

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Plasma: O quarto estado da matéria – Propriedades, estimativas e aplicações para o cotidiano.

Henrique Reatto Porcel

Prof. Dr. Luiz Antonio Barreiro

Rio Claro - SP  
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

Henrique Reatto Porcel

Plasma: O quarto estado da matéria – Propriedades, estimativas e aplicações para o cotidiano.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Rio Claro - SP  
2016

530.44 Porcel, Henrique Reatto  
P833p Plasma : o quarto estado da matéria : propriedades,  
estimativas e aplicações para o cotidiano / Henrique Reatto  
Porcel. - Rio Claro, 2016  
44 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Física) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas

Orientador: Luiz Antonio Barreiro

1. Plasma (Gases ionizados). 2. Física do plasma. 3.  
Aplicações do plasma. I. Título.

Henrique Reatto Porcel

Plasma: O quarto estado da matéria – Propriedades, estimativas e aplicações para o cotidiano.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel ou Licenciado em Física.

Comissão Examinadora

Luiz Antonio Barreiro (orientador)

Makoto Yoshida

Alexandre Mesquita

Rio Claro, 21 de novembro de 2016.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente aos meus queridos pais, por todos os tipos de apoio que me deram, e também a confiança depositada em minha pessoa, por todas das minhas decisões, desde as mais simples, até as mais complexas.

A todos meus amigos de graduação, pelas várias noites acordados estudando para alguma matéria, até pelos dias que ficávamos “jogando” conversa fora, mas que em todos os casos, sendo muito construtivas para meu desenvolvimento pessoal e social.

Um carinho especial a minha amiga Laura Helena Pozzo, a qual em todos os momentos estive ao meu lado, me ajudando e em algumas vezes com grande cobrança para que fizesse este trabalho, portanto, sem ela, nada disso teria acontecido e provavelmente estaria no princípio da incerteza do que fazer em diversos momentos de minha graduação, incluindo o TCC. Que nossas longas conversas nunca acabem.

Agradeço também ao professor Luiz Antonio Barreiro, pelas dicas construtivas que foram dadas ao longo deste trabalho e graduação.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Departamento de Física da UNESP – Rio Claro, por todo o apoio, incentivo e conhecimento que puderam transmitir para minha pessoa, sei que, sem a ajuda dos professores, técnicos, secretárias e funcionários das mais diversas áreas e atividades deste ambiente, não teria conseguido chegar onde cheguei.

*“O único homem que está isento dos erros é aquele que não arrisca acertar.”*

Albert Einstein

## RESUMO

No trabalho a seguir, o leitor poderá encontrar um aglomerado de teorias e explicações sobre diversos assuntos relacionados a matéria, com enfoque no estudo do plasma. Como um trabalho de revisão, tem-se o intuito de guiar os leitores para trabalhos mais consistentes e vistos hoje em dia, como os mais corretos para a ciência e empresas. O trabalho é dividido em quatro capítulos, sendo que, cada um deles tem sua característica particular, tornando assim, um texto amplo e com potencial para atingir diversas áreas do conhecimento. Para os capítulos iniciais, as teorias tratadas se utilizarão de livros teóricos nas áreas da física dos estados da matéria e principalmente do plasma, dedicando breves comentários e explicações sobre estes temas.

A sequência do trabalho será dedicada a aplicação do plasma à indústria, sendo este focado em revisar artigos, os quais trazem a importância de se estudar e conhecer o quarto estado da matéria, com uma aplicação em especial, um processo de queima de materiais orgânicos, ou, pirólise plasmática. Por fim, este trabalho busca explicitar algumas questões lúdicas relacionadas ao ensino do plasma, tanto em níveis de ensino médio, quanto de ensino superior, revisando e propondo experimentos que possam ser realizados em casa e outros que possam ser realizados em conjunto com grupos de pesquisas ou universidades.

Tem-se então, neste trabalho, um texto com pontos já pesquisados, com a perspectiva de guiar o leitor para diversos outros trabalhos e artigos mais específicos da área que se deseja estudar.

**Palavras-chave:** física do plasma, aplicações do plasma, quarto estado da matéria, estados da matéria.

## **ABSTRACT**

In the following work, the reader will be able to find a cluster of theories and explanations on several subjects related to matter, with focus on the study of plasma. As a review work, it is intended to guide readers to work more consistent and seen today, as the most correct for science and business. The work is divided into four chapters, each of which has its own characteristic, making it a broad text with the potential to reach several areas of knowledge. For the initial chapters, the theories treated will be used of theoretical books in the areas of the physics of the states of the matter and mainly of the plasma, dedicating brief comments and explanations on these subjects.

The sequence of the work will be devoted to the application of plasma to the industry, which focuses on reviewing articles, which bring the importance of studying and knowing the fourth state of matter, with a particular application, a process of burning organic materials, Or, plasma pyrolysis. Finally, this work seeks to explain some playful issues related to plasma teaching, both at high school and higher levels, reviewing and proposing experiments that can be performed at home and others that can be carried out in conjunction with research groups or universities.

We have, in this work, a text with points already researched, with the perspective of guiding the reader to several other works and more specific articles of the area that one wishes to study.

**Keywords:** plasma physics, applications of plasma, fourth state of matter, states of matter.



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Comparação dos estados da matéria.

Figura 2: Diferença entre estruturas dos sólidos. A organização das moléculas varia no espaço.

Figura 3: Transições de estados físicos.

Figura 4: Tipos de plasma. Naturais e gerados em laboratórios.

Figura 5: Diversos formatos de lâmpadas fluorescentes.

Figura 6: Jatos de plasma.

Figura 7: Representação esquemática de um jato de plasma do tipo arco transferido.

Figura 8: Representação esquemática de um jato de plasma do tipo arco não transferido.

Figura 9: Representação esquemática para o método de aquecimento direto.

Figura 10: Representação esquemática para o método de processamento em duas camadas.

Figura 11: Tubo de Crooks desenvolvido por VENCESLAU (2015).

Figura 12: Globo de plasma.

Figura 13: Montagem experimental, protótipo do braço do Megaman.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Comparação dos valores de  $h$ .

Tabela 2: Comparativo entre métodos de geração de plasma.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 1: ESTADOS DA MATÉRIA.....	14
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Estados da Matéria.....	14
1.3 Estado Sólido.....	15
1.4 Estado Líquido.....	16
1.5 Estado Gasoso.....	16
1.6 Equações de Transformação.....	17
1.7 Breves Comentários.....	18
CAPÍTULO 2: PLASMA E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	19
2.1 Objetivos.....	19
2.2 O que é Plasma?.....	19
2.3 Análise do livro “ <i>Fundamentos da Teoria Eletromagnética</i> ”.....	20
2.3.1 Teoria do Equilíbrio.....	21
2.3.2 Teoria da Órbita.....	22
2.3.3 Teoria Hidromagnética.....	23
2.4 Análise do livro “ <i>Introduction to plasma physics</i> ”.....	26
2.5 Breves Comentários.....	27
CAPÍTULO 3: APLICAÇÕES DO PLASMA NA INDÚSTRIA.....	28
3.1 Objetivos.....	28
3.2 Aplicações.....	28
3.3 Pirólise Plasmática.....	32
3.4 Breves Comentários.....	34
CAPÍTULO 4: POSSIBILIDADES DIDÁTICAS.....	36
4.1 Objetivos.....	36
4.2 Experimentos.....	36
4.2.1 Experimento do Tubo de Crooks.....	37
4.2.2 Globo de Plasma.....	38

4.2.3 Personagens .....	39
4.3 Breves Comentários.....	41
CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## INTRODUÇÃO

No presente trabalho, pretendemos apresentar uma revisão sobre o conhecido, mas não tão bem compreendido plasma, ou, o quarto estado da matéria. Apresentaremos curiosidades, aplicações e breves conceitos acerca deste tema, o qual ainda é muito explorado pela Física. De um modo mais geral, o trabalho poderá ter seu desenvolvimento visto em quatro frentes, ou capítulos. O primeiro será dedicado a uma breve revisão e explicação dos estados da matéria (sólido, líquido e gasoso), utilizando como principal exemplo a água, deixando simples seu entendimento. Seguindo nosso trabalho, o capítulo será dedicado exclusivamente à discussão do tema proposto, ou seja, será dedicada a revisão de dois livros, comentando diversos pontos, com intuito de ajudar futuros leitores desses livros, facilitando a compreensão das teorias citadas nos mesmos. No terceiro capítulo, propomos apresentar as aplicações do plasma na indústria, citando lugares onde o mesmo é utilizado, porém, o foco deste capítulo será o de analisar e explicar o processo conhecido por pirólise plasmática, o qual promete ter um futuro promissor na geração de energia elétrica e/ ou ajudar na redução dos famigerados “lixões” ou aterros sanitários espalhados pelas cidades. Já o capítulo quatro tem como foco, apresentar curiosidades do assunto principal do trabalho, utilizando também uma tese de mestrado do aluno Gustavo Mulim Venceslau[1] da Universidade de Brasília, onde ele propõe atividades, com experimentos relacionados a plasma em salas de aula de ensino médio, portanto, mostrando uma visão lúdica do ensino de plasma. O último capítulo será dedicado a síntese do que foi desenvolvido por todo o trabalho.

## OBJETIVOS

O trabalho tem vários objetivos, tornando assim, um projeto de revisão e junção de diversos pontos sobre o estudo da matéria propriamente dita, ou seja, trazendo as ideias por trás dos estados físicos (sólido, líquido, gasoso e plasma).

Como, existem diversos pontos a serem tratados em nosso trabalho, podemos dividi-lo em alguns capítulos, cada qual trará uma informação específica do tema principal.

1. Revisão e breves comentários sobre as propriedades físicas da matéria[2],
2. Tratamento da física do plasma a partir de dois livros,
3. Aplicações do plasma à indústria,
4. Possibilidades didáticas para o ensino de plasma nas diversas instituições.

Com isso, podemos definir a direção que nosso trabalho irá tomar ao longo dos capítulos.

## CAPÍTULO 1: ESTADOS DA MATÉRIA.

### 1.1 Objetivos.

Neste capítulo, apresentamos em caráter introdutório as propriedades físicas da matéria, percorrendo brevemente, em escala macroscópica o que é um sólido, líquido e um gás, como ocorre a transformação de estados e quais as principais equações de transformação.

### 1.2 Estados da Matéria.

Para tanto, consideremos como exemplo a água. Se estivermos numa região litorânea, a certas condições de temperatura e pressão (CNT), é conhecido que a água apresenta-se nos seguintes estados físicos, conforme a figura 1 abaixo,



Figura 1: Comparação dos estados da matéria. Adaptado de

<http://www.playrific.com/images/media/vimeomisc12watersong.jpg>. Acessado por último em 16/11/16.

Nos casos de temperaturas  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}=273\text{K}$  e  $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}=373\text{K}$  a água sofrerá transições de fase.

É possível também que em certas altitudes, mesmo que a temperatura atinja os  $100^{\circ}\text{C}$ , o que já seria necessário estar transitando para o estado gasoso, a água ainda esteja em estado

líquido, o mesmo efeito pode ser observado à 0° C, ou seja, ao invés de estar na fase sólida, a água estará na fase líquida.

### 1.3 Estado Sólido.

Os materiais que se encontram no estado sólido, podem ser classificados como materiais amorfos ou cristalinos (figura 2)[3]. Amorfos, quando sua estrutura cristalina é irregular e cristalinos quando sua estrutura apresenta certa regularidade das moléculas.

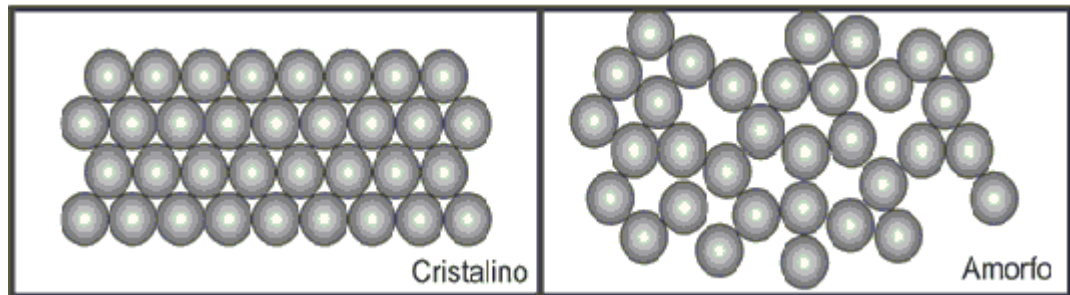


Figura 2: Diferença entre estruturas dos sólidos. A organização das moléculas varia no espaço.

Fonte: [http://www.vdl.ufc.br/solar/aula\\_link/lquim/Q\\_a\\_Z/quimica\\_materiais/aula\\_01/imagens/04/01.gif](http://www.vdl.ufc.br/solar/aula_link/lquim/Q_a_Z/quimica_materiais/aula_01/imagens/04/01.gif).

Acessado por último em 16/11/16.

Essa estrutura se deve à baixa energia de cinética das moléculas do material, isso, tem como consequência, deixar todas os elementos da estrutura relativamente próximos uns dos outros, ou em outras palavras, nos pontos de equilíbrio. O baixo valor da energia tem como consequência, tornar possível o arranjo do material nestes formatos e que, caso ela se torne maior, ou seja, o arranjo comece a receber calor, o processo de aquecimento tornará possível a transição de fase ou mudança de estado, fazendo assim com que o material que está com a configuração de um estado sólido, possa passar para outra fase (líquida ou gasosa).

O estado sólido apresenta também certas características marcantes, tais como resistência a impacto; elasticidade ou capacidade do sólido deformar-se e retornar ao estado inicial; fragilidade, o qual mostra a facilidade com que o material pode se romper (ou quebrar); entre outras.



Estas, ajudam a caracterizar cada elemento, ajudando assim na compreensão da natureza e dos materiais criados em laboratório.

### **1.4 Estado Líquido.**

Neste caso, as partículas já receberam certa energia térmica e podem transitar de um estado menos energético para outro com maior energia, ou seja, podem passar do sólido para o líquido. Um exemplo, que pode ser visto diariamente, é um bloco de gelo dentro de um copo com refrigerante, ou qualquer outro líquido, pode se observar que o gelo começará a derreter e finalmente irá tornar-se água líquida.

Deste modo, os líquidos também apresentam algumas características próprias, as quais, tem a mesma função das qualidades dos sólidos, ou seja, definir e caracterizá-los. Algumas destas características são a capilaridade, a qual é a capacidade de um líquido de ser absorvido por outras superfícies; tensão superficial, a qual é uma camada na superfície dos líquidos que funciona como uma membrana elástica; viscosidade, a que diz sobre a velocidade de escoamento de um líquido; entre outras.

Algumas curiosidades sobre este estado, é que, o planeta Terra tem em sua camada geológica mais externa, a crosta terrestre, aproximadamente 70% de água[4]. Abrindo espaço para comentários sobre a preservação do planeta Terra em nosso trabalho, devemos nos importar sempre com o tratamento, reutilização e cuidados com a água, a qual é a “matéria prima” essencial para existência das diversas formas de vida existentes.

### **1.5 Estado Gasoso.**

Aqui, temos por fim, o estado em que as partículas estão com alta energia cinética. Conforme o líquido continua a receber calor, este, por sua vez, receberá quantidades maiores de energia térmica e conseqüentemente seus átomos deverão ficar demasiadamente agitados, ou com maior amplitude de oscilação e conseqüentemente, ficarão mais distantes uns dos outros, onde, podem tomar o formato da superfície em que estiverem, ou mesmo, difundir-se pelo ambiente. Deste modo, origina-se o que hoje é conhecido, entendido e tratado como estado gasoso ou, simplesmente gás.

Seguindo o mesmo formato das seções anteriores, os gases também apresentam diversas propriedades, as quais são viscosidade; compressibilidade, que é a capacidade de um gás ser confinado em certos objetos, como por exemplo, o botijão de gás; entre outras.

Temos então, que para o estado gasoso, as moléculas comportam-se de modo estocástico (aleatório), o que significa que as partículas podem movimentar-se para qualquer direção e sentido.

### 1.6 Equações de Transformação.

As equações que descrevem as transformações de estado, são dadas por,

$$Q = mc \Delta T \quad (1)$$

e

$$Q = mL, \quad (2)$$

onde,

- $m$  = massa,
- $Q$  = quantidade de calor,
- $c$  = calor específico (específico de cada material),
- $L$  = calor latente, indica variação de estado (específico de cada material),
- $\Delta T$  = variação da temperatura.

A equação (1) traz a ideia da variação da temperatura ocorrendo apenas em um estado, sem a interação entre os demais.

Já, a equação (2) tem a ideia da mudança de fase, com auxílio da figura 3 abaixo, é possível notar que, quando o material está transitando de fase, a sua temperatura se mantém constante até que todo o material aquecido (ou resfriado) tenha suas partículas em outro estado. É notado isso nas retas constantes, as quais, estão indicadas por  $S+L$  e  $L+G$ .

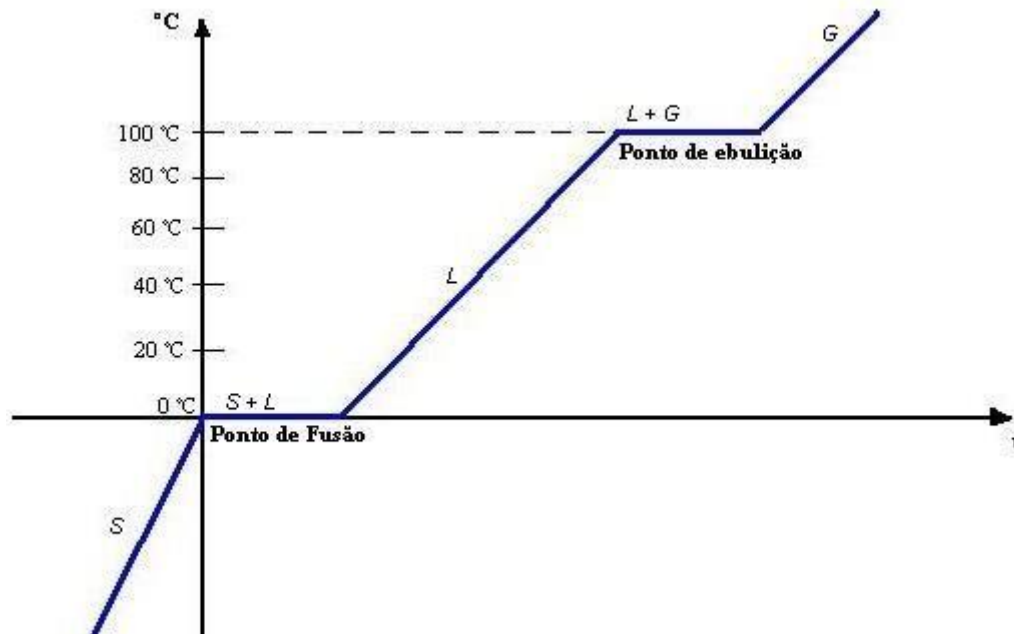


Figura 3: Transições de estado físico. S indica sólido, L indica líquido e G indica gasoso. O eixo das ordenadas (eixo y) indica valores para temperatura e o eixo das abscissas (eixo x) indica os possíveis estados para a água com o passar do tempo. Fonte:

[http://www.soq.com.br/conteudos/em/introducao/index\\_clip\\_image017.jpg](http://www.soq.com.br/conteudos/em/introducao/index_clip_image017.jpg). Acessado por último em 16/11/16.

Tem-se a grande importância destas equações para tratamentos de sistemas, aos quais, é desejado conhecer algumas das propriedades por elas trabalhadas.

### 1.7 Breves comentários.

Portanto, foi tratado até aqui, as três formas de se encontrar a matéria no cotidiano, as quais, podem ser observadas de diversas formas. Também, este capítulo trouxe a ideia de como são feitas as mudanças de estados físicos a partir do exemplo da molécula de água, levando a discussão até as equações de transformação e de seu uso.

## **CAPÍTULO 2: PLASMA E SUAS CARACTERÍSTICAS.**

### **2.1 Objetivos.**

Este capítulo está separado em três partes, sendo comentando onde o plasma pode ser encontrado e explicado a ideia do que é o plasma. Após essa demonstração geral, será aberta uma discussão de dois livros que tratam sobre o assunto: Fundamentos do Eletromagnetismo[5] e Introduction to Plasma Physics[6], com intuito de deixar claro alguns pontos dos livros, exemplificando algumas equações, com intuito de guiar outros estudantes caso tenham interesse ou vão começar a estudar este assunto.

### **2.2 O que é Plasma?**

Como apresentado no primeiro capítulo deste trabalho, a matéria encontra-se nas formas de sólido, líquido ou gás, sendo, apenas uma questão energética que as diferencia. O mesmo ocorre para o plasma, pois, caso o gás continue a ser aquecido, este irá ionizar-se (perder elétrons devido ao calor fornecido) e sendo assim, tornar-se uma “sopa de elétrons e íons positivos”. Esta “sopa de elétrons e íons” é conhecida por plasma, e a mesma tem diversas propriedades, algumas das quais são estudadas até hoje por diversos grupos de cientistas. Além de tudo, é conhecido que a matéria hadrônica (a que apresenta massa) no universo, está composta em 99% no estado de plasma[6], ou seja, fugindo do senso comum de que, grande parte do que é observado compõe o universo todo.

Algumas das características são a possibilidade de responder a campos elétricos e magnéticos, podendo assim, serem trabalhados de diversas formas na indústria e em pesquisas, as quais serão comentadas adiante.

O plasma pode ser encontrado na natureza e ser gerado em laboratórios, com auxílio de geradores de altas tensões elétricas ou campos magnéticos, a figura 4 abaixo traduz esta frase de forma simples.



Figura 4: Tipos de plasma. Naturais e gerados em laboratório. Fonte:

[http://4.bp.blogspot.com/\\_TlxcYrFukiE/SdBlwRTgTOI/AAAAAAAAAbQ/NjVjf5MUJBY/s400/tipos\\_1.jpg](http://4.bp.blogspot.com/_TlxcYrFukiE/SdBlwRTgTOI/AAAAAAAAAbQ/NjVjf5MUJBY/s400/tipos_1.jpg).

Acessado por último em 16/11/16.

Com isso, é possível notar que, para um gás se tornar um plasma, ele precisa no mínimo estar a altas temperaturas e com grandes quantidades de partículas.

### 2.3 Análise do livro “Fundamentos da Teoria Eletromagnética”.

Este livro trás três definições que buscam explicar como um plasma pode ser definido, segue abaixo breves comentários sobre cada uma.

A *teoria do equilíbrio* diz que a colisão das partículas devem ser suficientes para manter a velocidade de distribuição de Maxwell-Boltzmann, a qual diz que cada partícula não apresenta a mesma velocidade, porém a velocidade média das partículas apresenta um valor constante. Já a *teoria da órbita* trata do movimento dos íons e elétrons sob ação de campos elétricos e magnéticos. Nesta concepção a colisão das partículas não é crucial para caracterização do plasma. Por fim, a *formulação hidromagnética*, que se favorece do eletromagnetismo e das equações do movimento do fluido clássicas. Esta última tem uma descrição macroscópica do plasma, dando partida a estudos sobre as oscilações do plasma. A seguir, iremos apresentar um condensado dos pontos principais de cada teoria.

### 2.3.1 Teoria do Equilíbrio.

Esta teoria cita que uma das principais características do plasma é a sua tendência em permanecer eletricamente neutro, pois no âmbito macroscópico, as cargas positivas e negativas se equilibram, e mesmo que o plasma seja submetido a um campo elétrico externo, o sistema como um todo tenderá a entrar em equilíbrio. O que irá definir se o gás ionizado é um plasma ou não, é o valor conhecido por, distância de blindagem de Debye ( $h$ ), dada abaixo por,

$$h = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{2N_0 e^2}}, \quad (3)$$

sabendo que,

- $k$  = Constante de Boltzmann,
- $T$  = Temperatura,
- $N_0$  = Densidade eletrônica,
- $e$  = Carga elétrica,
- $\epsilon_0$  = Constante de permissividade no vácuo.

Assim, o gás ionizado será considerado um plasma quando o valor de  $h$  for pequeno comparado com as outras questões físicas de interesse, no caso temperatura e densidade eletrônica. Seguindo a tabela 1 abaixo, pode-se notar a diferença entre as grandezas.

<b>Plasma</b>	<b>Densidade</b> $N_0(\text{m}^{-3})$	<b>Temperatura</b> <b>de elétrons</b> $T(\text{K})$	<b>Campo</b> <b>magnético</b> $B(\text{T})$	<b>Comprimento</b> <b>de Debye</b> $h(\text{m})$
<b>Descarga em gás</b>	$10^{16}$	$10^4$	--	$10^{-4}$
<b>Tokamak</b>	$10^{20}$	$10^8$	10	$10^{-4}$
<b>Ionosfera</b>	$10^{12}$	$10^8$	$10^{-5}$	$10^{-3}$
<b>Magnetosfera</b>	$10^7$	$10^7$	$10^{-8}$	$10^2$
<b>Núcleo solar</b>	$10^{32}$	$10^7$	--	$10^{-11}$

Tabela 1: Comparação dos valores de  $h$ . Adaptado de

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento\\_de\\_Debye](https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento_de_Debye)[7]. Acessado por último em 16/11/16.

Segundo esta teoria, os autores exemplificam como podem ser feitas as medidas de temperatura do plasma gerado em laboratório, tornando assim, outra forma de caracterização do plasma. Este tipo de medida é feito por uma sonda imersa no gás, e com as colisões dos íons (os quais apresentam certos valores para energias cinéticas) com a sonda, pode-se determinar a temperatura.

Esta ideia de sonda foi desenvolvida por Langmuir e Mott-Smith. Como o plasma pode ser caracterizado segundo uma distribuição de Maxwell-Boltzman, ele pode ser descrito como uma função da temperatura. Sabendo disso, Langmuir e Mott-Smith desenvolveram uma aparelho que pudesse medir o valor da temperatura. O aparelho é uma sonda, que a partir das colisões dos íons com este medidor, pode-se identificar o valor de nossa variável[5].

### 2.3.2 Teoria da Órbita.

Para o começo do estudo das órbitas das partículas dos elétrons e íons livres, a soma das forças magnética e elétrica sobre uma carga é dada por,

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (4)$$

onde,

- $\vec{F}$  = Força total aplicada no sistema,
- $\vec{E}$  = Campo elétrico aplicado,
- $\vec{B}$  = Campo magnético aplicado,
- $\vec{v}$  = Velocidade da partícula,
- $q$  = carga elétrica.

Com a equação (4) acima, podem ser iniciados os cálculos, onde as equações que descreverão as órbitas podem ser encontradas. Outro ponto que favorece o cálculo das órbitas é a escolha de campos elétricos e magnéticos relativamente simples, porém, com potencial para generalização de outros campos mais complexos.

Então, seguindo o que foi citado anteriormente, a proposta de três casos é realizada. O tratamento pode ser realizado a partir de campos elétricos mais simples ( $\vec{E} = \mathbf{0}$ ), expandindo à campos elétricos e magnéticos uniformes e perpendiculares até o último caso em que apesar do campo  $\vec{E} = \mathbf{0}$ , o campo magnético  $\vec{B}$ ; é uma função dependente do espaço. Em todos os casos, o tratamento das equações se fazem para encontrar a velocidades das partículas do plasma e quais as órbitas que elas descrevem.

Por fim, a teoria diz que, para um campo magnético que varie lentamente, existe a possibilidade de confinar o plasma, ou seja, as partículas tem uma direção ordenada à seguir, e não de modo aleatório. Esta propriedade de um campo aplicado sob o plasma, tornando o sentido e direção das partículas o mesmo, é conhecida por *espelho magnético*.

### 2.3.3 Teoria Hidromagnética.

Esta teoria, busca descrever as propriedades das partículas do plasma, pensando o gás como um fluido clássico, que permita a condução de correntes elétricas. Com isso, faz-se necessário a utilização das equações da hidrodinâmica e eletromagnéticas clássicas (equações de Maxwell). Deste modo, através dela, é caracterizado que o plasma, devido a alta quantidade de partículas



ionizadas, o gás pode ser considerado um condutor infinito (o que permite a passagem de correntes elétricas sem resistência, ou com perdas energéticas quase nulas). Outra generalização, a qual vem da teoria hidrodinâmica, é o equilíbrio das pressões (magnéticas e do fluido), ou seja, o seu valor é o mesmo para todo o sistema, implicando assim, em um valor constante para a força magnética.

Existe um efeito conhecido por *efeito pinch*, que pode ser definido como uma tensão elétrica de alta corrente, passando através do plasma, gera uma mudança na área do plasma, ou seja, a interação de uma corrente elétrica (cargas elétricas em movimento) com seu campo magnético, faz com que o plasma se comprima, gerando assim, locais onde o raio da região em que o plasma se encontra é menor.

Já, na seção posterior, comenta-se sob quais possibilidades pode-se confinar um plasma, dando início a discussão sobre os famosos TOKAMAKS, os quais são, geradores de energia elétrica a partir da fusão nuclear, reação que acontece diariamente na superfície da estrela à qual rodeamos todos os dias, o sol. Para que haja um plasma confinado por um campo magnético, faz-se necessário uma constante  $\beta$ , a qual é a razão entre as pressões cinéticas (associadas ao movimento) com a pressão total (magnética mais cinética),

$$\beta = \frac{NkT}{[B^2/2\mu_0 + NkT]}, \quad (5)$$

onde,

- $N$  = Densidade de íons mais elétrons, ou seja, densidade total,
- $k$  = Constante de Boltzmann,
- $T$  = Temperatura,
- $B$  = Campo magnético,
- $\mu_0$  = Permeabilidade magnética do vácuo.

Para o caso do TOKAMAK, o valor de  $\beta$  deve ser baixo, o que significa que a componente de pressão magnética é mais intensa, mostrando que, para que o gás seja confinado naquela seção, ele deve sofrer a ação de um campo magnética de alta intensidade.

Sabe-se que existem diversos tipos de ondas em um plasma[8], as quais auxiliam no aquecimento do mesmo, sendo que, nesta referência, alguns dos tipos são trazidos para

exemplificar esses processos. São os tipos tratados no livro, *ondas eletrostáticas e ondas hidromagnéticas ou ondas Alfvén*.

Para as ondas eletrostáticas, existem dois tipos de caracterização, as ondas de alta frequência para os elétrons, tornando-os mais rápidos que os íons, e o das oscilações dos íons, as quais são lentas, fazendo com que os elétrons distruem-se no entorno dos íons. O livro trata da primeira caracterização, onde os elétrons apresentam velocidades altas, e desta maneira, gerando um campo elétrico.

Pode-se determinar a partir destas ideias, a frequência de oscilação do plasma  $f_p$ , o qual é dado pela equação 6 abaixo,

$$f_p = \omega_p / 2\pi, \quad (6)$$

onde, tem-se que,

$$\omega_p = \left( \frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

onde,

- $\omega_p$  = velocidade da onda,
- $m_e$  = massa do elétron.

Para o segundo caso, as ondas Alfvén, o tratamento é feito a partir de um plasma imerso em um campo magnético constante.

Como na maioria dos casos, o livro apresenta de forma breve e geral o assunto e chega rapidamente nas deduções matemáticas envolvendo as teorias que tratam do plasma. Faz-se necessário aqui apenas mais um comentário, o da grande diversidade de ondas geradas por campos elétricos e magnéticos em um plasma, pois, como citado, estes são apenas alguns casos de ondas presentes nos plasmas, pois seu processo de aquecimento ainda, hoje em dia é um grande desafio que os cientistas buscam responder e compreender da melhor forma possível[8], por isso, a importância dos estudos nesta área da Física, pois, quanto maior o conhecimento o ser humano adquirir, mais sofisticadas e melhor desenvolvidas tornam as tecnologias do surgirão destes estudos, tornando assim, o universo, um lugar um pouco mais conhecido e entendido.

## 2.4 Análise do livro “*Introduction to Plasma Physics*”.

Este livro, tem sua concepção voltada única e exclusivamente para o estudo de diversas propriedades acerca do plasma, com isso, o livro não trás algo tão novo do que encontrado no outro livro analisado, de modo que, em uma comparação, cada livro tem sua ideia principal de porque ser escrito, e o que foi resumido em um capítulo no livro de Reitz[5], este aqui apresenta os conceitos de maneira completa e concisa.

Dito isso, traremos aqui apenas as questões adicionais tratadas acerca da caracterização formal do plasma. Deste modo, para que um gás seja considerado um plasma ele deve obdecer as seguintes condições abaixo.

A primeira condição, conhecida como Equação de Saha (equação 8), busca exemplificar o grau de ionização de um gás, tem-se então,

$$\frac{n_i}{n_n} = 2,4 \cdot 10^5 \cdot \exp(-U_i/kT), \quad (8)$$

onde,

- $n_i$  = densidade de átomos ionizados,
- $n_n$  = densidade de átomos neutros,
- $U_i$  = energia de ionização do gás.

Sendo assim, conforme ocorre o aumento da temperatura, o valor da relação  $n_i/n_n$  aumenta, conseqüentemente o número de átomos ionizados torna-se maior e desta maneira, o plasma fica caracterizado, entretanto, o autor não cita nada sobre quais os valores aceitáveis para que possa ser aceito e considerado um plasma.

Já o segundo ponto que caracteriza o plasma, faz-se necessário o uso da frase:

“Um plasma é um gás quasineutro de partículas carregadas e neutras, apresentando um comportamento coletivo”.

Comportamento coletivo porque, segue-se da ideia da soma de todas as partículas da região onde o plasma está inserido. Para a quasi neutralidade, tem-se a equação de distância de blindagem de Debye, vista anteriormente. Nela, existe o termo da densidade total de partículas que compõem o plasma,  $N_0$  e as densidades de cada partícula, para os elétrons,  $n_e$  e para os íons,

$n_i$ . Desde que, todas estas variáveis sejam, aproximadamente iguais, teremos o gás caracterizado por plasma.

Basicamente, em breve análise, pode-se dizer que estas são as principais diferenças, entretanto, o livro, como já dito, é muito mais completo em pontos matemáticos e explicações das teorias que englobam este assunto.

## **2.5 Breves comentários.**

Seguiu-se neste capítulo, um resumo das ideias trazidas dos livros que tratam do tema principal do trabalho, o plasma. Características, algumas equações e explicações foram especificadas e explanadas, para que, alunos e profissionais de diversas áreas possam ler e compreender quais as ideias através do quarto estado da matéria.

## **CAPÍTULO 3: APLICAÇÕES DO PLASMA NA INDÚSTRIA.**

### **3.1 Objetivos.**

Este capítulo começa mostrando para o leitor as aplicações do plasma na indústria. Comentado sobre as diversas aplicações, será listada uma específica, Pirólise Plasmática, e, traremos aqui, a explicação de como funciona e qual a necessidade de sua pesquisa atualmente em grandes centros de tecnologia.

### **3.2 Aplicações.**

Nesta seção, trabalha-se de maneira breve a importância que as diversas aplicações do plasma tem para a vida na Terra. Para começar com os exemplos, pode-se citar um objeto que nos dias atuais, torna-se muito complexo de se viver sem, ou seja, as lâmpadas fluorescentes[9]. Graças a invenção das lâmpadas, a civilização pode aproveitar mais o tempo que os dias oferecem e conseqüentemente desenvolver diversas atividades, as quais antes só eram possíveis de se fazer enquanto havia a presença do sol.

O aparato das lâmpadas fluorescentes é visto na figura 6 abaixo. É composto por uma mistura de gases, geralmente argônio e vapor de mercúrio sob baixa pressão, postos dentro de um tubo de vidro com dois eletrodos de cada lado. Pela aplicação de certa tensão elétrica neste gás, o mesmo permite a passagem de corrente elétrica, já esta corrente tem duas principais funções no gás, o de ionizá-lo e excitá-lo. Apenas com a ionização, permitindo a existência cargas livres (elétrons e íons livres, ou seja, plasma), é que a passagem da corrente será permitida e a excitação, faz com que os elétrons ganhem energia, e quando os mesmos perderem essas energias, ela será emitida em forma de luz, deste modo, iluminando os ambientes.



Figura 5: Diversos formatos de lâmpadas fluorescentes. Fonte: <https://recilux.files.wordpress.com/2015/02/lampadas-fluorescentes.jpg>. Acessado por último em 16/11/16.

Uma segunda aplicação, são as empresas que aplicam cortes em chapas metálicas utilizando tochas de plasma[10]. Com essa tecnologia, cortes de altíssima precisão e qualidade podem ser feitos, pois, como são jatos pontuais de plasma (figura 6), não existe tanto impacto ao resto do material a não ser no ponto de contato entre gás e o material.



Figura 6: Jato de plasma. Fonte: <https://web.fe.up.pt/~jotace/gtresiduos/plasmapirolise.htm>. Acessado por último em 16/11/16.

Essas tochas são geradas, em sua grande maioria, de duas formas, *arco transferido* (figura 7) e *arco não transferido* (figura 8).

O método do *arco transferido* consiste em gerar o arco de plasma pela aproximação do bucal com o material a ser processado, sendo que, caso o bucal seja afastado do material a ser usinado o arco irá se extinguir e deixará de ionizar o ar e a tocha será apagada. Este processo geralmente opera com baixa vazão de gás e correntes elétricas de altos valores.

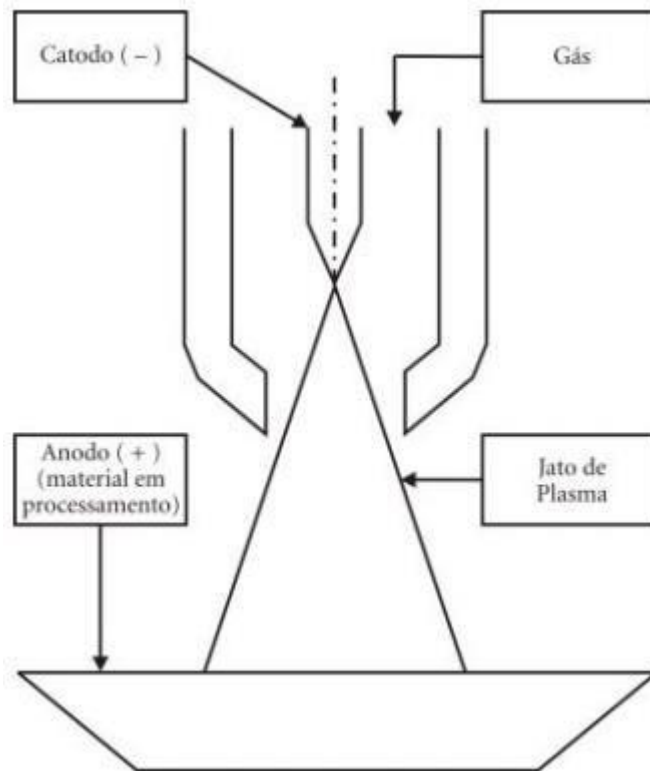


Figura 7: Representação esquemática de um jato de plasma do tipo arco transferido. Retirado de [10].

O método para o *arco não transferido* é basicamente igual ao anterior, exceto pelo motivo de que o circuito fecha-se entre as próprias paredes do jato, inviabilizando a passagem de corrente elétrica no material trabalhado. Já para este método, é necessário grande vazão de gás e altas tensões.

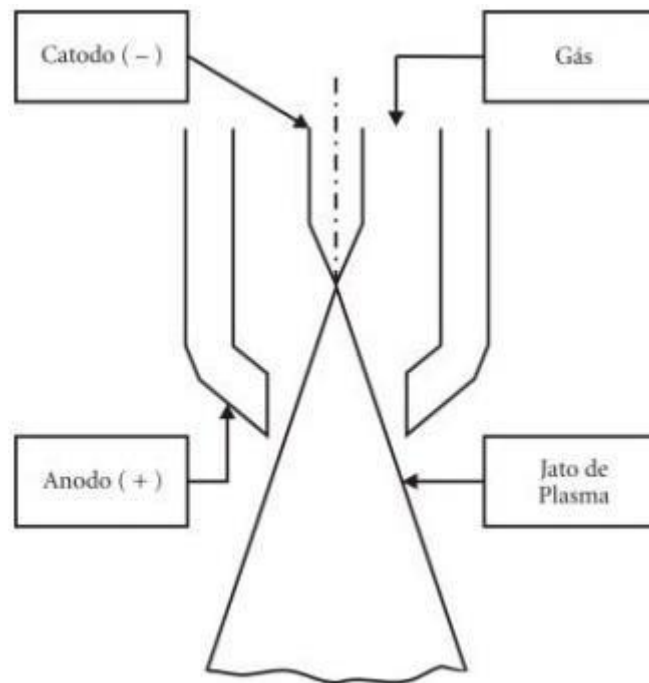


Figura 8: Representação esquemática de um jato de plasma do tipo arco não transferido. Retirado de [10].

A tabela 2 abaixo mostra com detalhes o que foi citado acima, onde, para cada tipo de arco faz-se necessário certa quantidade de tensão, corrente e gás.

	Arco não transferido	Arco transferido
Consumo de gás	Alto	Baixo
Nível de potência	<30MW	<40MW
Corrente	<2.000A	<100.000A
Tensão	<6.000V	<1.000V

Tabela 2: Comparativo entre métodos de geração de plasma. Adaptada de [10].

O corte de materiais metálicos tem serventia para diversas áreas, como construção, desenvolvimento de automóveis e tantas outras em que haja a necessidade de cortes precisos. Essas duas, são talvez, as mais conhecidas e consolidadas, porém, diversas outras áreas também



fazem uso do plasma, como laboratórios de pesquisa, áreas ambientais e diversas outras, mostrando assim, sua ampla aplicação e utilização pela sociedade. Porém, ainda com diversas aplicações, pesquisas na área da física do plasma também são, em grande parte, um mistério para os cientistas, pois, devido a toda sua dificuldade de caracterização, visto as diversas teorias citada no capítulo 2, até dificuldades de manipulação, onde, geralmente apenas materiais de alto custo podem trabalhar com o mesmo. Exemplo disso são os TOKAMAKS[5], o qual já foi comentado anteriormente. os quais são, geradores de energia elétrica a partir da fusão nuclear, reação que acontece diariamente na superfície da estrela à qual rodeamos todos os dias, o sol.

### **3.3 Pirólise Plasmática.**

Antes de ser explicado como este processo funciona, queremos apontar a importância de uma pesquisa desta natureza. Na atualidade, existem diversos problemas ambientais e sociais, os quais, se não forem resolvidos, ou ao menos remediados, podem comprometer a vida no planeta de diversas maneiras.

Alguns destes problemas, tem caráter ambiental, ou seja, os famosos aterros sanitários e/ou “lixões” precisam e devem receber tratamento adequado, pois deixar lixo espalhado ao céu aberto, ou até mesmo soterrado não só pode, como gera diversos problemas para a região onde estes estão inseridos[11]. Com essa premissa de ajudar e prevenir o futuro para as novas gerações, inclusive a atual, grupos de cientistas propuseram um novo método para combater este problema, o qual é denominado *Processo de Pirólise Plasmática*[12].

Este processo, relativamente novo, tem a premissa de resolver, ou ao menos conter o impacto que o ser humano está causando ao meio ambiente.

O mesmo é baseado na seguinte ideia, queimar matéria orgânica poluente, a fim de produzir resíduos não tóxicos. Essa queima deverá ser feita por um jato de plasma, a temperaturas elevadas, da ordem de 10.000 K, e com toda energia térmica aplicada no material, ele se desintegraria e o produto final deste processo irá ser um resíduo não tóxico e que ocupe um espaço menor que o anterior.

Contudo, existem duas maneiras de se fazer esta queima de matéria orgânica, as quais são: *Aquecimento direto e Processamento em duas câmaras*.

Como o próprio nome induz a se pensar, o aquecimento direto (figura 9) consiste em ajustar o foco do jato de plasma no material a ser trabalhado e com toda a energia incidindo,

ocorrerá, de imediato a dissociação das moléculas dos resíduos, modificando assim suas estruturas químicas e tornando-se algo menos agressivo a natureza.

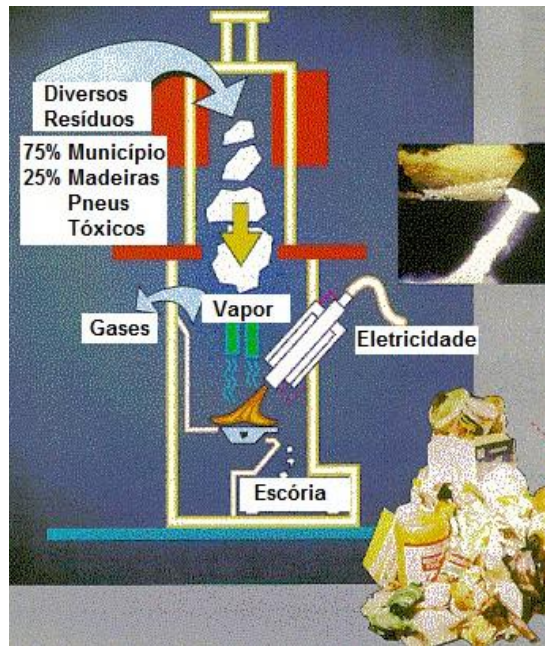


Figura 9: Representação esquemática para o processo de aquecimento direto. Escória é o termo dado ao material resultante do processo de queima. Adaptado de <https://web.fe.up.pt/~jotace/gtresiduos/plasmapirolise.htm>. Acessado por último em 16/11/16.

Já, o segundo método é feito em duas partes, a primeira de gaseificação da matéria orgânica (lado esquerdo da figura 10 abaixo), e este gás, ainda tóxico, deve ir para a segunda câmara, onde ali será incinerado pelo plasma e, novamente a dissociação das moléculas ocorrerá, e por fim, este novo gás aquecido poderá ter diversas finalidades, dependendo qual o foco da empresa.

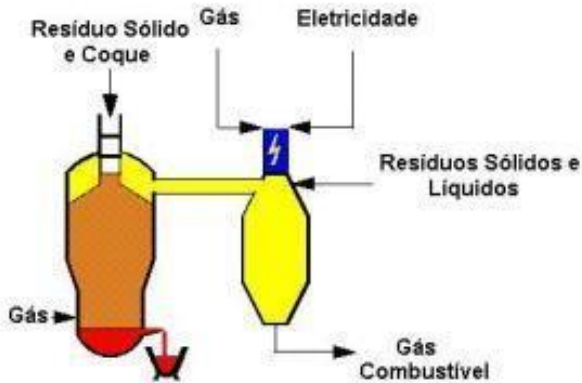


Figura 10: Representação esquemática para o método de aquecimento de processamento em duas camadas. Fonte: <https://web.fe.up.pt/~jotace/gtresiduos/plasmapirolise.htm>. Acessado por último em 16/11/16.

Portanto, a ideia, relativamente simples implica em algumas questões sobre os gases gerados e a energia utilizada. Como comentado, o gás gerado pela queima apresenta características, como, alto valor energético e toxicidade, sendo assim, indispensável para as empresas que trabalham com esta tecnologia, filtros que possam fazer a limpeza e/ ou purificação dos gases, para, quando despejados na atmosfera não contribuam com a poluição. Contudo, devido a grande quantidade de calor adquirida pelo processo de incineração e aquecimento, este gás pode servir tanto para aquecimento de caldeiras, quanto para geração de energia elétrica em termoelétricas, tornando assim, que para grandes centros industriais, matrizes com este método de geração de energia sejam de altíssima importância.

### 3.4 Breves comentários.

Neste capítulo, foi mostrado as diversas áreas em que o uso do plasma na indústria se faz necessário e eficiente.

Como dito anteriormente, 99% da matéria hadrônica no universo está em estado de plasma[6], por isso, processos que o utilizam como princípio ativo para ocorrer as reações que deseja-se são, no mínimo, “justas” com a natureza. Comentando sobre a natureza, projetos que visam a sua conservação e restauração fazem o uso também do famigerado quarto estado da

matéria, o qual é denominado por *pirólise plasmática*, este, sem dúvida, apresenta hoje em dia fundamental importância em diversos aspectos, principalmente, sendo ele o precursor da ideia deste trabalho.

Por fim, ainda hoje diversas pesquisas na área do plasma são desenvolvidas, principalmente nos conhecidos TOKAMAKS, os quais, são para o futuro, a mais promissora fonte de geração de energia elétrica.

## **CAPÍTULO 4: POSSIBILIDADES DIDÁTICAS.**

### **4.1 Objetivos.**

Com interesse didático, este capítulo apresenta uma junção de várias curiosidades do tema do trabalho, buscando apresentar personagens como guias para o estudo, exemplificação ou motivação para o estudo do tema, auxiliando o que foi desenvolvido em aula, do mesmo modo buscando experimentos para guiar novos estudos e/ ou fixar os conhecimentos já vistos. Também contará com a análise do trabalho de mestrado de Gustavo Mulim Venceslau [1] intitulado “Física de Plasma no Ensino Médio”, provavelmente sendo um dos primeiros trabalhos dessa dimensão no ensino médio.

### **4.2 Experimentos.**

Para grande parte da população, desenvolver experimentos pode ser algo complicado, cansativo e em algumas ocasiões, ter um alto custo monetário, por isso, nesta seção, traremos algumas atividades de baixo custo e de fácil acesso à todos que tem interesse e queiram aprender e possivelmente ensinar os alunos das escolas públicas e privadas, elucidando um conhecimento que muitas vezes é desprezado nas escolas. Os experimentos que traremos nesta seção fazem parte do trabalho de VENCESLAU (2015) e de outros sites conhecidos da internet[13].

#### **4.2.1 Experimento do Tubo de Crookes.**

Em seu trabalho de mestrado, o autor propõe atividades relacionadas a física moderna, mais especificamente, a física do plasma.

Seu trabalho, apresenta-se de forma clara e concisa, de modo que qualquer leitor, mesmo aqueles que não estão familiarizados com o tema, ou com a área de física possam entender, pois o autor defende muito bem a idéia das analogias para o bom entendimento. Tem uma boa apresentação histórica dos fatos, trazendo a noção de quais cientistas dedicaram parte de seus estudos para o entendimento das descargas elétricas, termodinâmica, estudo dos gases e outras áreas relacionadas, até finalmente a definição de Langmuir para plasma.

Com o enfoque didático deste capítulo, deve-se salientar nesta seção, as aulas ministradas pelo autor, tanto em nível médio, quanto em superior da cidade de Brasília, ocorrendo que apenas na universidade o experimento proposto pode ser aplicado, pois com a escola de nível médio, ocorreram diversos problemas, tais como choque com o calendário escolar, e paralizações na universidade, fazendo assim, com que o experimento não conseguisse ser finalizado a tempo. Porém, as aulas contam com auxílio de um site desenvolvido pelo autor, contendo os temas trabalhados. Cada aula teve seu enfoque, o de apresentar a história para os alunos, situar o problema do que é o plasma, apresentar a teoria do plasma e por fim, trazer a noção das aplicações à indústria. Ao final destas aulas deveria ser apresentado o experimento, mas por problemas já citados, o mesmo não foi realizado na escola. Entretanto, a realização do experimento na universidade gerou alguns pontos positivos, sendo um deles a disposição de dois alunos para se aprofundarem mais no assunto do plasma juntamente com o desenvolvimento de experimentos.

Agora, sobre a parte principal, o tubo de crookes (figura 11), trabalho desenvolvido por Venceslau (2015, p. 79), segundo suas próprias palavras:

“O tubo de Crookes encontra-se em condições de ser levado à sala de aula. Podendo, com sua montagem versátil, ainda receber outros módulos, como campo magnético variável, que possibilitem o seu uso tanto em outros projetos em desenvolvimento de ensino de física quanto em projetos de iniciação científica para o ensino médio, para o ensino técnico e também em nível de graduação e pós-graduação”.

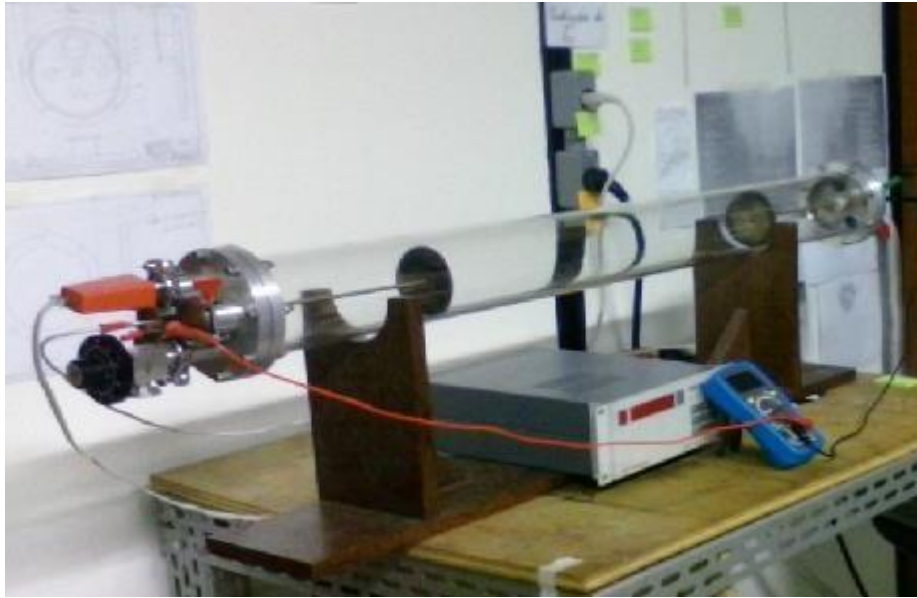


Figura 11: Tubo de Crooks desenvolvido por VENCESLAU (2015).

O experimento do Tubo de Crookes trata de se encontrar os conhecidos “raios catódicos”, que posteriormente ficaram conhecidos por elétrons. Um tubo parcialmente a vácuo, sofre aplicação de uma alta tensão, a qual, permite que os elétrons ali se ionizem e seja possível de emitirem luz, relativamente parecido com o que ocorre com as lâmpadas fluorescentes. Seguindo a ideia da tese de Gustavo, o experimento seria demonstrado após feitas todas as aulas teóricas.

Portanto, um aparato não tão simples de se desenvolver, porém, com grandes possibilidades de aplicação em salas de aula, com o intuito de ser utilizado para compreensão dos conceitos trabalhados anteriormente ou pelo menos, conhecendo a sua importância e impacto para o mundo atual.

#### **4.2.2 Globo de Plasma.**

Existem diversas maneiras de se fazer um globo de plasma em casa. Será apresentado aqui uma maneira de se construir um globo, sendo esta, retirada do site manual do mundo[13] e a segunda parte da proposta é apenas para discussão e visualização do efeito, pois atualmente pode-se comprar um globo de plasma (figura 12) já feito em diversos lugares.

Sendo assim, nossa primeira proposta é trazer a montagem experimental e desenvolver breves comentários. Geralmente esta montagem experimental pode ser encontrada em diversos

sites, mas utilizaremos um em específico. Portanto, para a construção serão necessários os seguintes materiais: 1 lâmpada incandescente e um fogão com acendedor automático.

Agora, para finalizar o experimento, basta encostarmos a lâmpada na saída do acendedor do fogão e teremos nosso globo de plasma caseiro. Lembrando, deve-se tomar cuidado com possíveis choques elétricos que podem ocorrer e causar certo desconforto.

A física por trás deste simples experimento pode também ser explicada de forma simplificada, pois a pressão que o gás gera no interior da lâmpada é menor que a pressão atmosférica, ou seja, temos um ambiente com ar rarefeito, o qual, sob efeito de uma tensão elétrica aplicada, os elétrons deste gás são ionizados e excitados a um nível energético maior, e quando decaírem, emitem luz.



Figura 12: Globo de plasma. Fonte:

[https://azfq.wikispaces.com/file/view/plasma\\_globe.jpg/125304535/563x584/plasma\\_globe.jpg](https://azfq.wikispaces.com/file/view/plasma_globe.jpg/125304535/563x584/plasma_globe.jpg). Acessado por último em 16/11/16.

### **4.2.3 Personagens.**

Para as histórias em quadrinhos, personagens que utilizam poderes obtidos pelas forças da natureza não faltam. Personagens como “Ciclope” e “Homem de Ferro” da franquia Marvel[14] são alguns desses exemplos. Entretanto, o que isso tem a ver com física ou plasma? Como visto já nos capítulos anteriores deste trabalho, a maioria da matéria compreendida (ou em fase de compreensão) no universo é encontrada no estado de plasma, portanto, no mundo da imaginação, a aparição de diversas personalidades utilizando os “poderes” do plasma não deveria ser estranho.



Devido à existência de diversos personagens com estes “super poderes”, em nosso trabalho iremos tentar utilizar desta criatividade para uma possível motivação para as aulas de física, tanto em aulas em ensino médio como superior, propondo também, uma possível montagem experimental, assim, o personagem escolhido foi o “Megaman” da série Megaman[15].

Este personagem apresenta um corpo robótico, onde seu poder heróico consiste basicamente em atirar um jato de plasma a certas distâncias com seu braço, ou seja, a proposta experimental neste caso é desenvolver este braço e desenvolver uma teoria de como será possível a existência de tal efeito, então, seguindo a figura 13 abaixo, pode-se notar a anatomia do funcionamento do braço mecânico de nosso herói.

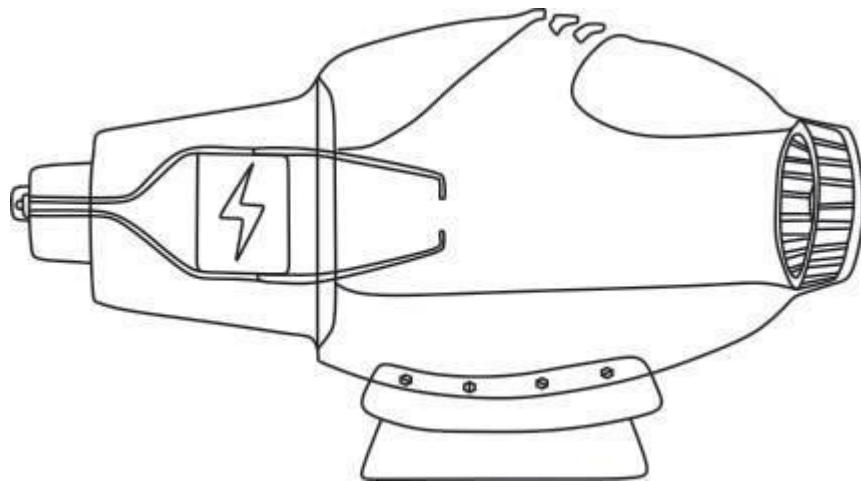


Figura 13: Montagem experimental, protótipo do braço do Megaman. Imagem idealizada pelo autor do trabalho de conclusão de curso, com traços feitos no computador por Danilo dos Santos.

Sendo assim, o braço do personagem serve como um gerador de plasma, onde a região anterior deve ser composta por algumas baterias ou apenas uma, sendo esta capaz de suprir a tensão necessária para que, no ponto do contato entre os eletrodos e o gás, seja possível a ionização e finalmente a geração do plasma. Ao redor do contato, pode existir um reservatório com água, servindo para resfriamento do sistema.

O jato direcionado de plasma, consegue ser impulsionado para fora devido ao próprio fluxo de ar presente no sistema, sendo este gás ejetado a altas temperaturas e possivelmente distâncias, ou seja, contendo grandes valores de energia cinética e térmica.

A física presente no braço mecânico do Megaman é extensa e engloba diversas áreas, tais como, termodinâmica, energias, circuitos elétricos, magnetismo, quantidade de movimento, tornando assim, um exemplo que pode auxiliar diversas discussões em sala de aula. Portanto, numa visão matemática e experimental, a proposta experimental pode ser comparada com um arco não transferido (visto no capítulo 3) e do mesmo modo, as equações que podem descrevê-lo são diversas, uma vez que dependendo de qual interação desejo tratar, é necessário mudar a concepção do assunto, resumindo, as teorias de órbita, equilíbrio e hidromagnética são aplicáveis. Tornando a visão para o ensino médio, utilizar a teoria de equilíbrio pode se tornar mais compreensível, uma vez que não é necessário elevado conhecimento de cálculo avançado, porém, a discussão acerca da teoria hidromagnética e os tipos de ondas que podem ser produzidos por campos elétricos e magnéticos em um plasma, também podem ser discutidas, sem haver a necessidade de cálculos extensos.

Portanto, a utilização deste exemplo como introdução e motivação para este tema, seja em qualquer nível de ensino, mostra-se bastante favorável, por ser algo relativamente simples e de tratar de diversos assuntos da física.

### **4.3 Breves comentários.**

Neste capítulo, tratamos algumas questões didáticas referentes ao plasma, trazendo alguns trabalhos já feitos, tais como a tese de metrado de Gustavo e os vídeos desenvolvidos pelo “manual do mundo”. Mas, o que realmente inova, é a proposta de um aparato experimental, que tem a possibilidade de ser desenvolvido, contudo, ainda precisa ser otimizado para que possa ser realmente construído e seu conhecimento aplicado.

Como a premissa do capítulo são possibilidades didáticas, trouxemos estes pontos para que, professores de diversas áreas do ensino possam usá-lo como guia introdutório ou aumentar a gama de exemplos que podem ser dados para se explicar o assunto.

## CONCLUSÃO.

O intuito do trabalho foi discorrer sobre o plasma, relatando suas características, mostrando algumas de suas aplicações, teóricas e práticas e demonstrando seu exemplo no ensino.

Como principais características envolvidas, pode-se citar, *distância de blindagem de Debye* e *equação de Saha* que definem o que é necessário para que um gás seja considerado um plasma. A primeira, valor dado pela letra  $h$ , trabalha com o equilíbrio de cargas ionizadas, ou seja, quando a densidade de portadores de cargas (número de íons e número de elétrons) é a mesma, ou aproximadamente a mesmo para todo o gás, mas que haja grande número de partículas ionizadas. A segunda característica, indica o grau de ionização que um gás poderá ter a partir da temperatura aplicada sobre o mesmo. Quanto maior o valor da relação, mais partículas são ionizadas e conseqüentemente a definição do plasma será aplicada.

Nas aplicações, a teoria citada é a dos TOKAMAKS, os quais, permitem produzir energia elétrica a partir do confinamento de gases por campos magnéticos. A geração da energia fica por conta da altíssima velocidade que este gás pode atingir e conseqüentemente girar turbinas, tornando possível a geração de energia. Porém, este processo ainda é muito estudado, devido a alguns problemas, tais como, caso o gás aquecido a milhares de graus se chocar nas paredes do material, a mesma pode, oxidar ou até mesmo derreter, tornando-o assim incapaz de produzir novamente a colisão das partículas; como gerar campos magnéticos tão intensos, capazes de aprisionar o gás e o tempo necessário que todo o aparato irá funcionar para que as reações ocorram.

Para a indústria, a utilização do plasma hoje em dia, está se tornando cada vez maior, utilizando seu alto valor calorífico, ou de sua capacidade de gerar energia elétrica. Fez-se neste trabalho a demonstração de algumas destas aplicações, tanto para geração de energia elétrica, através das lâmpadas fluorescentes, como do valor energético, necessário para cortes de metais em empresas. Juntando estes dois pontos, tenta-se desenvolver hoje, métodos para tratar dos resíduos gerados pelo ser humano, conhecida por pirólise plasmática, o qual usa a questão energética para queimar a matéria orgânica, e os gases gerados, servem ou para aquecer caldeiras em centros industriais ou girar turbinas, possibilitando a geração de energia elétrica.

Exemplos para o ensino, visando o lúdico, foi-se analisado alguns experimentos envolvendo o tema principal deste trabalho. Globos de plasma e tubo de crookes foram os experimentos tratados aqui, em modo mais conceitual, sem aprofundar-se muito as questões matemáticas envolvidas. Propomos também um experimento, o qual pode ser desenvolvido e testado, sendo o protótipo para o braço do personagem Megaman, servindo, para incentivar e apreender os conceitos tratados anteriormente, entretanto, este protótipo deve ser usado para questões demonstrativas em museus da ciência ou os conhecidos “shows de física” espalhados pelas universidades de diversas cidades, pois, a existência de diversos perigos atrelados com a alta tensão, super aquecimento e ionização podem trazer sérios riscos a segurança das pessoas. Com estes pontos, este trabalho conclui-se de maneira a ser visto como uma revisão bibliográfica de livros e artigos, trazendo os pontos principais de cada, com a perspectiva da divulgação científica, de modo que, diversos níveis de ensino possam utilizar este trabalho como guia básico para os estudos relacionados ao plasma, ou o notável quarto estado da matéria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] VENCESLAU, Gustavo Mulim. Física de Plasma no Ensino Médio. 2015. 97 f. Tese (Mestrado) - Curso de Física, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- [2] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. Física para cientistas e engenheiros. 6. ed. São Paulo: Ltc, 2009.
- [3] KITTEL, Charles. Introdução a Física do Estado Sólido. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- [4] REVISTA BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. Brasília: 2007.
- [5] REITZ, John R.; MILFORD, Frederick J.; CHRISTY, Robert W.. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1982.
- [6] CHEN, Francis F.. Introduction to Plasma Physics. New York: Plenum Press, 1974.
- [7] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento\\_de\\_Debye](https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento_de_Debye). Acessado por ultimo em 16/11/16.
- [8] NELSON, Osman Rosso. Uma abordagem didática da natureza dos processos de aquecimento da atmosfera estelar. Rio Grande do Norte, p.1-14, 26 set. 13.
- [9] Aplicações do Plasma. Disponível em: <<http://estadoplasmatico.webnode.com.br/aplicações/>>. Acesso em: 12 out. 16.
- [10] FELIPINI, Celso Luiz. Noções sobre plasma térmico e suas principais aplicações. Integração, p.147-151.
- [11] OLIVEIRA, Walter Engracia de. Resíduos Sólidos e Poluição Ambiental. Revista Dae, p.46-56.
- [12] Pirólise Plasmática. Disponível em: <<https://web.fe.up.pt/~jotace/gtresiduos/plasmapirolise.htm>>. Acesso em: 12 out. 16.
- [13] Globo de Plasma. Disponível em: <<http://www.manualdomundo.com.br/>>. Acessado por último em 16/11/16.
- [14] Marvel Comics.
- [15] Megaman Capcom.