitais e atividades projetuais, exigiu escolhas pedagógicas criteriosas ao longo do processo, o que restringiu possibilidades de aprofundamento em alguns eixos, sem comprometer, contudo, o alcance dos objetivos formativos centrais da pesquisa.

O curto espaço de tempo entre a aplicação da SD e o processo de sistematização dos resultados para a escrita da dissertação, aliado às demandas do calendário escolar, limitou o desenvolvimento pleno do ciclo iterativo característico da DBR. Dessa forma, não foi possível realizar uma nova rodada completa de aplicação após o refinamento da proposta. O redesenho metodológico permaneceu, portanto, em nível prospectivo, fundamentado principalmente nas análises realizadas, nas observações em sala e nas sugestões levantadas pelos próprios estudantes e professor auxiliar, configurando-se como recomendações estruturadas para futuras implementações.

Quanto à dinâmica da sala de aula, observou-se que a diversidade de ritmos de aprendizagem entre os estudantes demandou mediações diferenciadas ao longo das atividades, especialmente nas etapas que envolveram programação e interpretação de dados experimentais. Essa heterogeneidade, típica do ensino médio,

exigiu acompanhamento mais individualizado em determinados momentos, o que reforça a importância da presença de mais de um mediador durante propostas dessa natureza, sobretudo quando envolvem múltiplas dimensões cognitivas e técnicas.

Por fim, destaca-se que o caráter introdutório da experiência com microcontroladores, sensores e Inteligência Artificial implicou uma abordagem exploratória desses recursos, priorizando a compreensão conceitual e o uso pedagógico inicial em detrimento de aprofundamentos técnicos mais avançados. Embora essa opção esteja alinhada ao perfil dos estudantes e aos objetivos da sequência, ela aponta para a necessidade de percursos formativos mais longos e continuados, capazes de consolidar essas competências ao longo do tempo.

6.4 Perspectivas para investigações futuras

A partir dos resultados obtidos, abrem-se diversas possibilidades para estudos posteriores. Uma primeira perspectiva consiste na ampliação temporal da Sequência Didática, incorporando aulas adicionais voltadas à automação com Raspberry Pi e programação em Python, permitindo aprofundar aplicações de Inteligência Artificial e análise de dados em tempo real.

Outra possibilidade é a realização de novos ciclos de DBR, com reaplicação da SD em diferentes turmas e escolas, possibilitando comparar contextos, refinar os instrumentos avaliativos e consolidar princípios de design pedagógico mais robustos.

Sugere-se também investigar de forma mais sistemática o impacto da integração entre IA e experimentação científica no desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes, especialmente no que se refere à avaliação de informações geradas por sistemas automatizados.

Como desdobramento da presente investigação, estudos futuros podem contemplar parcerias interdisciplinares mais amplas, envolvendo áreas como Geografia, Sociologia e Matemática, ampliando seu alcance formativo.

6.5 Considerações finais

Os resultados desta investigação evidenciam que a sequência didática desenvolvida possibilitou uma compreensão mais consistente dos processos

envolvidos na eletrólise da água e no uso do hidrogênio como vetor energético, especialmente ao articular experimentação, análise de dados e aplicação em contextos concretos. A evolução observada entre o diagnóstico inicial e os resultados finais indica que a vivência prática, associada à mediação pedagógica orientada, contribuiu para a superação de concepções superficiais e para a construção de explicações mais estruturadas por parte dos estudantes.

Para além da dimensão conceitual, a proposta favoreceu o desenvolvimento de habilidades investigativas, evidenciado na capacidade dos estudantes de formular hipóteses, interpretar resultados experimentais e estabelecer relações entre variáveis.

A manipulação direta dos materiais, a realização de medições e a construção de registros contribuíram para que os fenômenos deixassem de ser abstratos, passando a ser compreendidos a partir da observação e da análise.

A incorporação de recursos tecnológicos ampliou esse processo ao permitir maior controle das variáveis e novas formas de interação com os dados. Destaca-se, nesse contexto, a relação estabelecida pelos estudantes com ferramentas de Inteligência Artificial, que não foram utilizadas de forma passiva, mas como objeto de análise. Ao confrontar as respostas geradas com os resultados experimentais e os conceitos discutidos, os estudantes demonstraram mobilizar critérios de validação, indicando avanços na construção de uma postura mais crítica diante de informações automatizadas.

Os projetos desenvolvidos pelos grupos representam um dos principais indicadores da efetividade da proposta, ao evidenciar a capacidade dos estudantes de articular conhecimentos científicos, tecnológicos e sociais em situações aplicadas. Ainda que em nível conceitual, as propostas apresentadas demonstram compreensão dos sistemas envolvidos e a tentativa de situá-los em contextos reais, considerando aspectos como acesso à energia, sustentabilidade e limitações das soluções propostas. Esse movimento aproxima-se da perspectiva da abordagem CTSA em sua vertente crítica, ao incorporar a análise das implicações sociais e tecnológicas das escolhas energéticas.

A etapa de avaliação entre pares reforçou esse processo ao ampliar o espaço de argumentação e reflexão. Ao analisar as propostas dos colegas, os estudantes passaram a mobilizar critérios relacionados à segurança, viabilidade e impacto das soluções, sendo levados a justificar posicionamentos e revisar suas próprias ideias.

Esse momento evidenciou um deslocamento importante, no qual os estudantes

deixaram de apenas executar atividades para assumir um papel mais ativo na análise e validação do conhecimento.

Do ponto de vista pedagógico, a proposta mostrou-se viável no contexto de aplicação, utilizando materiais acessíveis e estratégias adaptáveis à realidade escolar. A organização progressiva das atividades e a integração entre experimentação, investigação e tecnologia contribuíram para o engajamento dos estudantes e para a construção de conhecimentos de forma mais significativa.

Entretanto, os resultados devem ser analisados considerando as limitações da pesquisa, especialmente o número reduzido de participantes e a realização de um único ciclo de aplicação. Esses fatores restringem a possibilidade de generalização dos resultados e indicam a necessidade de novos estudos que ampliem o número de participantes e contemplem diferentes contextos educacionais.

Nesse sentido, a continuidade da investigação por meio de novos ciclos de implementação e refinamento da sequência didática pode contribuir para o aprimoramento da proposta, em consonância com os pressupostos da *Design-Based Research*. Além disso, futuras investigações podem explorar de forma mais aprofundada a integração entre experimentação e tecnologias digitais, bem como a análise do desenvolvimento do pensamento crítico em contextos mediados por Inteligência Artificial.

Por fim, a pesquisa aponta para a relevância de propostas pedagógicas que integrem ciência, tecnologia e sociedade de forma articulada, possibilitando que os estudantes não apenas compreendam os fenômenos científicos, mas também sejam capazes de analisar criticamente suas implicações. Nesse sentido, reforça-se a importância de abordagens que promovam a investigação, a contextualização e a participação ativa dos estudantes no processo de aprendizagem, contribuindo para a formação de sujeitos mais autônomos e capazes de atuar frente aos desafios energéticos contemporâneos.

Referências

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. **Renewable energy sources**: their impact on global warming and pollution. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2011.

AIKENHEAD, G. S. What is STS science teaching? *In*: SOLOMON, J.; AIKENHEAD, G. S. (Ed.). **STS education**: international perspectives on reform. New York: Teachers College Press, 1994. p. 47-59.

ARROYO, M. G. **Outros sujeitos, outras pedagogias**. Petrópolis: Vozes, 2012.

AULER, D.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científico-tecnológica para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2001.

BARAB, S.; SQUIRE, K. Design-based research: putting a stake in the ground. **The Journal of the Learning Sciences**, v. 13, n. 1, p. 1-14, 2004.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V.; LINSINGEN, I. von. **Introdução aos estudos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade)**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003.

BLUMENFELD, P. C. et al. Motivating project-based learning: sustaining the doing, supporting the learning. **Educational Psychologist**, v. 26, n. 3-4, p. 369-398, 1991.

BONWELL, C. C.; EISON, J. A. **Active Learning**: creating excitement in the classroom. Washington: George Washington University, 1991.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2**: diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Brasília: MME/EPE, 2021.

BYBEE, R. W. NGSS and the Next Generation of Science Teachers. **Journal of Science Teacher Education**, v. 25, p. 211–221, 2014.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Economia do Hidrogênio**: bases para a consolidação da tecnologia de células a combustível no Brasil. Brasília: CGEE, 2010.

CHASSOT, A. **Alfabetização científica**: questões e desafios para a educação. 3. ed. Ijuí: Ed. da Unijuí, 2003.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. **Ensino de ciências**: fundamentos e métodos. 4. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

DELORS, J. et al. **Educação**: um tesouro a descobrir. São Paulo: Cortez/UNESCO, 1998.

DESIGN-BASED RESEARCH COLLECTIVE. Design-based research: an emerging paradigm for educational inquiry. **Educational Researcher**, v. 32, n. 1, p. 5-8, 2003.

DEWEY, J. **Experience and Education**. New York: Macmillan, 1938.

FAZENDA, I. C. A. **Integração e interdisciplinaridade no ensino brasileiro: efetividade ou ideologia**. 5. ed. São Paulo: Loyola, 2002.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

HODSON, D. Seeking directions for change: the personalisation and politicisation of science education. **Curriculum Studies**, v. 2, n. 1, p. 71-98, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: educação 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

JOHNSON, R. B.; ONWUEGBUZIE, A. J. Mixed methods research: a research paradigm whose time has come. **Educational Researcher**, v. 33, n. 7, p. 14-26, 2004.

KNEUBIL, F. B.; PIETROCOLA, M. A pesquisa baseada em design: uma metodologia para a pesquisa em ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, e4501, 2017.

LINARDI, M. Introdução à ciência e tecnologia do hidrogênio. In: CORRÊA, S. M. (Org.). **Hidrogênio e Células a Combustível**. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2011.

LUZ, R.; QUEIROZ, M. B. A.; PRUDÊNCIO, C. A. V. CTS ou CTSA: o que (não) dizem as pesquisas sobre educação ambiental e meio ambiente? **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, Florianópolis, v. 12, n. 1, p. 91-115, 2019.

MORAN, J. M. Educação Híbrida: um conceito-chave para a educação, hoje. In: BACICH, L.; TANZI NETO, A.; TREVISANI, F. M. (Orgs.). **Ensino Híbrido: personalização e tecnologia na educação**. Porto Alegre: Penso, 2015.

NETO, J. B. F.; CARVALHO, P. S. **Energia e sociedade**. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

OWUSU, P. A.; SARKODIE, S. A. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1167990, 2016.

PAPERT, S. **Mindstorms**: Children, Computers, and Powerful Ideas. New York: Basic Books, 1980.

PEDASTE, M. et al. Phases of inquiry-based learning: definitions and the inquiry cycle. **Educational Research Review**, v. 14, p. 47-61, 2015.

SADLER, T. D. Informal reasoning regarding socioscientific issues: a critical review of research. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 41, n. 5, p. 513-536, 2004.

SANTOS, W. L. P.; MORTIMER, E. F. Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem CTS (Ciência – Tecnologia – Sociedade) no contexto da educação brasileira. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 2, n. 2, p. 1-23, 2002.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 1, p. 59-77, 2011.

SCHÖN, D. A. **The Reflective Practitioner**: How Professionals Think in Action. New York: Basic Books, 1983.

SENTANCE, S.; WAITE, J. Computing in the classroom: the importance of physical computing. *In*: WORKSHOP IN PRIMARY AND SECONDARY COMPUTING EDUCATION, 12., 2017. **Proceedings...** Nijmegen: ACM, 2017. p. 11-12.

SOLOMON, J. **Teaching Science, Technology and Society**. Buckingham: Open University Press, 1993.

THOMAS, J. W. **A review of research on project-based learning**. San Rafael: The Autodesk Foundation, 2000.

UNESCO. **Década da Educação das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (2005-2014)**: documento final do esquema internacional de implementação. Brasília: UNESCO, 2005.

ZABALA, A. **A prática educativa**: como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998.

APÊNDICE A - Proposta de Intervenção Pedagógica: Sequência Didática (SD)

1. Visão Geral e Contextualização

- **Produto:** Sequência Didática (SD) de curta duração (4 aulas de 50 minutos).
- **Tema:** Produção de hidrogênio (H_2) por eletrólise como fonte de energia.
- **Contexto de Aplicação:** Turma de 12 alunos do Ensino Médio.
- **Características:** Escola de período integral.
- **Conhecimentos Prévios:** Conceitos básicos de eletroquímica (oxirredução, cátodo, ânodo).

2. Fundamentação Teórico-Metodológica

Modalidade de *Design-Based Research* (DBR) (Brown, 1992; Barab & Squire, 2004). A DBR orienta os ciclos iterativos de design, implementação e análise no contexto real da sala de aula.

As práticas didáticas articulam Métodos Ativos, que promovem a autonomia e a motivação intrínseca dos estudantes, combinando:

- 1- **Aprendizado baseado em projetos (PBL – *Project-Based Learning*):** Estrutura a atividade central de prototipagem, engajando os alunos na criação de artefatos para resolver problemas autênticos (Thomas, 2000; Blumenfeld et al., 1991).
- 2- **Método de Descoberta (IBSE – *Inquiry-Based Science Education*):** Fornece a estrutura para a investigação científica (Pedaste et al., 2015), fomentando uma aprendizagem experiencial (ou vivencial).
- 3- **Enfoque CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente):** Atua como eixo transversal, garantindo a contextualização social, ambiental e ética da ciência e tecnologia (Aikenhead, 1994; Santos & Mortimer, 2002).

A epistemologia subjacente à integração tecnológica (microcontroladores) é o Construcionismo (Papert, 1980), onde a programação e a construção de artefatos digitais são vistas como ferramentas poderosas para o desenvolvimento cognitivo e a alfabetização científico-tecnológica (Sentance & Waite, 2017).

3. Objetivos de Aprendizagem (Geral e Específicos)

3.1 Objetivo Geral

Promover o desenvolvimento da compreensão investigativa sobre a produção de hidrogênio por eletrólise, articulando habilidades experimentais, pensamento projetual (prototipagem) e interação a microcontroladores (Arduino e Micro:bit) com programação em blocos. Fomentar a transferência de conhecimento para a reflexão crítica (CTSA) sobre os impactos sociais, ambientais e éticos da tecnologia, incluindo o uso de Inteligência Artificial.

3.2 Objetivos Específicos

Espera-se que o aluno seja capaz de:

- Compreender os princípios básicos da eletrólise da água e os fatores que influenciam a produção de H_2 .
- Montar uma cuba eletrolítica com materiais acessíveis, aplicando rigorosamente as medidas de segurança.
- Medir variáveis elétricas (tensão, corrente) e correlacioná-las com a taxa de evolução do gás.
- Utilizar sensores (ex: MQ-8 detector de gás hidrogênio) e microcontroladores (Arduino/Micro:bit) em contextos experimentais.
- Programar em linguagem de blocos por meio dos programas (MakeCode/Tinkercad) para coleta e exibição de dados.
- Projetar e testar melhorias tecnológicas (ex: otimização com placas fotovoltaicas, alarmes de segurança).
- Realizar uma análise de conteúdo crítica sobre sugestões geradas por IA comparando-as com as soluções experimentais.
- Debater as implicações CTSA (riscos, sustentabilidade, equidade no acesso, uso responsável da IA).

4. Recursos Materiais e Protocolos de Segurança

Por Grupo (4-6 estudantes)

- Recipiente H_2 transparente (Garrafa PET).
- Eletrodos (lápiz grafite – lápis 6B ou eletrodos de grafite de pilhas usadas).
- Fonte de baixa tensão (*Power bank* / USB 5V / Pilhas).
- Multímetro, cronômetro, régua e Diário de Laboratório (ver Anexo F).
- Solução eletrolítica (água + solução de bicarbonato de sódio (0,1–0,5 mol/L), ou solução de hidróxido de sódio diluído).
- Kit Arduino (1 por grupo) + Sensor de H_2 (MQ-8).
- Kit Micro:bit v2 (1 por grupo) + kit básico (cabos, LEDs, *buzzer*).
- Painel fotovoltaico pequeno (5-6 V, 1-2 W).
- Equipamentos de Proteção Individual (EPI): Óculos de segurança (obrigatório); luvas descartáveis.

Recursos do Formador (Professor)

- Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC): Extintor de incêndio, ventilação adequada.
- Protocolo de segurança escrito e visível (ver Anexo K).
- PC/laptop para acesso aos ambientes de programação (MakeCode, Tinkercad).

5. Sequência Detalhada – Roteiro das Aulas

Aula 1: Sensibilização, Segurança e Montagem Experimental (50 min)

- **Objetivo:** Promover a motivação intrínseca, verificar conhecimentos prévios, montar o experimento base de eletrólise e registrar hipóteses iniciais.
- **Justificativa Metodológica:** Inicia-se a sensibilização por meio do método de descoberta (IBSE). O clima pedagógico é estabelecido para a investigação segura e colaborativa. O PBL é introduzido contextualmente (CTSA).

Tempo	Atividade (Roteiro)
0-7 min	Abertura / Sensibilização: “Como podemos gerar energia limpa usando apenas água? Por que o hidrogênio é visto como o ‘combustível do futuro’? Quais os desafios?” (Registrar respostas).
7-12 min	Avaliação Diagnóstica: Aplicação do Pré-teste (Anexo G) para aferir o quadro de referência inicial dos alunos.
12-18 min	Mini-aula (Explicação Breve): Revisão de eletrólise (reações, eletrodos), papel da corrente. Apresentação do esquema do circuito.
18-30 min	Montagem Prática (Grupos): Distribuição de materiais. O formador circula e aplica perguntas socráticas (“Onde vocês esperam ver mais bolhas? Por quê?”).
30-40 min	Execução e Registro: Ligar fonte 5V. Observação e anotação no Diário de Laboratório (Anexo F).
40-48 min	Relato Rápido e Segurança: Discussão breve das observações. Reforço dos protocolos de segurança (ventilação, risco de faísca).
48-50 min	Tarefa (Casa): Refletir sobre duas ideias de melhoria para o experimento (registrar no Diário).

- **Dificuldades Previstas:** Não observar bolhas (verificar conexões, polaridade).

Aula 2: Medição, Análise de Dados e Definição do Problema (50 min)

- **Objetivo:** Coletar dados comparativos (tensão/corrente), construir gráficos simples e definir o escopo do projeto (PBL).
- **Justificativa Metodológica:** Foco no **método de descoberta** (IBSE), trabalhando com coleta e análise de evidências. Coleta de dados para a DBR.

Tempo	Atividade (Roteiro)
0-5 min	Recapitulação e Objetivos: Apresentar a meta: “Vamos medir o efeito de diferentes variáveis na produção de H ₂ .”
5-12 min	Planejamento Experimental (Grupos): Escolher condições de teste (ex: 3V ou 5V; grafite vs inox) usando um potenciômetro para controle. Preencher a ficha experimental.
12-30 min	Execução e Medições: Realizar ensaios, registrar corrente (A) e deslocamento de água (eudiômetro improvisado com seringa ou tubo graduado invertido) para obter volume aproximado versus tempo. Anotar incertezas.
30-38 min	Tratamento de Dados: Construir gráfico (manual ou digital) de Corrente (A) vs. Taxa de Produção.
38-45 min	Discussão Orientada: “Como a corrente afeta a produção? Quais os <i>trade-offs</i> (custo energético vs. Velocidade)? E se usássemos uma placa fotovoltaica?”
45-50 min	Definição do Problema: Com base na discussão, cada grupo define seu estudo de problema. (Ex: <i>Como otimizar a produção com fonte solar?</i> Ou <i>Como criar um alarme de segurança para vazamento de H₂?</i>).

Aula 3: Introdução à Tecnologia – Sensores e Microcontroladores (50 min)

- **Objetivo:** Demonstrar o uso de sensores (MQ-8) e microcontroladores (Arduino, Micro:bit) para monitoramento e automação. Introduzir programação em blocos.
- **Justificativa Metodológica:** Introdução de recursos técnicos para o PBL. Coleta de dados digitais (IBSE) e discussão sobre acesso à tecnologia (CTSA).

Tempo	Atividade (Roteiro)
0-10 min	Demonstração (Formador): (A) Arduino + Sensor MQ-8 lendo “presença de H ₂ ” no monitor serial. (B) Micro:bit exibindo temperatura ou nível de corrente em sua matriz de LED.
10-20 min	Explicação: Diferenças e complementaridades (Arduino vs. Micro:bit). Justificativa do uso de ambos (flexibilidade vs. Acessibilidade).
20-30 min	Atividade Prática (Blocos): Grupos usam MakeCode (Micro:bit) para programar uma lógica simples (ex: “Se entrada analógica > X, mostrar ícone de ‘Gás’”).
30-40 min	Teste em Bancada: Grupos integram a programação básica ao seu sistema de eletrólise (simulando a leitura).
40-50 min	Tarefa (PBL): Esboçar como o Arduino ou Micro:bit será usado no protótipo do grupo.

Aula 4: Prototipagem, Teste e Iteração (PBL) (50 min)

- **Objetivo:** Construir e testar o protótipo mínimo viável (MVP) do projeto. Aplicar feedback por pares.
- **Justificativa Metodológica:** Fase de simulação e produção de artefato (PBL + DBR). Iteração baseada em evidências (IBSE) e interação grupal.

Apresentações (Socialização): Cada grupo apresenta (3-5 min) seu protótipo, dados e justificativas. Perguntas do formador e colegas.

Atividade Guiada com IA: Grupos formulam perguntas ao modelo de IA (ex: "Sugira 3 formas de aumentar a eficiência da eletrólise com painel fotovoltaico").

Análise Crítica (IA): O formador guia uma análise de conteúdo das respostas da IA: "Isso é plausível? Faltam fontes? Como testaríamos isso?" (Comparar com as soluções dos grupos).

Avaliação Somativa/Afetiva: Aplicação do Pós-teste (Anexo G) e do Questionário de Motivação (Anexo H).

Fechamento (Reflexão CTSA): "Que problemas sociais precisam ser resolvidos antes de usarmos H₂ em larga escala?"

APÊNDICE B - Rubrica de Avaliação do Protótipo (PBL)
(Pontuação: 0-4; Máximo: 24 pontos)

Critério	0 (Insuficiente)	1 (Limitado)	2 (Funcional)	3 (Adequado)	4 (Excepcional)
Funcionalidade	Não funciona.	Executa 1 função básica de forma inconsistente.	Executa a função principal, mas com instabilidade.	Executa as funções principais de forma estável.	Funciona de forma robusta e coerente com o objetivo.
Segurança	Risco evidente sem mitigação.	Medidas básicas ausentes ou inconsistentes.	Atende algumas medidas de segurança; riscos residuais.	Medidas de segurança adequadas e documentadas.	Segurança proativa (ex: controle automático, bloqueios).
Documentação	Sem documentação.	Documentação muito incompleta.	Documentação básica (esquema, diário).	Documentação clara (diagrama, código comentado, registros).	Documentação completa e organizada (logs, instruções).
Criatividade / Inovação	Sem elementos originais.	Ideia pouco original ou mal aplicada.	Solução funcional com algum elemento criativo.	Boa inovação aplicada com justificativa técnica.	Solução criativa e bem justificada (aplicável ao contexto real).
Relevância CTSA	Não considera aspectos sociais/ambientais.	Considera superficialmente.	Considera aspectos, mas sem articulação.	Boa articulação CTSA com evidências (custo, acesso).	Integra CTSA de forma crítica (proposições de mitigação).

APÊNDICE C - Rubrica de Avaliação Técnica (Código/Sistema)

(Pontuação: 0-4; Máximo: 20 pontos)

Critério	0 (Insuficiente)	1 (Limitado)	2 (Funcional)	3 (Adequado)	4 (Excepcional)
Funcionalidade Código	Não roda / vários erros.	Roda com limitações.	Realiza leituras e ações básicas.	Leitura + decisão + log corretos.	Código robusto (tratamento de exceções, segurança).
Qualidade dos Dados	Dados ausentes.	Dados incompletos / pouco confiáveis.	Dados com <i>timestamp</i> ; sem tratamento de ruído.	Dados tratados (média), exportados (CSV).	Dados confiáveis, incerteza estimada, metadados.
Segurança Automática	Sem mecanismos automáticos.	Mecanismo simples (manual).	Mecanismo automático básico presente.	Mecanismo automático com verificação.	Sistema inteligente (logs de evento, recuperação segura).
Clareza do Código	Ilegível, sem comentários.	Comentários escassos.	Comentários e estrutura mínimos.	Código comentado, modular e legível.	Código bem documentado (README, instruções).
Integração CTSA (Código)	Código não considera contexto.	Apenas menciona aplicação.	Argumenta uso social/ambiental.	Integra ações (segurança/impacto) em <i>runtime</i> .	Design reflete considerações sociais (acessibilidade).

APÊNDICE D - Rubrica de Reflexão Crítica (CTSA)

(Pontuação: 0-4; Usar na Apresentação e Relatório)

Critério	0 (Insuficiente)	1 (Limitado)	2 (Funcional)	3 (Adequado)	4 (Excepcional)
Reconhecimento Dimensões	Não identifica dimensões CTSA.	Identifica poucas dimensões.	Identifica algumas com superficialidade.	Identifica várias dimensões com justificativa.	Identifica múltiplas dimensões integradas à solução.
Uso de Evidências	Sem evidências.	Evidências insuficientes.	Evidências técnicas básicas.	Uso consistente de evidências experimentais.	Uso crítico de evidências (técnicas, sociais, ambientais).
Justiça / Ética	Ignora ética/justiça.	Considera superficialmente.	Inclui aspectos éticos sem profundidade.	Considera justiça e impactos sociais.	Propõe medidas práticas para equidade e mitigação.
Comunicação (Ação)	Não propõe ações.	Propostas vagas.	Propostas viáveis, mas locais.	Propostas detalhadas.	Propostas com plano de implementação e avaliação.

APÊNDICE E Checklist de Observação (Formador)*(Uso em sala para avaliação formativa)*

Grupo	Data	Participação	Colaboração	Segurança	Registro	Autonomia	Observações Rápidas
Grupo – 01							
Grupo – 02							
Grupo – 03							
Grupo – 04							

APÊNDICE F - Modelo de Diário de Laboratório (Ficha de Ensaio) - *(Modelo sugestivo de tabela para impressão)*

Escola: [Nome]	Turma: [Série]	Grupo: [Nº]	Data:
Ensaio nº	Condição (tensão, eletrodo, eletrólito)	Tempo início	Tempo fim
Corrente (A)	Tensão (V)	Observações (bolhas, ruído)	Volume/estimativa (bolhas/seg)
Hipótese	Resultado (curto)	Interpretação	Ação de melhoria proposta
Log do sensor/arquivo CSV (nome do arquivo)	Quem mediu	Assinatura do grupo	Temperatura do meio
Tipo de eletrodo (grafite/INOX)	Eletrólito e concentração aproximada	Volume coletado (mL)	

APÊNDICE G: Pré-teste / Pós-teste Conceitual (12 questões)

1. (ME) O que é eletrólise da água?
 - a) Reação espontânea que gera hidrogênio.
 - b) Separação da água em H_2 e O_2 pela ação de corrente elétrica. (Correta)
 - c) Processo de aquecimento da água.
 - d) Mistura de água com eletrólitos.
2. (MC) Durante a eletrólise, o hidrogênio é produzido no:
 - a) Ânodo
 - b) Cátodo (Correta)
 - c) Ambos igualmente
 - d) Não se produz hidrogênio
3. (MC) Aumentar a corrente elétrica na cuba eletrolítica tende a:
 - a) Diminuir a produção de gás
 - b) Aumentar a produção de gás (Correta)
 - c) Não ter efeito
 - d) Reduzir a eficiência energética
4. (VF) O hidrogênio é sempre seguro para coletar em qualquer recipiente fechado. (Falsa)
5. (MC) Um sensor MQ-8 fornece:
 - a) Medição precisa em ppm sem calibração
 - b) Indicação qualitativa/relativa de presença de H_2 (Correta)
 - c) Medição de temperatura
 - d) Controle automático de corrente
6. (Aberta Curta) Cite duas medidas de segurança importantes ao fazer eletrólise em sala de aula.
7. (MC) Programação em blocos é útil porque:
 - a) Elimina a necessidade de refletir sobre lógica
 - b) Facilita o aprendizado inicial ao reduzir erros de sintaxe (Correta)
 - c) Não permite ações reais com hardware
 - d) Substitui o ensino de conceitos
8. (MC) O que representa a sigla CTSA?
 - a) Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (Correta)
 - b) Controle de Tensão e Segurança Ambiental
 - c) Código Técnico de Segurança Acadêmica
 - d) Ciência, Teoria, Sistema e Ambiente

9. (Aberta Curta) Dê um exemplo de aplicação social do hidrogênio.
10. (MC) O que seria uma medida de mitigação ética ao implantar hidrogênio em uma comunidade?
- a) Ignorar custos sociais
 - b) Assegurar inclusão e acesso às tecnologias (Correta)
 - c) Priorizar apenas lucro
 - d) Usar apenas tecnologia importada
11. (MC) Ao fazer leitura serial do Arduino, para salvar dados como CSV você deve:
- a) Usar apenas o monitor serial e copiar-colar manualmente
 - b) Salvar diretamente a planilha sem formatação
 - c) Utilizar ferramenta/terminal que permita registrar a saída em arquivo CSV (Correta)
 - d) Não é possível salvar
12. (Aberta Curta) Explique, em 1-2 linhas, por que comparar soluções com ajuda de IA requer atitude crítica.

(Gabarito Resumido: 1b, 2b, 3b, 4F, 5b, 7b, 8a, 10b, 11c. Abertas: avaliação qualitativa.)

APÊNDICE H: Questionário de Motivação (SMQ-II Adaptado)

(Escala Likert 1-5: 1=Discordo Totalmente; 5=Concordo Totalmente)

1. Tenho interesse em aprender mais sobre geração e armazenamento de hidrogênio.

2. Acredito que posso entender conceitos de eletrólise com atividades práticas.

3. Sinto-me confiante para usar microcontroladores em experimentos.

4. Acredito que este tema é relevante para minha vida/comunidade.

5. Gosto de trabalhar em projetos que envolvem tecnologia.

6. Sinto que posso melhorar soluções usando ferramentas digitais (sensores/IA).

7. Acredito que o que aprendo em laboratório pode ser aplicado em problemas sociais.

8. Tenho curiosidade em trabalhar com programação em blocos.

9. Prefiro atividades experienciais (práticas) a aulas expositivas sobre esse tema.

10. Considero importante discutir os impactos sociais/éticos das tecnologias que estudamos.

(Interpretação: 10-20 (baixa motivação), 21-35 (média), 36-50 (alta). Analisar mudança pré/pós).

APÊNDICE I: Roteiro de Entrevista Semiestruturada

(Selecionar estudantes representativos. Gravar, transcrever e realizar análise de conteúdo)

1. O que você aprendeu de novo sobre hidrogênio e eletrólise com esta sequência? (Conceitos, segurança).
2. Como a tecnologia (Arduino/Micro:bit) ajudou (ou atrapalhou) seu entendimento e trabalho? (Facilidades, limitações).
3. Conte sobre a experiência de trabalhar no projeto (PBL): o que foi mais desafiador? (Organização, colaboração, interação).
4. Como a interação com a IA influenciou suas ideias (melhorou, confundiu)? Dê um exemplo.
5. Na sua opinião, que impactos sociais a adoção do hidrogênio poderia trazer para sua comunidade? (Benefícios, riscos, equidade).
6. O que você mudaria na sequência para melhorar a aprendizagem (*learning*)? (Tempo, tecnologia, formato).

Apêndice J - Rubrica de Avaliação por Pares

1. Cumpriu o objetivo do projeto?

2. A evidência experimental foi convincente?

3. O protótipo parece seguro e bem construído?

4. A explicação foi clara e bem justificada?

5. O projeto realizado abordou os temas de Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente?

Apêndice K - Ficha de avaliação da apresentação (Professor)

Grupos	Conteúdo Técnico (0-5)	Uso de Evidências (0-5)	Considerações CTSA (0-5)	Clareza e Organização (0-5)
Grupo – 01				
Grupo – 02				
Grupo – 03				
Grupo – 04				

APÊNDICE L: Checklist de Segurança (Montagem)

- [] Sala ventilada (janelas abertas).
- [] Extintor visível e responsável informado.
- [] Tensão ≤ 6 V garantida (fontes seguras, ex: *power bank*).
- [] Óculos de proteção (EPI) para TODOS os membros do grupo.
- [] Instrumentos eletrônicos isolados e firmes (evitar curto-circuito).
- [] PROIBIDO coletar hidrogênio em recipientes fechados sem supervisão direta.
- [] Procedimento para desligamento rápido conhecido pelos alunos.

APÊNDICE M: Tabelas Avaliativas entre pares

Tabela 1 – Projeto 1 (Gerador Portátil + Hidrelétrica) – Grupo avaliador 2

Critério	Nota (1 a 5)	Comentário
Clareza do funcionamento	4	Explicaram bem o processo, mas faltou detalhar o armazenamento do hidrogênio.
Viabilidade técnica	3	A proposta parece possível, mas necessita de maior detalhamento dos materiais.
Segurança	3	Não foram apresentadas estratégias claras para o armazenamento seguro do hidrogênio.
Impacto social	5	A proposta apresenta alta relevância para comunidades com acesso limitado à energia.
Fundamentação científica	4	Os conceitos de eletrólise foram utilizados de forma adequada.

Tabela 1 – Projeto 2 (Carro a hidrogênio + Postos) – Grupo avaliador 2

Critério	Nota (1 a 5)	Comentário
Clareza do funcionamento	5	A explicação foi clara e bem organizada durante a apresentação.
Viabilidade técnica	3	A proposta envolve tecnologias complexas, o que pode dificultar sua implementação prática.
Segurança	4	Foram considerados aspectos de armazenamento, mas sem detalhamento aprofundado.
Impacto social	4	Contribui para a redução de impactos ambientais, mas depende de infraestrutura adequada.
Fundamentação científica	4	Houve boa articulação entre eletrólise e uso de energia solar.

APÊNDICE N: Esboços Conceituais dos estudantes