

Universidade de Brasília

Instituto de Física

William Wenner Teixeira Sinésio

**Desenvolvimento e caracterização de um  
propulsor elétrico do tipo HPT.**

Brasília

21 de julho de 2023



William Wenner Teixeira Sinésio

**Desenvolvimento e caracterização de um propulsor elétrico do tipo HPT.**

Monografia apresentada ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física.

Orientador: José Leonardo Ferreira

Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Física

Brasília

21 de julho de 2023

---

William Wenner Teixeira Sinésio

Desenvolvimento e caracterização de um propulsor elétrico do tipo HPT./  
William Wenner Teixeira Sinésio. – Brasília, 21 de julho de 2023-  
85 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: José Leonardo Ferreira

Monografia – Universidade de Brasília – UnB  
Instituto de Física, 21 de julho de 2023.

1. Plasmas 2. Propulsores aeroespaciais I. José Ferreira Leonardo . II.  
Universidade de Brasília. III. Instituto de Física. IV. Bacharel

CDU 02:141:005.7

---

William Wenner Teixeira Sinésio

## **Desenvolvimento e caracterização de um propulsor elétrico do tipo HPT.**

Monografia apresentada ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física.

Trabalho aprovado. Brasília, 21 de julho de 2023:

---

**José Leonardo Ferreira**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Rodrigo Miranda Cerda**  
Examinador 1

---

**Prof. Dr. Alexandre Baptista de Alves  
Martins**  
Examinador 2

Brasília  
21 de julho de 2023



*Este trabalho é dedicado a minha família  
Que diante de todas as dificuldades seguiu firme na caminhada da vida.*





# Agradecimentos

Uma fase muito importante e magnífica da minha vida esta se encerrando, e é até difícil para mim escrever esses agradecimentos. Tendo em vista, tudo que passei para a conclusão desse curso e todas as etapas e problemas enfrentados, quase não consigo acreditar que esse momento chegou. Poucos possuem a oportunidade de estudar numa instituição tão renomada e inesquecível como a Universidade de Brasília. Aqui conheci pessoas, chorei, debati ideias, conheci culturas, comidas e até viajei para lugares desconhecidos. Meu único arrependimento é não poder parar no tempo.

Nessa caminhada eu pude contar com diversas pessoas que me acompanharam e me fizeram seguir firme e forte. A minha família em primeiro lugar, que sempre esteve comigo e me apoiou com imenso amor e carinho, principalmente meus pais Daniel Barboza Sinésio e Okesla de Jesus Teixeira Sinésio dedico a vocês esse trabalho, agradeço a vocês por tudo nessa caminhada e por nunca desacreditarem de mim.

À minha namorada Eduarda Beatriz que me acolheu e me ajudou, e continua me ajudando, em todos os momentos de aflição e alegria e que esta comigo desde bem antes do início dessa caminhada. Obrigado por ser meu porto seguro, refugio e companheira de vida. Eu te amo!

Ao meu melhor amigo Marcos Vinícius de Paula, amigo de pesquisa, piadas, choro e desespero, sem você e suas frases desmotivacionais e motivacionais nada disso teria sido possível. Até hoje lembro de quando eu queria desistir e você me jogou pra cima e me incentivou a continuar, obrigado.

Ao PET-Física e todo os seus membros, que me engradeceram como pessoa, como estudante e como pesquisador. Vocês não tem ideia do impacto que tiveram em minha caminhada.

Aos professores Dr.Alexandre Dodonov, Dra. Marianna Penna Lima Vitenti e Dr. José Leonardo Ferreira. Vocês acreditaram em mim e transferiram um pouco do vasto e precioso conhecimento que possuem. Agradeço por toda as lições, piadas, broncas e incentivos.

Agradeço ao técnico Júlio Melo, apesar de conhecê-lo justo nessa reta final já se provou ser um grande amigo e um ótimo companheiro de laboratório. Obrigado pelo conhecimento transmitido e pelas ideias e conversar científicas.

Não posso me esquecer de toda a equipe do Laboratório de Física dos Plasmas da Universidade de Brasília. Vocês me desafiaram a alcançar o meu melhor nível teórico e experimental e colocaram a prova todo o meu conhecimento adquirido nessa caminhada,

obrigado.

Agradeço também a todos aqueles que atravessaram minha vida e me formaram a pessoa que sou hoje. E a todos aqueles citados aqui, um imenso abraço e um grande agradecimento por, mesmo que por pouco tempo, terem dividido experiências, ideias e um pouco do escasso tempo que temos nesse mundo comigo. Obrigado!

*“It is difficult to say what is impossible, for the dream of yesterday is the hope of today  
and the reality of tomorrow.”*

***Robert H. Goddard***



# Resumo

A propulsão elétrica esta em desenvolvimento desde o início do século XX e é de grande desejo que o ser humano utilize-a nos próximos anos para viagens pelo sistema solar. Tendo em vista sua vantagem no uso de propelente, o alto empuxo específico entre outras, o uso de princípios eletromagnéticos para a propulsão a plasma se tornam cada vez mais desejados pela industria como uma alternativa aos métodos de propulsão químicas habituais. Um dos propulsores cotados como principal fonte de propulsão no espaço é o HPT - Helicon Plasma Thruster - baseado em fontes de plasma helicoidais, que são fontes de ondas eletromagnéticas que usam as ondas hélicon como geradoras de plasma. O plasma de alta densidade gerado é capaz de expelir elétrons através de um campo magnético axial em formato de cúspide magnética. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo a construção e a caracterização de um sistema HPT para o Laboratório de física dos plasmas da Universidade de Brasília. A construção será feita em três etapas: Planejamento, construção das peças e montagem. Por fim, a análise e caracterização do sistema será feita usando-se uma sonda de Langmuir, onde analisaremos as propriedades do plasma de Argônio (Ar).

**Palavras-chaves:** Física de plasmas, propulsão, elétrica, Propulsão Elétrica, Sistemas de propulsão, propulsão aeroespacial, Sonda de Langmuir, HPT, Camada dupla, Caracterização, plasmas.



# Abstract

Electric propulsion has been under development since the early 20th century and holds immense potential for future human utilization on deep space mission into solar system. Due to its advantages, such as efficient propellant usage and high specific thrust, the industry is increasingly interested in electromagnetic propulsion as an alternative to conventional methods. One prominent engine in the realm of space propulsion is the HPT, or Helicon Plasma Thruster, which relies on helical plasma and employs electromagnetic waves generated by helicon waves as plasma generators. The resulting high-density plasma can expel electrons through an axial magnetic field by a magnetic cusptype. Consequently, the objective of this project is to construct and characterize an HPT system for the Physics Laboratory of Plasma at the University of Brasilia. The construction process will involve three stages: planning, parts construction, and assembly. Finally, the system will be analyzed and characterized using a Langmuir probe to examine the properties of argon (Ar) plasma.

**Key-words:** Plasma Physics. Eletrical Propulsion. propulsion. propulsion systems. aerospace propulson. Helicon plasmas. Hall Effect. HPT. Double Layer. Langmuir probe.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Configuração típica do escudo de Debye. Fonte: (CHEN, 2012) . . . . .	24
Figura 2 – O foguete foi projetado pelo mesmo, e sendo publicado no mesmo artigo que a equação do foguete. Fonte: Wikipedia, (TSIOLKOVSKY, 1903) .	30
Figura 3 – Robert H. Goddard (3a) considerado o pai da propulsão e dos foguetes químicos dos Estados Unidos. Patente do acelerador de íons proposto por Goddard (3b. Fonte: Wikipedia, (GODDARD, 1920) . . . . .	31
Figura 4 – Ernst Stuhlinger pioneiro da ciência dos foguetes. Fonte: Wikipedia . .	32
Figura 5 – Propulsor SERT-1 desenvolvido pelo Lewis Research Center. Fonte: NASA . . . . .	33
Figura 6 – Esquemática do funcionamento de um resistor JET. Fonte: (O'REILLY; HERDRICH; KAVANAGH, 2021) . . . . .	34
Figura 7 – Esquemática do funcionamento de um propulsor iônico. Fonte: (GOEBEL; WIRZ; KATZ, 2007) . . . . .	35
Figura 8 – Esquema de um propulsor Hall. Fonte: Princeton Plasma Physics Laboratory . . . . .	36
Figura 9 – Funcionamento de um propulsor ambipolar. Fonte: . . . . .	37
Figura 10 – Esquema de um propulsor ambipolar do tipo VASIMIR. Fonte: Ad Astra Rocket Company . . . . .	37
Figura 11 – Esquemática de um propulsor do tipo HPT usada no Laboratório de Física dos Plasmas da UnB. Fonte: Autoral . . . . .	38
Figura 12 – Esquema de uma camada dupla. Fonte: Autoral . . . . .	39
Figura 13 – Configuração gráfica das propriedades da DL's. Fonte: (BLOCK, 1978)	40
Figura 14 – CAD 3D da mesa já com o propulsor e as bombas posicionadas. Fonte: Júlio César de Melo Almeida . . . . .	41
Figura 15 – Simulação do campo magnético no software FEMM. Fonte: Autoral . .	43
Figura 16 – Perfil de campo magnético para algumas correntes. Fonte: Autoral . . .	44
Figura 17 – Sistema eletrônico para a medição da queda de potencial. Fonte: (CHEN, 2003) . . . . .	45
Figura 18 – Montagem da bomba difusora e da mesa de metal, ambas em conjuntos. Observe o que na montagem final a flange de conexão já foi colocada. .	46
Figura 19 – Bomba mecânica da Edwards utilizada no sistema de vácuo. Fonte: LFP - UnB . . . . .	47
Figura 20 – Montagem das flanges de poliacetal na conexão entre os tubos. Foram utilizados graxa de vácuo e O-rings para ajuda na vedação do sistema. Fonte: LFP - UnB . . . . .	48
Figura 21 – Montagem final da câmara de vácuo. Fonte: LFP - UnB . . . . .	48

Figura 22 – Montagem final das bobinas . . . . .	49
Figura 24 – Antena helicoidal usada no experimento, observe que o tipo da antena consiste numa meia volta através do eixo axial. Fonte: LFP - UnB . . . . .	50
Figura 25 – Equipamentos para a geração do sinal. Fonte: LFP - UnB . . . . .	51
Figura 27 – Aterramento na mesa de metal. Fonte: LFP - UnB . . . . .	52
Figura 31 – Sonda para medida do campo axial. Fonte: LFP - UnB . . . . .	54
Figura 32 – Curva característica obtida por uma sonda de Langmuir. Aqui podemos ter noção das três regiões características: a região de saturação de íons, a região de transição e a região de saturação de elétrons. Fonte: (WONG, 1977) . . . . .	55
Figura 33 – Tipos de sondas de langmuir para medição dos potenciais de plasma. Fonte: LFP - UnB . . . . .	56
Figura 34 – Flange de acrílico utilizada na primeira montagem do sistema. Fonte: LFP - UnB . . . . .	59
Figura 35 – HPT funcionando no laboratório de física dos Plasmas da UnB. Fonte: LFP - UnB . . . . .	61
Figura 36 – Cuspide magnética formada pelo HPT. Fonte: LFP - UnB . . . . .	62
Figura 37 – Possível modo hélicon alcançado através da ressonância da antena . . . . .	63
Figura 38 – Perfil de campo magnético obtido pela sonda ao longo do tubo. Fonte: LFP - UnB . . . . .	64
Figura 39 – Curva obtida para $600\text{mm}$ , observe que a curva possui um joelho menos acentuado, característico de sondas cilíndricas. Fonte: LFP - UnB . . . . .	65
Figura 40 – Análise do gráfico da curva de Langmuir para $600\text{ mm}$ . . . . .	66
Figura 41 – Perfil de densidade eletrônica obtido durante as medições. Fonte: LFP - UnB . . . . .	67
Figura 42 – Densidade iônica ao longo do eixo do tubo. Fonte: LFP - UnB . . . . .	68
Figura 43 – Perfil de potencial de plasma ao longo do tubo. Fonte: LFP - UnB . . . . .	69
Figura 44 – Perfil da temperatura de elétrons ao longo do tubo. . . . .	70
Figura 45 – Funcionamento de uma bomba mecânica. Fonte: CBPF . . . . .	81
Figura 46 – Esquema de uma bomba difusora. Fonte: CBPF . . . . .	82
Figura 47 – Medidor Pirani APG-100-xm. Fonte: Edwards Vacuum . . . . .	83
Figura 48 – Esquema do funcionamento de um medidor Pirani geral. Fonte: Instru- mental Today. . . . .	83
Figura 49 – Esquema eletrônico de um medidor de ionização. Fonte: Instrumental Today. . . . .	84
Figura 50 – Medidor WRG200 da Edwards. Fonte: Edwards Vacuum . . . . .	84
Figura 51 – Esquemática do efeito Hall. Fonte: IF-USP . . . . .	85

# Sumário

	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>O PLASMA</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>O que é plasma?</b>	<b>23</b>
1.1.1	Definição de plasma	24
1.1.2	Ondas hélicon em plasma magnetizados	26
<b>2</b>	<b>PROPULSÃO ELÉTRICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Uma breve história da propulsão elétrica</b>	<b>29</b>
2.1.1	A era dos Visionários (1906-1946)	29
2.1.2	A era dos Pioneiros (1946-1956)	30
2.1.3	A era de Desenvolvimento (1956-1980)	31
2.1.4	A era da aceitação (1980-1992)	31
2.1.5	A era das aplicações (1993-Presente)	32
<b>2.2</b>	<b>Propulsores elétricos</b>	<b>32</b>
2.2.1	Propulsores Termoelétricos	33
2.2.1.1	Resistojets	33
2.2.1.2	Arcjets	34
2.2.2	Propulsores lônicos	34
2.2.3	Propulsores do Tipo Hall	35
2.2.4	Propulsor ambipolar	36
2.2.5	O propulsor de plasma Helicoidal (HPT)	37
2.2.5.1	Camadas duplas em HPT	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Planejamento</b>	<b>41</b>
3.1.1	CAD do propulsor	41
3.1.2	Simulação do Campo Magnético.	43
3.1.3	Sistema para medida de parâmetros básicos de plasma com sonda de Langmuir	44
<b>3.2</b>	<b>Montagem</b>	<b>45</b>
3.2.1	Sistema de vácuo	45
3.2.2	Bobinas Magnéticas	48
3.2.3	Montagem do sistema eletrônico	50
3.2.4	Montagem do sistema eletrônico para medição utilizando Sonda de langmuir	52
<b>3.3</b>	<b>Caracterização do sistema</b>	<b>52</b>
3.3.1	Metódo de Caracterização do campo magnético.	53

3.3.2	Caracterização dos parâmetros de plasma. . . . .	55
3.3.3	Determinação da camada dupla . . . . .	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise qualitativa . . . . .</b>	<b>59</b>
4.1.1	Frequência de Ressonância da Antena . . . . .	62
<b>4.2</b>	<b>Resultados quantitativos . . . . .</b>	<b>63</b>
4.2.1	Caracterização do campo magnético . . . . .	63
4.2.2	Caracterização do plasma . . . . .	65
<b>5</b>	<b>MELHORIAS FUTURAS . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>APÊNDICE . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Equação de Tsiolkovsky . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>Funcionamento das bombas mecânicas e difusoras . . . . .</b>	<b>80</b>
6.2.1	Bombas mecânica . . . . .	80
6.2.2	Bombas difusora . . . . .	80
<b>6.3</b>	<b>Funcionamento dos medidores de vácuo . . . . .</b>	<b>82</b>
6.3.0.1	Medidores Penning . . . . .	82
<b>6.4</b>	<b>Efeito Hall . . . . .</b>	<b>84</b>

# Introdução

A física do plasma, é a área da física que busca entender o conhecido 4º estado da matéria. Plasma, do grego "*algo mutável*", é o estado da matéria mais abundante no universo visível e possui diversas aplicações práticas.

As aplicações práticas desse estado da matéria vão desde a geração de energia, através da fusão termonuclear, até a limpeza de vírus e lixo hospitalar. Outra grande aplicação desse estado da matéria é a propulsão elétrica aeroespacial.

Os propulsores elétricos são uma alternativa aos caros propulsores químicos utilizados atualmente e são de grande valia para movimento de satélites e espaçonaves alto vácuo espacial. Essa aplicação só é possível pelos trabalhos de Robert Goddard e Konstantin Tsiolkovski, considerados os pais dos foguetes.

A pesquisa e o desenvolvimento desses propulsores foram idealizadas pelos pioneiros dos foguetes do início de século XX, quando as ciências aeroespaciais e a teoria eletromagnética estavam em um crescimento exponencial. No entanto, a grande revolução envolvendo propulsores EHD foi durante o período da guerra fria, logo após os trabalhos de E. Sterlinger nos anos cinquenta.

A guerra fria foi o grande palco dos propulsores. A corrida espacial levou a grande avanços na construção de foguetes, propulsores e tudo aquilo que envolvia viagem espacial. No entanto, a propulsão elétrica permanecia apenas no campo das ideias como uma idealização. Somente em 1964, o primeiro propulsor elétrico foi ao espaço. Desenvolvido pela NASA o propulsor SERT-1 (Space Electric Rocket Test), um propulsor iônico, funcionou durante 31 minutos em alto vácuo, demonstrando a possibilidade desse tipo de propulsão ser visado para movimentos no vácuo. Logo após em 1970, a missão SERT-2 levou ao espaço dois propulsores iônicos do mesmo tipo.

Agora durante o século XXI alguns propulsores elétricos vem ganhando destaque, são eles os propulsores do tipo Hall, baseados no efeito Hall. Esse efeito descoberto por Edwin Herbert Hall no final do século XIX. Outros propulsores elétricos também estão em desenvolvimento e também utilizam de plasma para seu funcionamento. No entanto ainda há vários outros propulsores sendo desenvolvidos, sendo o mais promissores atualmente: VASIMIR, HPT (ou HDLT) e o Ambipolar. Sendo assim, podemos dividir a história dos propulsores elétricos em três partes: a fase dos pioneiros, a fase das teorias e a fase do desenvolvimento. A fase dos pioneiros é a fase onde a ciência de foguete e propulsão se inicia, e a teoria eletromagnético começa a espalhar sua palavra. A fase das teorias é onde a física dos plasmas se desenvolve e conseguimos entender melhor esse estado da matéria, em paralelo a tecnologia avança e conseguimos melhorar esses sistemas de propulsão e até

propor novos. E atualmente estamos na fase de desenvolvimento, onde o foco é criar mais e mais propulsores eficientes visando sua melhora e o aumento da sua utilidade para o ser humano.

Logo, nosso estudo foca na criação e estudo de um desses propulsores elétricos. O propulsor HPT, ou HDLT, é um propulsor do tipo eletromagnético baseado nas fontes de plasma helicoidal. Esse tipo de propulsor possui plasma magnetizado de alta densidade formado por RF que é capaz de gerar impulsão em cubesats e outros mini satélites. A vantagem desse propulsor é que ele é independente de cátodos ociosos, além de trazer outras vantagens como o menor uso de combustível e aumento da eficiência energética.

Sendo assim, este estudo visa a construção de um HPT e a caracterização inicial desse sistema que está em desenvolvimento no Laboratório de Física dos Plasmas da Universidade de Brasília, sendo o objetivo desse estudo especificados abaixo.

## Objetivos Gerais

Esse trabalho tem como objetivo a construção e elaboração de um sistema de propulsão para pequenos satélites. O propulsor em questão é um propulsor baseado nos estudos de descarga helicoidal em plasmas de alta densidade, baseados nos artigos (CHARLES; BOSWELL, 2003) e (CHARLES et al., 2006). Além disso, buscamos também a caracterização completa desse sistema, como o sistema de bobinas, a caracterização do plasma e as propriedades de propulsão.

Sendo assim, o projeto inicia com o planejamento do sistema, além dos estudos de uma simulação feita pelo Laboratório de Física dos Plasmas da Universidade de Brasília (LFP). O LFP já possuía um protótipo, porém era uma adaptação de um espelho magnético já existente, necessitando assim de um desenvolvimento completo e várias melhorias. As melhorias são baseadas na tese do aluno Renan Almeida do LFP que demonstrou uma interferência devido a uma flange condutora no sistema que interferia na propulsão.

Tendo a montagem sido um sucesso e o sistema estar em funcionamento, inicia-se a caracterização das propriedades do sistema. Nessa caracterização queremos observar a configuração do campo magnético, os parâmetros dos plasmas entre outras grandezas importantes para propulsão como uma queda de potencial.

## Objetivos Específicos

- Projeto em CAD do propulsor elétrico, possuindo nova configuração; envolvendo projetos de flange e de conectores para alto vácuo, além de peças com diversos tipos de material para sondas e geradores de RF.

- Montagem do sistema de vácuo e geração de plasma;
- Caracterização do campo magnético;
- Desenvolvimento de uma sonda de Langmuir para medição de densidade de elétrons, íons, temperatura de elétrons e outras características;
- Desenvolvimento dos sistema de medição;
- Aquisição dos dados da sonda e análise dos dados.
- Caracterização de uma possível camada dupla no sistema.





# 1 O plasma

## 1.1 O que é plasma?

Plasma é conhecido como o quarto estado da matéria. Sendo o estado da matéria mais abundante no universo constituindo 99% da matéria visível, aparecendo nas estrelas, nebulosas, aurora boreal, ionosfera, corona solar até descargas elétricas atmosféricas. O plasma é muito semelhante à um gás ionizado porém necessita de um livre caminho médio e grau de ionização maior, sendo este último a maior diferença (CHEN, 2012). O grau de ionização para um gás ionizado ser considerado plasma é dado pela equação de Saha 1.1 (CHEN, 2012).

$$\frac{n_i}{n_e} \approx 2,4 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{4}}}{n_i} \exp\left(\frac{-u_i}{K_B T_e}\right) \quad (1.1)$$

O termo plasma surge em 1923 por Irwing Langmuir, enquanto estudava descargas elétricas. O termo plasma vem do grego e significa "moldável" ou "algo que se molda" descrevendo assim o caráter diverso do plasma. A física dos plasmas conseguem descrever esse estado da matéria de duas maneiras, como um fluido e como um gás. A união dessas duas descrições deu origem a uma das áreas mais importantes da física do último século: a Teoria da magneto hidrodinâmica (MHD). Iniciada pelo físico Hannes Alfvén, cientista suéco, que descreveu as ondas magnetoidrodinâmicas em fluidos carregados, como os plasmas. Essa teoria une as equações de Maxwell e equações da mecânica dos fluidos e consegue com precisão descrever o comportamento de ondas dentro de um plasma (CHEN, 2012), como demonstrado nas equações 1.2-1.6.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.2)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.6)$$

Portanto, vemos que o plasma consegue ser descrito as vezes como um fluido, as vezes como um gás. Sendo assim, podemos defini-lo com uma maior precisão e como um estado da matéria.

### 1.1.1 Definição de plasma

O físico Francis F. Chen define plasma como sendo *"Um gás ionizado de partículas carregadas e neutras que exibem comportamento coletivo."* (CHEN, 2012). Essa definição pode parecer confusa à primeira vista, mas não de difícil entendimento. Podemos entender o comportamento coletivo como as interações de natureza eletromagnéticas entre as partículas carregadas do plasma, observando a presença de corrente, campos elétricos e magnéticos entre outras interações, estas interações geralmente locais, costumam afetar outras partes do plasma. A quaseneutralidade de um plasma é caracterizada pelo fato de que o plasma no seu todo é neutro, porém localmente observá-se regiões não neutras. Outra característica que torna o plasma quaseneutro é sua capacidade de blindar potenciais externos à ele através da blindagem de Debye (Escudo de Debye) assim sempre tendendo a neutralidade elétrica.

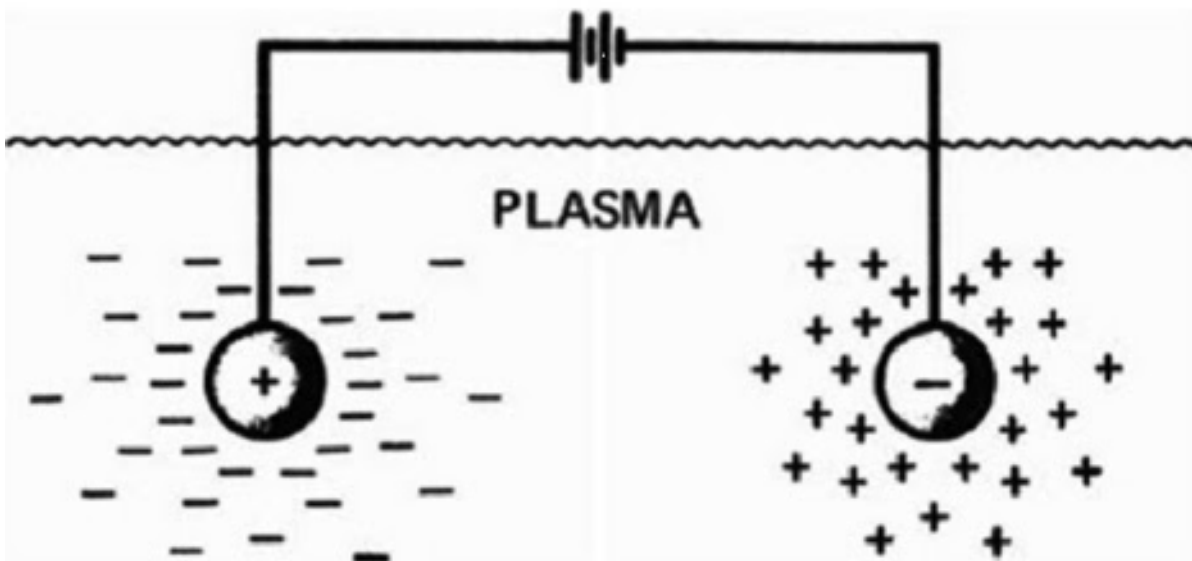


Figura 1 – Configuração típica do escudo de Debye. Fonte: (CHEN, 2012)

A característica mais marcante num plasma é a blindagem de potenciais externos a ele. A característica é conhecida como escudo, ou blindagem, de Debye (Fig. 1), descoberta pelos físicos P. J. W. Debye e E. Huckel, e é caracterizada por duas grandezas importantes o comprimento de Debye ( $\lambda_D$ ) e o número de partículas na esfera de Debye ( $N_D$ ). Fisicamente quando um potencial é inserido dentro do plasma, as partículas carregadas que estão livres no plasma são atraídas por esse potencial cessando assim sua influência no plasma como um todo blindando assim o plasma do campo elétrico perturbador.

O comprimento de Debye nos diz a espessura da blindagem no qual as partículas livres estão dispostas. Considerando um plasma maxiewelliano, possuindo uma densidade

muito maior de eletron e apenas uma dimensão. A equação de poisson será dada por:

$$\epsilon_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} = -e(n_i - n_e) \quad (1.7)$$

Onde temos:

$$n_e = n_\infty \exp\left(\frac{e\phi}{K_B T_e}\right); n_i = n_\infty \quad (1.8)$$

Sendo  $n_\infty$  a densidade de partículas longe do escudo de debye. Teremos então:

$$\epsilon_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} = -en_\infty \left[ \exp\left(\frac{e\phi}{K_B T_e}\right) - 1 \right] \quad (1.9)$$

Resolvendo teremos a solução:

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\frac{|x|}{\lambda_D}\right) \quad (1.10)$$

Sendo:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K_B T}{ne^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Observamos que o comprimento de Debye é dependente tanto da densidade quanto da temperatura das partículas presentes no plasma. O resultado generalizado por Debye e Huckel, pode ser escrito como sendo:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K_B T}{\sum_{j=1}^N n_j q_j^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.12)$$

Onde o índice j denota, o tipo de partícula presente no plasma, vale lembrar que essa grandeza também aparece em semicondutores e outras configurações elétricas. O número de partículas na esfera de Debye pode ser deduzido através dessa mesma fórmula sendo dado por:

$$N_D = \pi n^{\frac{4}{3}} \lambda_D^3 \quad (1.13)$$

Tendo em vista a definição formal e entendido o comportamento coletivo e a quase-neutralidade do plasma, podemos criar critérios para que um gás ionizado seja plasma. São eles:

- $\lambda_D \ll L$  O comprimento da esfera de debye deve ser muito menor que o tamanho total do plasma.

- $N_D \gg 1$  O número de partículas na esfera de Debye deve ser muito maior que um.
- O período entre as colisões vezes a frequência de colisão do plasma deve ser muito maior que 1. Esse argumento deve ser explorado com cuidado, pois é o principal critério que diferencia um plasma de um gás ionizado. Num gás ionizado, temos as características acima, no entanto as colisões são frequentes. Num plasma essas colisões são quase inexistentes, devido ao livre caminho médio das partículas, que num plasma é relativamente grande, pois caso contrário o plasma é instável.

Sendo assim, caso as três condições sejam satisfeitas o estado de plasma é formado. Essas definições são importantes, já que, muitas vezes confunde-se um gás ionizado com plasma, causando um tratamento errôneo do problema. Portanto esses critérios são de extrema importância para se considerar um sistema, um sistema de plasma e utilizarmos as ferramentas de física dos plasmas no tratamento do problema.

### 1.1.2 Ondas hélicon em plasma magnetizados

Quando ionizamos um gás utilizando uma onda eletromagnética helicoidal, ou onda hélicon ela gera plasma de altas densidades eletrônicas e ondas helicon dentro do plasma.

Ondas do tipo Hélicon, são ondas eletromagnéticas de baixa frequência, que atuam entre as frequências ion e eletro ciclotrônicas ( $\omega_i$  e  $\omega_c$ ) possuindo a capacidade de criar plasmas de alta densidade. A geração de plasma de altas densidades já é conhecida e de acordo com (ELLINGBOE; BOSWELL, 1996) possui alguns parâmetros já conhecidos como campos magnéticos de 5 – 500 mT, frequências entre 2 – 40 Mhz e comprimentos de ondas axiais de 10 – 50cm, que costumam gerar esse tipo de plasma. Esse tipo de onda é classificada como uma R-Wave, ou ondas circularmente a direita, ou onda polarizada para a direita, sendo relacionada fortemente também com uma onda whistle. A relação de dispersão para ondas circularmente a direita é dada simplesmente pela:

$$\beta = \frac{\omega_p}{k} \frac{n_e \mu_0}{B_0} \quad (1.14)$$

Onde  $\beta^2 = k^2 + k_{\parallel}^2$  sendo  $k$  o número de onda total, e  $n_0$  é a densidade do plasma. A equação de dispersão de uma onda hélicon em um plasma pode ser deduzida através das equações 1.2-1.6 e da equação 1.14 sendo bastante conhecida por A. R. Ellingboea e R. W. Boswell em (ELLINGBOE; BOSWELL, 1996) e é dada pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{\mu_0 n_e e \omega}{B_0 \sqrt{k_{\parallel}^2 (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2)}} - 1 \quad (1.15)$$

onde temos  $k_{\parallel}$  e  $k_{\perp}$  sendo os números de ondas paralelos e perpendiculares ao campo magnético  $B_0$  respectivamente.

As aplicações deste tipo de fonte de plasma são de grande importância atualmente. Sendo as principais delas tratamento de materiais com plasmas, lasers de argônio e  $CO_2$  uma das principais é a sua aplicação em propulsão elétrica.



## 2 Propulsão Elétrica

A propulsão elétrica (EP) é um tipo de propulsão que usa princípios puramente eletromagnéticos, por exemplo, campos magnéticos, ionização, campos elétricos e etc, para a geração de propulsão em satélites, espaçonaves entre outros. O objetivo dessa tecnologia é alcançar altas velocidades de exaustão e assim diminuir o uso de propelente, aumentar a manobrabilidade entre outras vantagens possibilitando o aumento da complexidade das missões aeroespaciais. Sendo assim, a propulsão elétrica surge como uma alternativa aos métodos clássicos de propulsão, buscando um uso melhor do propelente e maior viabilidade para missões complexas.

### 2.1 Uma breve história da propulsão elétrica

A história da propulsão elétrica inicia nos primeiros anos do século XX, caminhando juntamente com a história da propulsão de foguetes no geral. De acordo com o Prof. Edgar Y. Choueiri, no trabalho "*A Critical History of Electric Propulsion: The First Fifty Years (1906-1956)*" (CHOUEIRI, 2004) podemos dividir a história da EP em "*Eras*", cada qual dotada de suas próprias características e utilidades.

#### 2.1.1 A era dos Visionários (1906-1946)

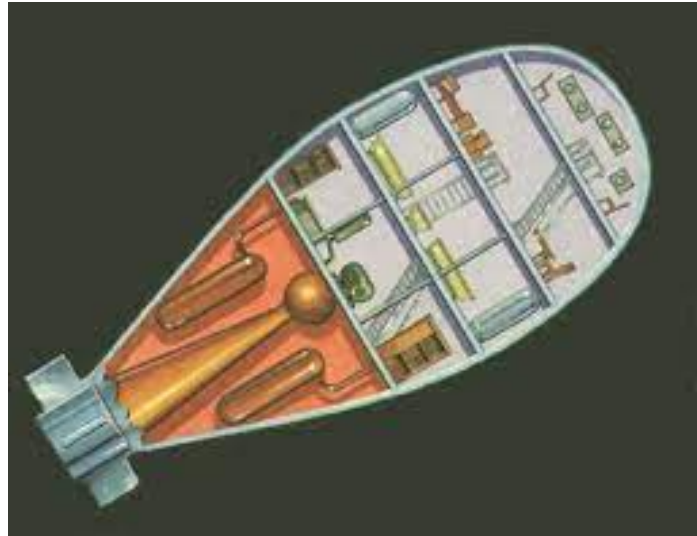
A era dos visionários, marcada pelas idealizações revolucionárias que levaram ao nascimento do estudo da propulsão e a idealização dos primeiros dispositivos, nessa fase os princípios mais fundamentais foram desenvolvidos e trabalhados a exaustão.

A era inicia em 1903 com o trabalho de Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky "*Exploration of the Universe with Reaction Machines*"(TSIOLKOVSKY, 1903), nesse trabalho Tsiolkovsky deduz a famosa equação do foguete ao propor uma solução para melhorar a altitude de foguetes na atmosfera, também propõe nesse artigo um projeto de espaçonave semelhante a um balão. Nesse mesmo artigo, Tsiolkovsky, propo que os raios catódicos observados no tubo de Crookes, são acompanhados por uma emissão de elétrons à uma velocidade maior que a emissão de átomos de Helium. Logo, já propunha a ideia de que fosse usado a emissão de elétrons ao invés da emissão de alguma outra partícula para a propulsão.

Logo após, em 1906, Robert H. Goddard físico pesquisador em eletricidade notou a capacidade de se usar os conceitos eletromagnéticos, em alta na época, para a propulsão aeroespacial. As primeiras ideias de Goddard, ficaram apenas em seu caderno de anotações, onde ele listava os principais problemas e dificuldades que poderiam ser



(a) Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky



(b) Foguete proposto por Tsiolkovsky

Figura 2 – O foguete foi projetado pelo mesmo, e sendo publicado no mesmo artigo que a equação do foguete. Fonte: Wikipedia, ([TSIOLKOVSKY, 1903](#))

enfrentadas para a geração de propulsão via conceitos elétricos. Somente em 1917, depois de algumas patentes que visavam a ionização de partículas, Goddard publica o que seria considerado o primeiro acelerador iônico documentado nos Estados Unidos. No entanto, também em 1917, quando os Estados Unidos entram na Primeira Grande Guerra, o cientista que tanto idealizava a propulsão elétrica começa a dedicar-se quase exclusivamente ao desenvolvimento de foguetes para uso militares.

Outros nomes importantes para essa era são: Hermann Oberth e Shepherd and Cleaver. Ambos europeus que também buscavam a propulsão elétrica e tiveram grandes contribuições para a era visionária da propulsão.

### 2.1.2 A era dos Pioneiros (1946-1956)

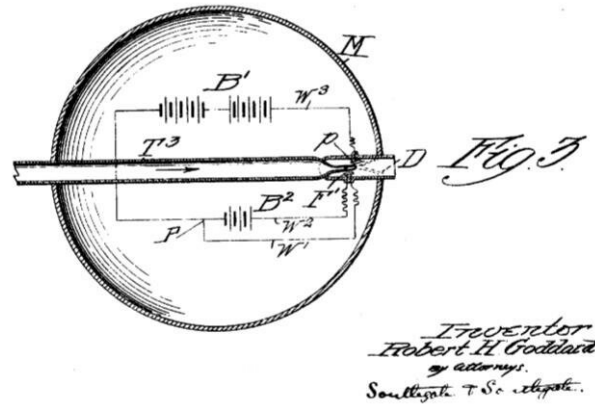
A era dos pioneiros é marcada pelos primeiros protótipos e pelos avanços técnicos da propulsão. Nessa fase que foi impulsionada e pela Segunda Grande Guerra e a Guerra fria tem início logo após a era visionária em 1945. Nessa época também houve vários avanços nas áreas que guiavam a propulsão, como a ciência de foguetes, ciência de partículas, ciência dos materiais, relatividade geral entre outras áreas.

Os avanços nas áreas adjacentes trouxeram diversas possibilidades para a propulsão elétrica. Nessa fase também iniciou-se o amadurecimento e concepção dos primeiros protótipos de propulsores iônicos, não por grupo de cientistas e grandes equipes, mas por





(a)



(b)

Figura 3 – Robert H. Goddard (3a) considerado o pai da propulsão e dos foguetes químicos dos Estados Unidos. Patente do acelerador de íons proposto por Goddard (3b. Fonte: Wikipedia, (GODDARD, 1920)

cientistas individuais e que buscavam alcançar a tão sonhada viagem espacial. Um nome de grande destaque é Ernst Stuhlinger, que nessa era começa a analisar sistematicamente sistemas de propulsão elétrica e a viagem espacial como um todo. Essas análises contribuíram para o desenvolvimento dos primeiros grupos de pesquisas exclusivamente dedicados a construção de propulsores elétricos.

### 2.1.3 A era de Desenvolvimento (1956-1980)

A era do desenvolvimento é marcada pela criação de grupos de pesquisa exclusivos para o desenvolvimento desses propulsores, e os primeiros lançamentos. Além disso, essa fase acontece no ápice da Guerra Fria e da Corrida espacial.

Nessa época, os propulsores eram principalmente químicos usando como propelentes de mercúrio e césio. No entanto graças a corrida espacial, o grupo "Lewis Research Center" da NASA na década de 1960 lança o primeiro propulso iônico no espaço. A SERT-1 foi a primeira espaçonave equipada com um motor deste tipo, funcionando por 30 minutos em uma órbita suborbital, usando mercúrio como propelente.

### 2.1.4 A era da aceitação (1980-1992)

A era da aceitação é marcada pela aceitação dessa tecnologia.

Tendo em vista as vantagens apresentadas pela EP, como o alto empuxo específico



Figura 4 – Ernst Stuhlinger pioneiro da ciência dos foguetes. Fonte: Wikipedia

e o baixo uso de propelentes, a propulsão elétrica começou a ser aceita na comunidade como um todo. Sendo cotada e mais amplamente estudada durante essa época.

### 2.1.5 A era das aplicações (1993-Presente)

A era das aplicações, e atual, é a era marcada pelas aplicações dessas tecnologias nas viagens espaciais. Nessa época há um "BOOM" de desenvolvimento de novos tipos de propulsores e a EP consolidando sua dominância como método preferível de propulsão.

Aqui a aplicação e melhoria dos propulsores do Tipo Hall, propulsores iônicos entre outros é colossal. Um fator que gerou essa impulsão é a criação dos famosos CubeSats, que incentivaram esse método de propulsão por serem pequenos e de fácil manejo. Outros tipos de propulsores também emergiram nessa fase, como é o caso do propulsor VASIMIR, HPT entre outros.

## 2.2 Propulsores elétricos

Essa seção é dedicada a explicação dos propulsores atuais mais relevantes. Muitos surgiram na era das aplicações outros são mais fundamentais. Podemos ainda subdividir em tipos baseando-se nos princípios usados.

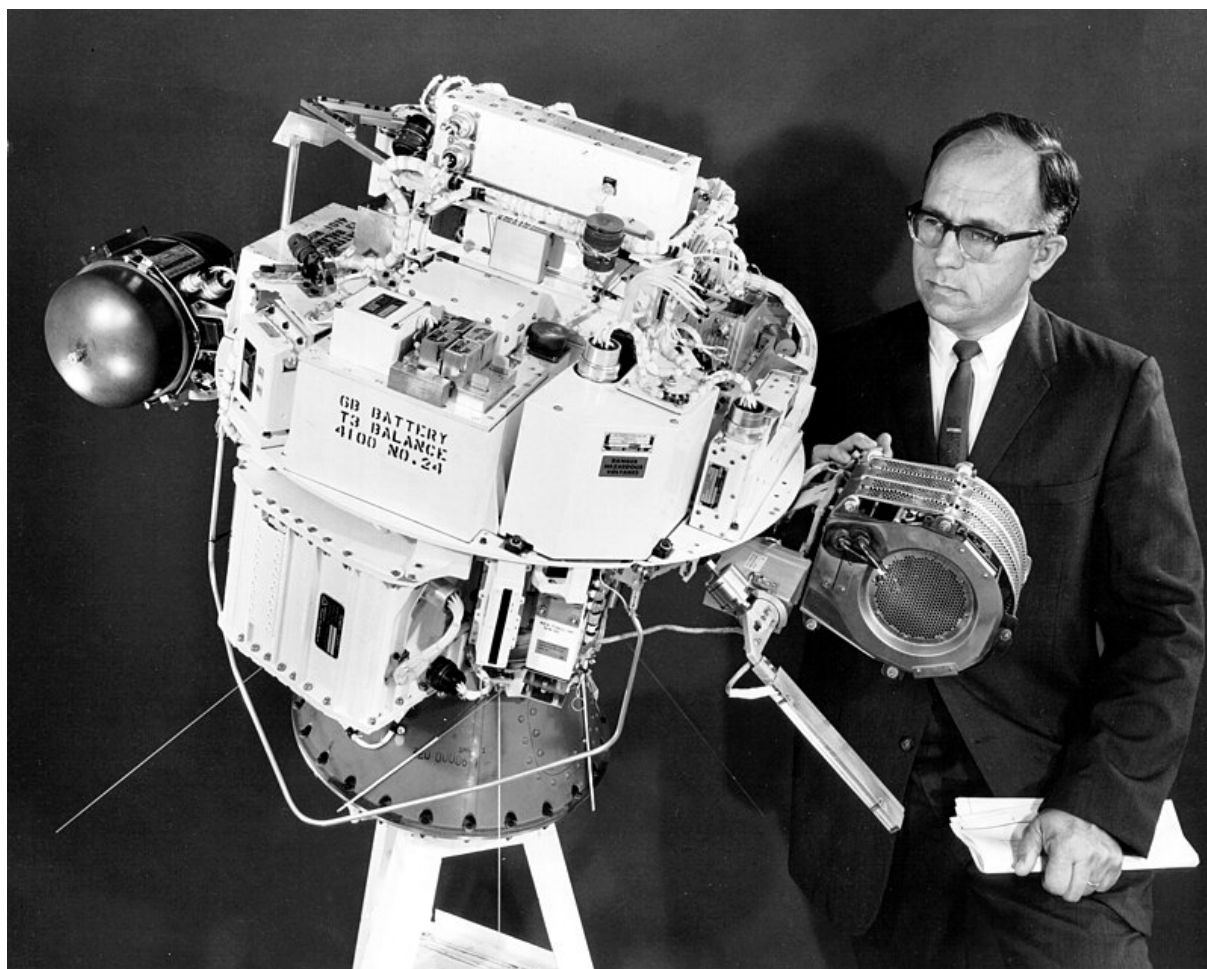


Figura 5 – Propulsor SERT-1 desenvolvido pelo Lewis Research Center. Fonte: NASA

## 2.2.1 Propulsores Termoelétricos

Os propulsores termoelétricos usam de uma mistura de princípios elétricos e térmicos para seu funcionamento. Geralmente, aqui o gás é aquecido eletricamente e sua energia térmica é usada para a propulsão.

### 2.2.1.1 Resistojets

Um resistor jet é um propulsor baseado na ejeção de um gás aquecido eletricamente. Aqui algum aquecedor, este podendo ser um resistor ou até as paredes do recipiente, aquece o gás que logo após é expelido gerando assim a propulsão.

Os resistojets usam geralmente hidrazina como propelente e alcança velocidades de exaustão de  $3500\text{ m/s}$ , aproximadamente  $0,3N$  de propulsão à uma eficiência de 80% em uma potência de  $750\text{ W}$  (JAHN; CHOUERI, 2003)

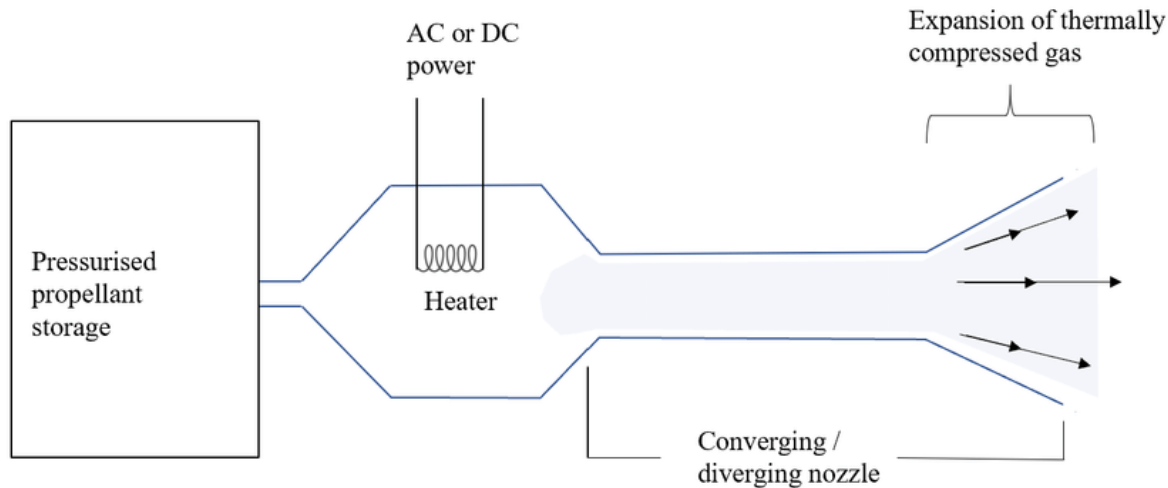


Figura 6 – Esquemática do funcionamento de um resistor JET. Fonte: (O'REILLY; HERDRICH; KAVANAGH, 2021)

### 2.2.1.2 Arcjets

Os arcjets, ou propulsores a arco, são propulsores que funcionam semelhantemente aos resistorjets a diferença é que o aquecimento do gás é feito por algum arco, uma corrente de centenas ou milhares de amperes, que atravessa o corpo. Esse tipo de propulsor consegue gerar velocidades de exaustão consideravelmente altas devido ao aquecimento elevado causado pelo arco. O esquema é semelhante ao esquema dos resistorjets a diferença aqui é o método de aquecimento do gás.

Usam também a hidrazina como propelente, no entanto, operam em altas potências, por exemplo,  $1,5 \text{ kW}$  alcançando velocidades de exaustão de  $5000 \text{ a } 6000 \text{ m/sec}$

## 2.2.2 Propulsores Iônicos

Outro grande tipo de propulsor, são os propulsores iônicos, eles utilizam de princípios eletrostáticos para gerar propulsão. Utilizando a interação de um campo elétrico com as partículas carregadas que são impelidas para fora do reservatório.

De acordo com (JAHN; CHOUEIRI, 2003), as partículas são geradas por um ionizador e arremessadas na direção de um campo elétrico que irá acelerar os íons para fora. Nesse caso, como estamos literalmente "jogando fora" partículas carregadas é necessário que eles sejam neutralizados na saída, portanto esse tipo de propulsor geralmente tem consigo um neutralizador por fora evitando assim um ganho de material pelo satélite ou espaçonave. Podem possuir campos magnéticos axiais e radiais para incentivar a propulsão

De acordo com (JAHN; CHOUEIRI, 2003), os propelentes mais utilizados nesse tipo são xenônio e mercúrio operano num regime de  $0.25 \text{ T}$  e  $30 \text{ V}$ .

É comum esses propulsores serem chamados de propulsores gradeados. Já que a separação de partículas é feita usando-se grades que separam elétrons de prótons e etc.

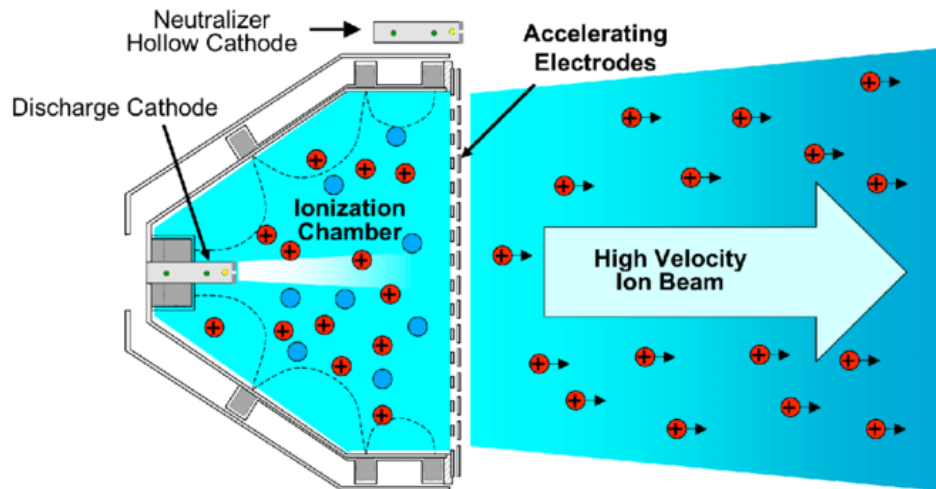


Figura 7 – Esquemática do funcionamento de um propulsor iônico. Fonte: (GOEBEL; WIRZ; KATZ, 2007)

### 2.2.3 Propulsores do Tipo Hall

De acordo com (JAHN; CHOUERI, 2003) e (TURNER, 2008), esse tipo de propulsor baseia-se na utilização de campos magnéticos relativamente altos e plasmas de baixa densidade. A propulsão ocorre devido ao efeito Hall, onde um campo magnético prende as partículas carregadas em órbitas criando uma corrente, chamada "corrente hall", onde é aplicado um campo elétrico gerando assim o efeito Hall. O efeito Hall é explicado detalhadamente no Apêndice 6.4.

O Laboratório de Física dos Plasmas da Universidade de Brasília possui um exemplar desse tipo em desenvolvimento para satélites comerciais e também para micro e nano satélites.

Vemos então que aqui a propulsão é gerada por dois tipos de propulsão, uma devido ao efeito Hall e outra devido a efeitos eletrostáticos. A propulsão devido o efeito Hall se dá pelas partículas ganharem uma componente na direção  $\vec{E} \times \vec{B}$  induzindo seu movimento nessa direção. No entanto, o tipo de propulsão predominante é a propulsão eletrostática, devido ao campo elétrico do ânodo. Ainda assim há o problema de apenas um tipo de partícula ser impulsionado para fora do propulsor e a necessidade de se utilizar um catodo neutralizador para manter a neutralidade do sistema.

Esse propulsor é amplamente utilizado na indústria e de acordo com (WRIGHT; FERRER, 2015) é o grande fabricado no mundo, possuindo o maior número de laboratórios pesquisando e desenvolvendo modelos e melhorias no mundo.

As especificações desse tipo de propulsor, de acordo com (JAHN; CHOUERI, 2003) são: altas velocidades de exaustão, aproximadamente  $16000 \text{ m/sec}$ , um empuxo de  $40 \text{ a } 80 \text{ mN}$ , voltagens de  $200 \text{ a } 300 \text{ V}$  com um fluxo de massa de xenônio de  $2 \text{ a } 5 \text{ mg/sec}$ . Vemos então que a eficiência desse tipo de propulsor é bem alta e acaba sendo utilizada

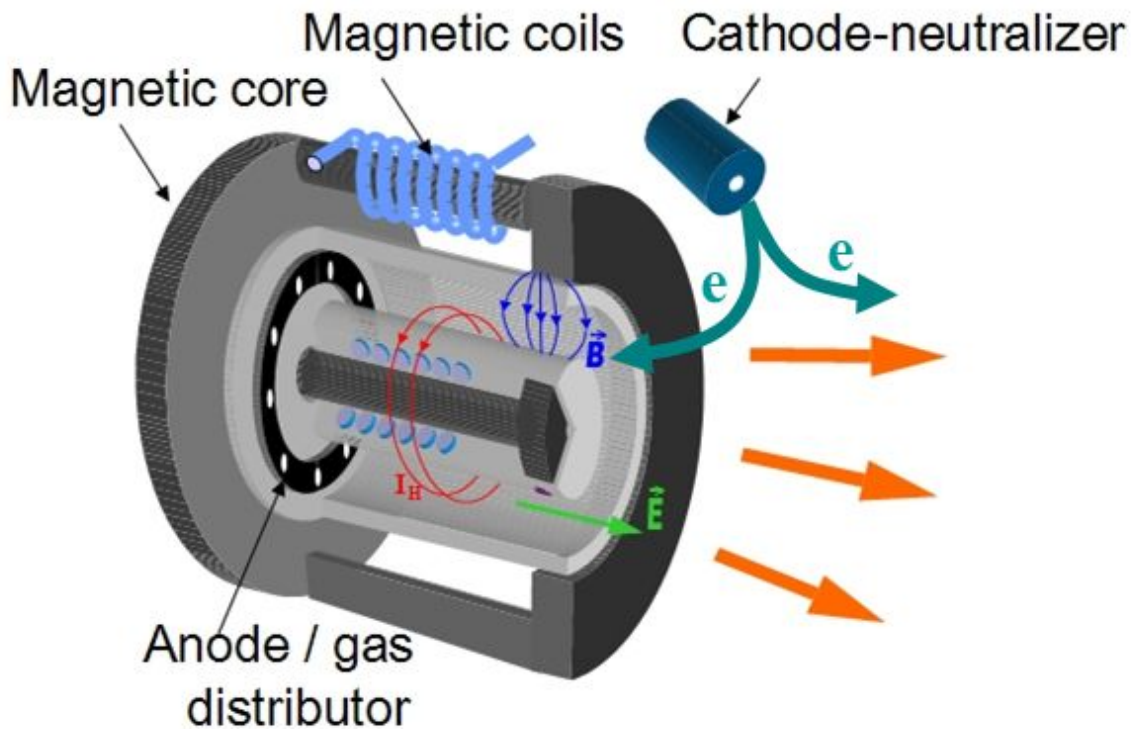


Figura 8 – Esquema de um propulsor Hall. Fonte: [Princeton Plasma Physics Laboratory](#)

amplamente para a propulsão de micro satélites, cubesats e pequenas aeronaves. O PHALL possui um empuxo maior, enquanto o PÍON, outro tipo de propulsor do tipo hall, possui um impulso específico maior.

#### 2.2.4 Propulsor ambipolar

A categoria no qual o propulsor estudado nesse trabalho se encaixa, é o propulsor ambipolar. Esse tipo de propulsor é o preferido para a propulsão de cubesats. Ao contrário dos outros propulsores que geralmente impulsionam só um tipo de partículas, o propulsor ambipolar recebe esse nome por impulsionar tanto elétrons quanto íons, produzindo assim um feixe neutro e dispensando o uso de cátodos ociosos ou neutralizadores.

O esquema geral de um propulsor ambipolar pode ser visto na figura 9.

Aqui o plasma é gerado por RF, através de antenas e confinado num campo magnético. O campo magnético irá guiar as partículas na direção de ejeção criando assim um cúspide magnética que gerará a propulsão. Há diversas configurações para esse tipo de propulsor, a estudada nesse trabalho é a configuração HPT (Helicon Plasma Thruster), onde o plasma é aquecido por ondas hélicons oriundas de uma antena helicoidal.

Outro tipo de propulsor ambipolar que vem ganhando destaque é o propulsor VASIMIR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket), que é um propulsor que permite

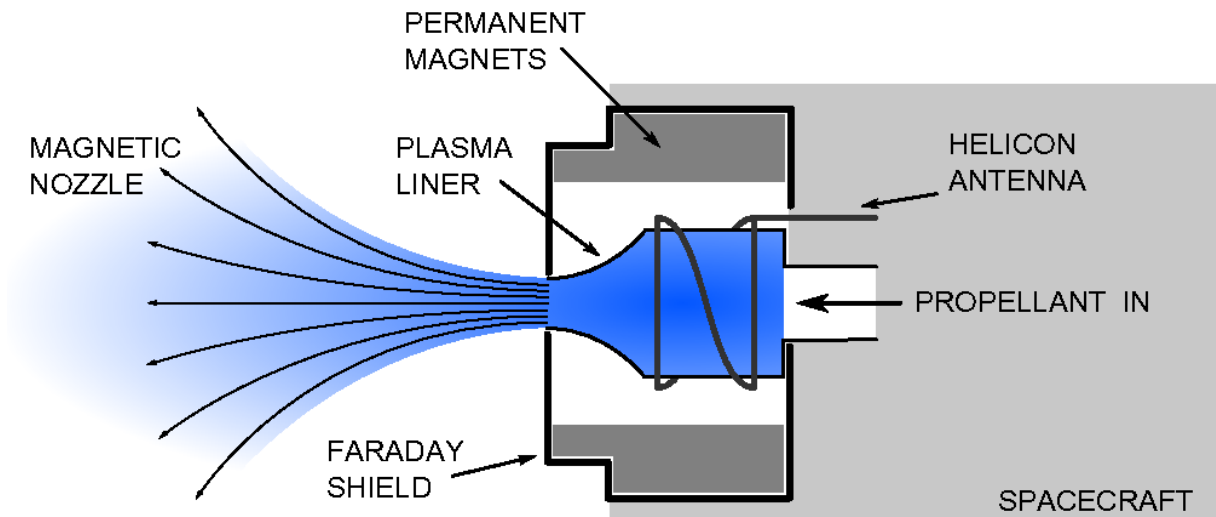


Figura 9 – Funcionamento de um propulsor ambipolar. Fonte:

o ajuste do impulso específico à uma potência constante, permitindo a manipulação do empuxo e do  $I_{sp}$ .

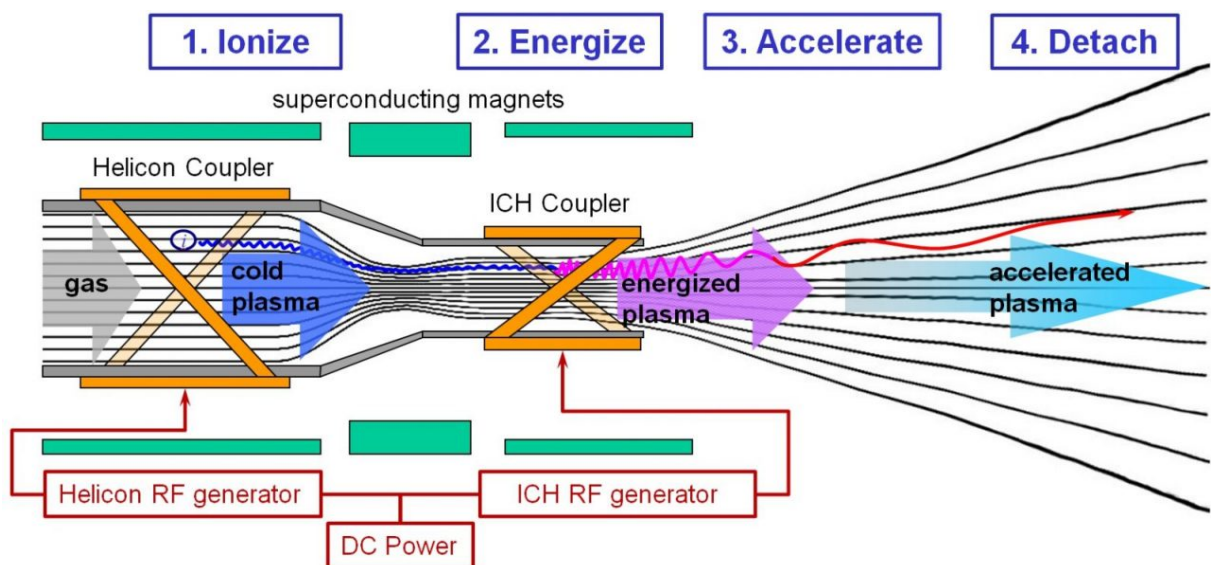


Figura 10 – Esquema de um propulsor ambipolar do tipo VASIMIR. Fonte: [Ad Astra Rocket Company](#)

De acordo com (TURNER, 2008) o propulsor do tipo VASIMIR é um dos grandes candidatos para a propulsão elétrica, já que apresenta uma gama de complexidade e manejo que não é visto hoje em dia. No entanto, esse tipo de propulsor ainda está nos estágios iniciais de desenvolvimento, existindo apenas alguns exemplares em laboratório.

### 2.2.5 O propulsor de plasma Helicoidal (HPT)

O propulsor a plasma helicoidal, HPT da sigla em inglês, é um propulsor do tipo HDLT (Helicon double Layer Thruster) que usa uma configuração baseada em um câmara

de vácuo envolta por duas bobinas magnéticas, podendo ser substituída por imãs permanentes em alguns casos, e uma antena helicoidal. Semelhante a um propulsor ambipolar, ambos possuindo uma geometria bem semelhante.

Nesse caso, o gás é injetado no tubo onde recebe ondas hélicons, provenientes da antena que possui um sinal oscilante. As ondas são absorvidas pelas partículas, aumentando assim sua energia cinética e aumentando a temperatura do gás. A descrição desse tipo de onda pode ser visto com detalhes na seção 1.1.2.

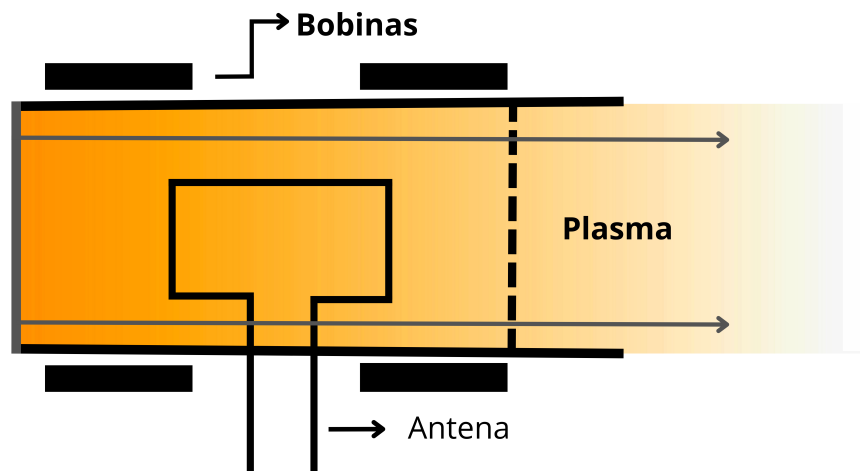


Figura 11 – Esquemática de um propulsor do tipo HPT usada no Laboratório de Física dos Plasmas da UnB. Fonte: Autoral

As linhas do campo magnético guiam as partículas carregadas na direção de ejeção e criam uma cúspide, ou tubeira, magnética cujo formato divergente das linhas de campo contribuem para a ejeção das partículas.

#### 2.2.5.1 Camadas duplas em HPT

Esse tipo de configuração possui uma particularidade, ela pode gerar uma camada dupla. Esses fenômeno foi observado primeiramente por (CHARLES; BOSWELL, 2003) em plasmas hélicon de alta densidade. Nele é observado uma queda abrupta na densidade eletrônica e no potencial de plasma.

As camadas duplas são formações elétricas que implicam em duas camadas, uma negativa e outra positiva, que suportam um campo elétrico local. Podem ser geradas por diversos motivos, sendo um deles uma queda abrupta no potencial levando a criação de uma corrente de partículas interna. Vale ressaltar aqui que as camadas duplas são formações locais e não afetam o plasma como um todo, logo o plasma continua sendo uma configuração neutra.

O esquema de uma camada dupla pode ser observado na figura 12.



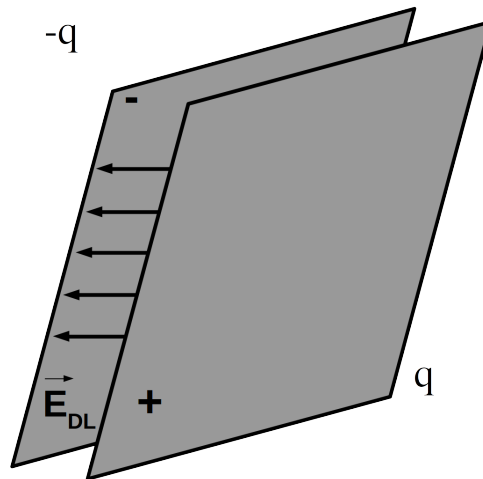


Figura 12 – Esquema de uma camada dupla. Fonte: Autoral

De acordo com (LANGMUIR, 1929), essa camada forma-se pela mudança na velocidade das partículas, os íons se movem mais devagar enquanto os elétrons se movem mais rapidamente criando regiões de polaridade contrárias gerando um campo elétrico entre elas. Nesse mesmo artigo L. Langmuir trabalha detalhadamente a teoria dessas camadas descrevendo propriedades importantes da mesma. A camada dupla é formada então pela formação de duas camadas de cargas opostas no interior do plasma. O campo elétrico resultante desta separação está em geral associado a turbulência localizada no plasma que introduz uma resistividade anômala.

De acordo com (BLOCK, 1978), em sua revisão sobre DLs, onde uma definição mais formal de uma DL segue três parâmetros básicos:

1. A queda de potencial ( $\phi_{DL}$ ) deve seguir a relação

$$|\phi_{DL}| > \frac{K_B T}{e} \quad (2.1)$$

Onde T é a temperatura do plasma nas bordas da camada dupla.

2. O campo elétrico  $E_{DL}$  dentro da DL é muito maior que o campos elétrico fora.
3. A quasineutralidade é violada na região da DL

Esses parâmetros são elucidados quando observamos os gráficos da configuração de uma camada dupla graficamente.

Observando a figura 13, observamos o aumento gradativo no campo elétrico e a queda da DL, também observamos que há uma polarização em relação ao espaço, demonstrando como a densidade de cargas muda em uma DL. Portanto, a configuração do

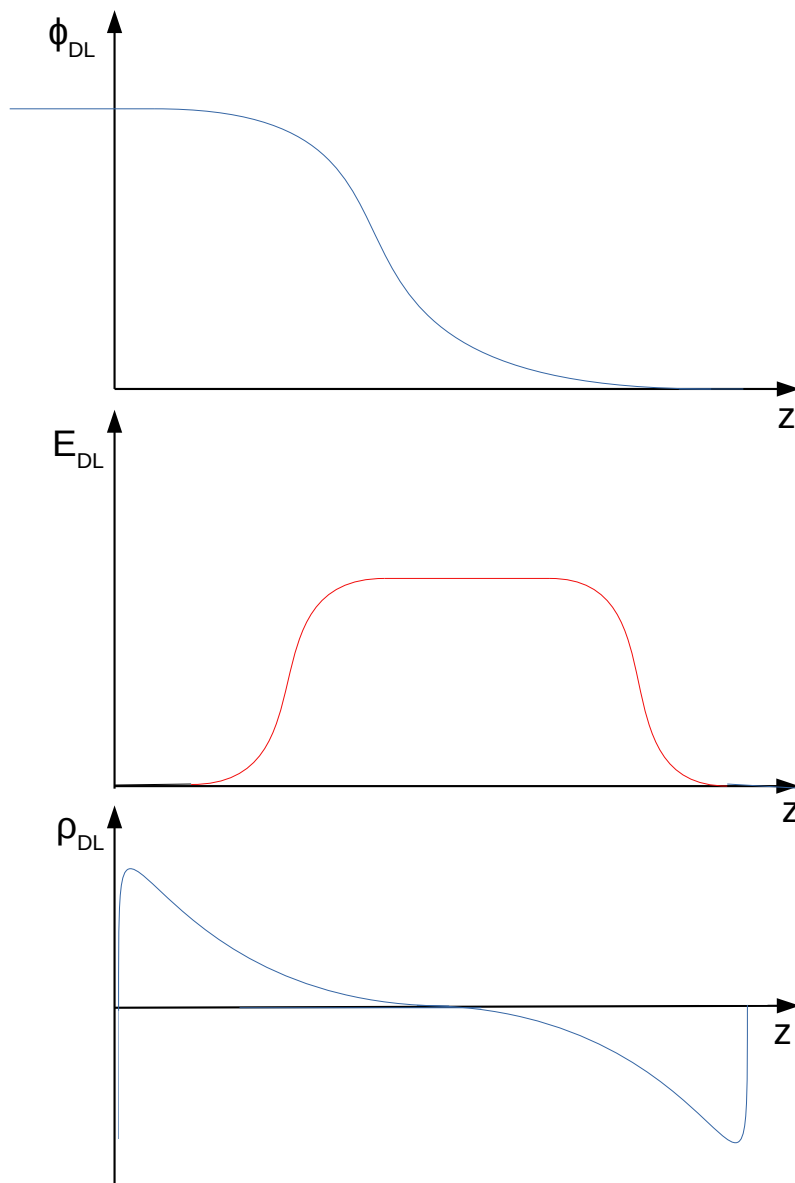


Figura 13 – Configuração gráfica das propriedades da DL's. Fonte: (BLOCK, 1978)

HPT consiste também na presença de uma DL que deve ser caracterizada e apresentar uma queda abrupta no potencial.

Sendo assim, introduzidos os principais tipos de propulsores agora podemos focar no trabalho em sí. Aqui a montagem e a caracterização de uma queda abrupta no potencial do sistema é o foco principal do trabalho.

## 3 Metodologia

A metodologia do trabalho é dividida em três fases: planejamento, construção e caracterização do sistema. O planejamento consiste no projeto CAD, escolha dos materiais de construção do sistema e simulações feitas para o campo magnético. A construção é fase de montagem do sistema e onde são realizados os primeiros testes de vácuo do sistema. Já a caracterização teremos duas subpartes aqui: caracterização do campo magnético e a caracterização dos parâmetros de plasma, além da busca pelo perfil especificado na figura 13 de potencial de plasma

### 3.1 Planejamento

O planejamento do propulsor foi feito por dois membros do Laboratório de Física dos Plasmas: O técnico Júlio César de Melo Almeida e William Wenner Teixeira Sinésio usando um programa de CAD chamado fusion 360, onde foi feito um modelo 3D enquanto o planejamento do campo magnético foi feito usando o programa Finite Element Method Magnetics (FEMM).

#### 3.1.1 CAD do propulsor

Seguindo a esquematização da figura 11, nele consideramos um tubo de aproximadamente 80cm, circulado por duas bobinas apoiadas em trilhos paralelos. O equipamento foi apoiado em duas mesas, uma constituída de uma chapa metálica com um buraco no meio para conexão da bomba difusora enquanto a outra é uma mesa de cimento com uma superfície de madeira.



(a)



(b)

Figura 14 – CAD 3D da mesa já com o propulsor e as bombas posicionadas. Fonte: Júlio César de Melo Almeida

No planejamento escolhemos uma placa de metal, não sendo o ideal. No entanto havendo a necessidade de se possuir um referencial de potencial optamos pela mesa. A

necessidade de se ter um referencial surge pois a Universidade de Brasília possui muito ruído na rede elétrica, necessitando a criação de um terra isolado, ou até mesmo um transformador de isolamento galvânico de entrada e saída um para um. Outra justificativa para a escolha da placa de metal é que evita uma degradação rápida. A antiga placa de madeira que segurava o antigo espelho magnético com o tempo deteriorou-se e acabou cedendo ao peso da bomba difusora.

Outro ponto a ser notado é a flange dielétrica. Em simulações do aluno Renan Almeida, membro do LFP-UnB, observa-se que a flange condutora criava no plasma um desvio das partículas elétrica. Sendo assim, observa-se a criação de um potencial elétrico que acaba atrapalhando a propulsão do HPT. Portanto planejou-se primeiramente trocar a flange por acrílico, esta chegou a ser montada e testada no vácuo, no entanto, observou-se que o acrílico não suportava o vácuo desejado e decidiu-se usar o material Polióxido de Metileno (poliacetal).

O Polióxido de Metileno (POM), ou poliacetal, é um polímero descoberto em 1922. Este polímero vem ganhando destaque na indústria nos últimos anos, já que, descobriu-se a sua capacidade para substituir metal em algumas aplicações. Sendo um bom isolante além de também suportar bastante cargas de estresse, possuir boa rigidez e robustez e baixa capacidade de deformação, tornando-se ideal para suportar o vácuo desejado. O ponto negativo desse material é que seu ponto de ebulição é relativamente baixo  $\approx 448K$  ou  $175^{\circ}C$ , logo sua longevidade pode ser baixa devido a isso.

As propriedades do poliacetal podem ser visualizadas na tabela 1.

	Poliacetal (POM)
Temperatura de fusão ( $^{\circ}C$ )	225~250
Contração	0,5 a 0,7 %
Densidade ( $g/cm^3$ )	1.2
Temperatura de T.V ( $^{\circ}C$ )	145
Absorção de água	0.15%

Tabela 1 – Tabela das propriedades básicas do poliacetal. Fonte: ISOPLAST

Além disso, foi planejado os trilhos e os suportes para as bobinas. Os suportes para as bobinas foram feitos de madeira, já os trilhos são de metal. A justificativa para a elaboração dos trilhos é a necessidade de se testar diferentes configurações de bobinas e a possibilidade de novas geometrias pro problema, além de facilitar a remoção e a colocação da antena. O ponto negativo aqui é que teremos que deixar os metais dos trilhos também no mesmo referencial do sistema. Dito isso, Podemos agora planejar o campo magnético do sistema.

### 3.1.2 Simulação do Campo Magnético.

As simulações do campo magnético foram feitas usando-se o software Finite Element Method Magnetics (FEMM), esse programa possibilita a criação de sistemas eletromagnéticos e a execução de simulações. As dimensões das bobinas simuladas aqui são as condizentes com as bobinas disponíveis para a montagem de campo magnético do laboratório de física dos plasmas. A origem do sistema é considerada na flange do lado da bomba difusora.

Aqui queríamos uma configuração de campo magnético, onde o campo magnético fosse aproximadamente uniforme na área das bobinas e tivesse apenas uma direção, guiando os íons e as partículas carregadas para fora formando a cúspide magnética.

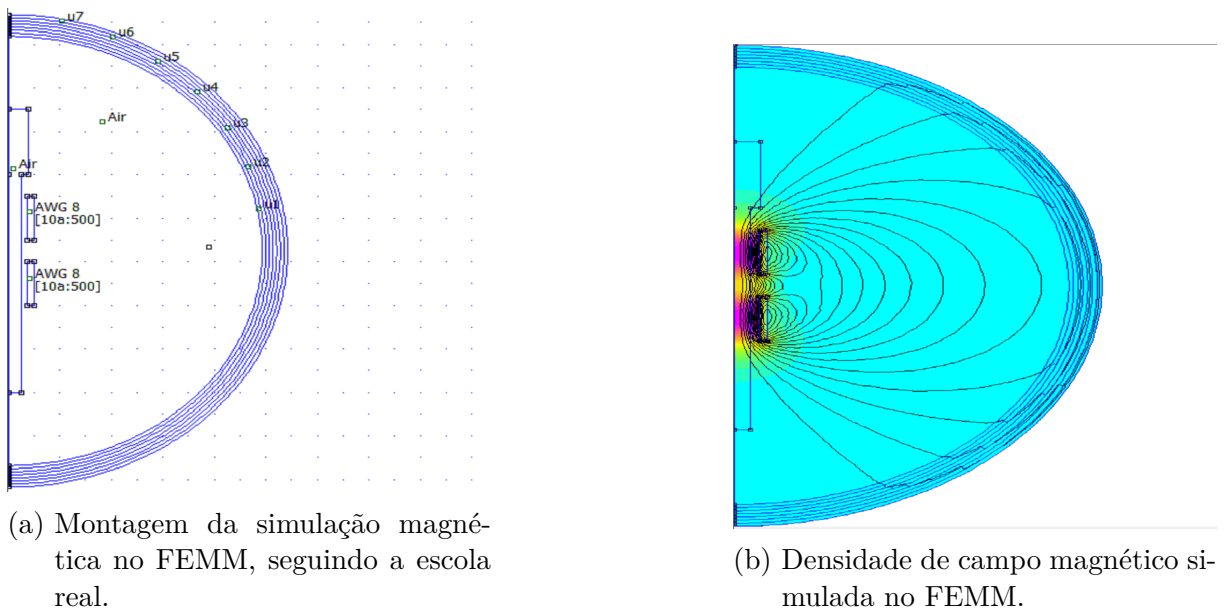


Figura 15 – Simulação do campo magnético no software FEMM. Fonte: Autoral

Observamos pela figura (15b), que a densidade do campo magnético é muito maior na bobina, como o esperado, e decai com o tempo. Essa configuração permite dois picos e a modelagem da cúspide magnética logo após o final da bobina perto das flanges. Podemos ver a configuração pelo gráfico da simulação, onde temos a intensidade do campo pela posição, na figura 16:

A configuração do campo magnético demonstrada na figura (16) é a típica configuração presentes em HPT's ao redor do mundo, além de bater com a configuração de campo das simulações do aluno Renan Almeida. Logo observamos que há a uniformidade desejada, onde o vale indica o espaço onde a antena helicoidal estará posicionada. O intuito é executar as medições onde estará localizada a cúspide magnética que é a região anterior ao primeiro pico.

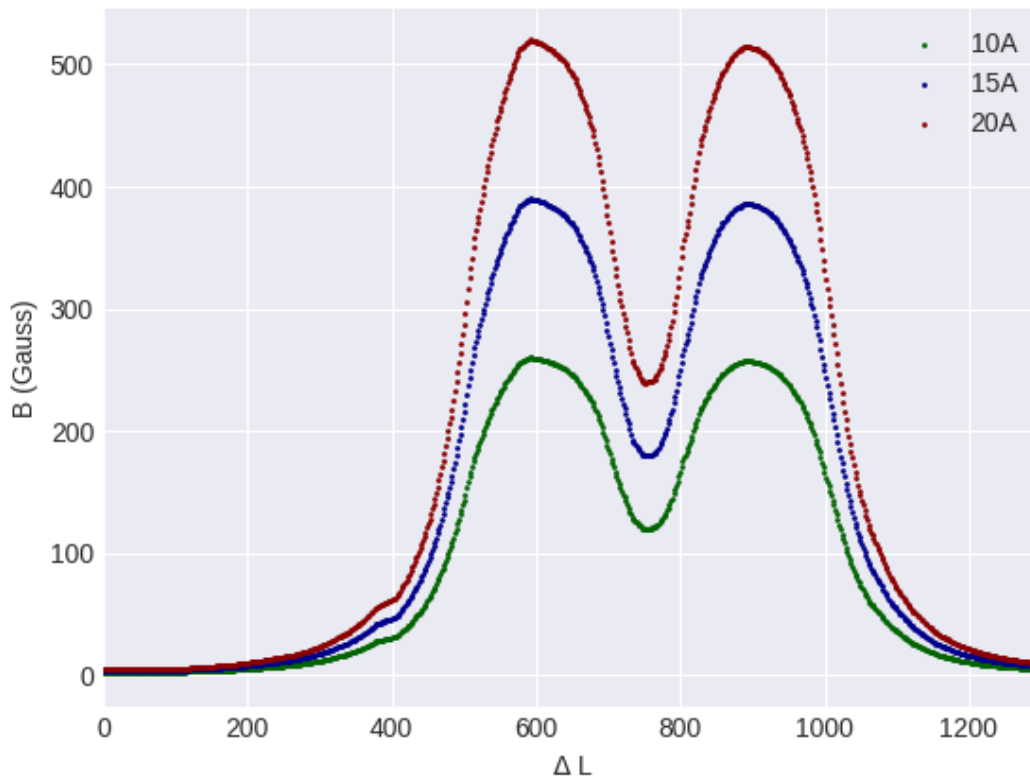


Figura 16 – Perfil de campo magnético para algumas correntes. Fonte: Autoral

### 3.1.3 Sistema para medida de parâmetros básicos de plasma com sonda de Langmuir

De acordo com o (CHEN, 2003) podemos construir um sistema e uma sonda simples para a medição das propriedades de plasma. O planejamento inicial é bem simples e visa muitas melhorias no futuro como a introdução de uma maneira automática de medição, tendo em vista que a medição manual é extremamente demorada, além de varreduras e algumas melhorias para a sonda. No entanto, o clássico sempre é confiável.

O sistema disposto na figura 17 é o sistema mais básico para medir a tensão de plasma. Aqui a bateria injeta um potencial na sonda, criando uma perturbação no plasma que gerará uma queda de potencial no resistor, a partir dessa queda podemos medir a corrente de íons e elétrons na sonda.

Um grande problema com esse método de medida é que as medidas são muito lentas. O ideal é que a varredura seja feita o mais rápido possível, visando evitar que os parâmetros de plasma mudem. No entanto, devido não disponibilidade de uma fonte de varredura, que seria responsável por variar rapidamente o potencial na sonda, a medida foi feita usando-se as boas e velhas mãos. No intuito de evitar que os parâmetros de plasma mudem, todo o sistema, inclusive os instrumentos de alimentação, foram todos colocados

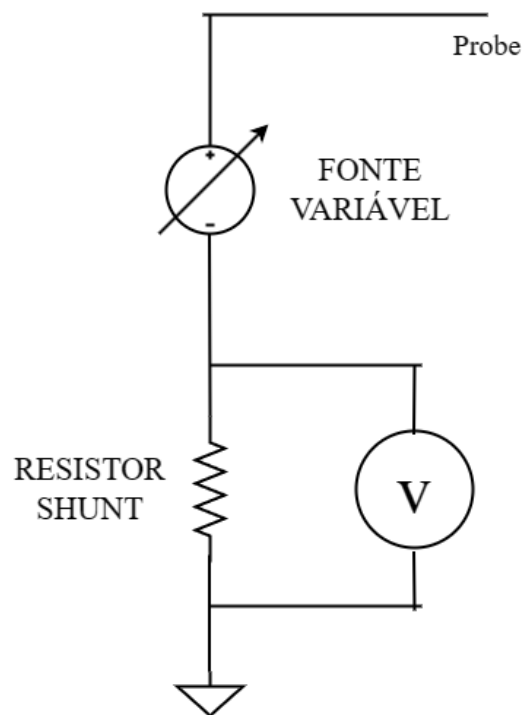


Figura 17 – Sistema eletrônico para a medição da queda de potencial. Fonte: (CHEN, 2003)

no mesmo referencial de potencial.

## 3.2 Montagem

A montagem do sistema consiste em: montagem do sistema de vácuo, montagem dos trilhos e bobinas magnéticas, montagem do sistema eletrônico.

### 3.2.1 Sistema de vácuo

O sistema de vácuo será constituído de duas câmaras cilíndricas, conectadas por uma flange dielétrica, como na figura 14. O primeiro instrumento a ser montado foi a bomba difusora e a placa de metal que conecta as duas mesas, para ela foi montado um suporte de metal para suportar seu peso e não imprimir o peso na placa de metal. A bomba é conectada a câmara de vácuo através de uma flange de metal, e um buraco que atravessa a mesa. Como pode ser visto na figura 18:

A mesa de metal é uma mesa de alumínio de 10mm de espessura, ela foi escolhida para substituir a antiga mesa de madeira que acabou entortando devido ao tempo. já o suporte da bomba difusora é para evitar que a bomba fique apoiada na própria mesa, tendo em vista que, na montagem experimental anterior, a mesa de madeira acabou entortando por conta do peso da bomba.



(a) Montagem de bomba difusora.  
Fonte: LFP - UnB



(b) Montagem da mesa de metal.  
Fonte: LFP - UnB

Figura 18 – Montagem da bomba difusora e da mesa de metal, ambas em conjuntos. Observe o que na montagem final a flange de conexão já foi colocada.

Logo após posicionou-se a bomba mecânica. A bomba mecânica é uma bomba da Edwards que irá servir como bomba introdutória no vácuo do sistema levando até a zona de ação da bomba difusora. O funcionamento dessas bombas é melhor explicado no apêndice 6.2. A bomba mecânica utilizada no trabalho pode ser visualizada na figura 19.

A segunda parte da montagem do sistema de vácuo, foi o posicionamento dos tubos de vidro, primeiramente conectou-se os tubos através das flanges. As flanges foram usinadas no laboratório de Mecânica do instituto de física da Universidade de Brasília pelo Mecânico Edílson funcionário do laboratório. As flanges foram feitas de poliacetal, material plástico e isolante elétrico, e posicionadas na conexão dos dois tubos, como mostrado na figura 20.

Os tubos de vidros, são tubos de vidro clássico de 5mm de espessura. O menor é um vidro de 10 cm de diâmetro externo, possuindo 100 cm de comprimento. Já o tubo maior é um tubo de 25 cm de diâmetro externo, possuindo 45 cm de comprimento. O tubo menor é destinado ao confinamento do plasma já o tubo maior é destinada a inspeção do plasma, lá sera colocada a sonda de langmuir. Logo após, a câmara de vidro completa, já ligadas pela flange, foram conectadas ao sistema da bomba difusora. A montagem final





Figura 19 – Bomba mecânica da Edwards utilizada no sistema de vácuo. Fonte: LFP - UnB

dos dois tubos é visualizada na figura 21.

Além da câmara de vidro, outras componentes de vácuo foram utilizadas para a melhora do vácuo do sistema, como O-rings e a graxa de vácuo. A graxa de vácuo utilizada é uma Molykote HVG e serviu para evitar vazamentos e ajudar a fixar o sistema no seu estado. Além disso, alguns medidores do tipo Pirani e Penning, da Edwards, foram utilizados para medições de pressão dentro da câmara. O funcionamento dos medidores Penning e Pirani são explicados no 6.3.

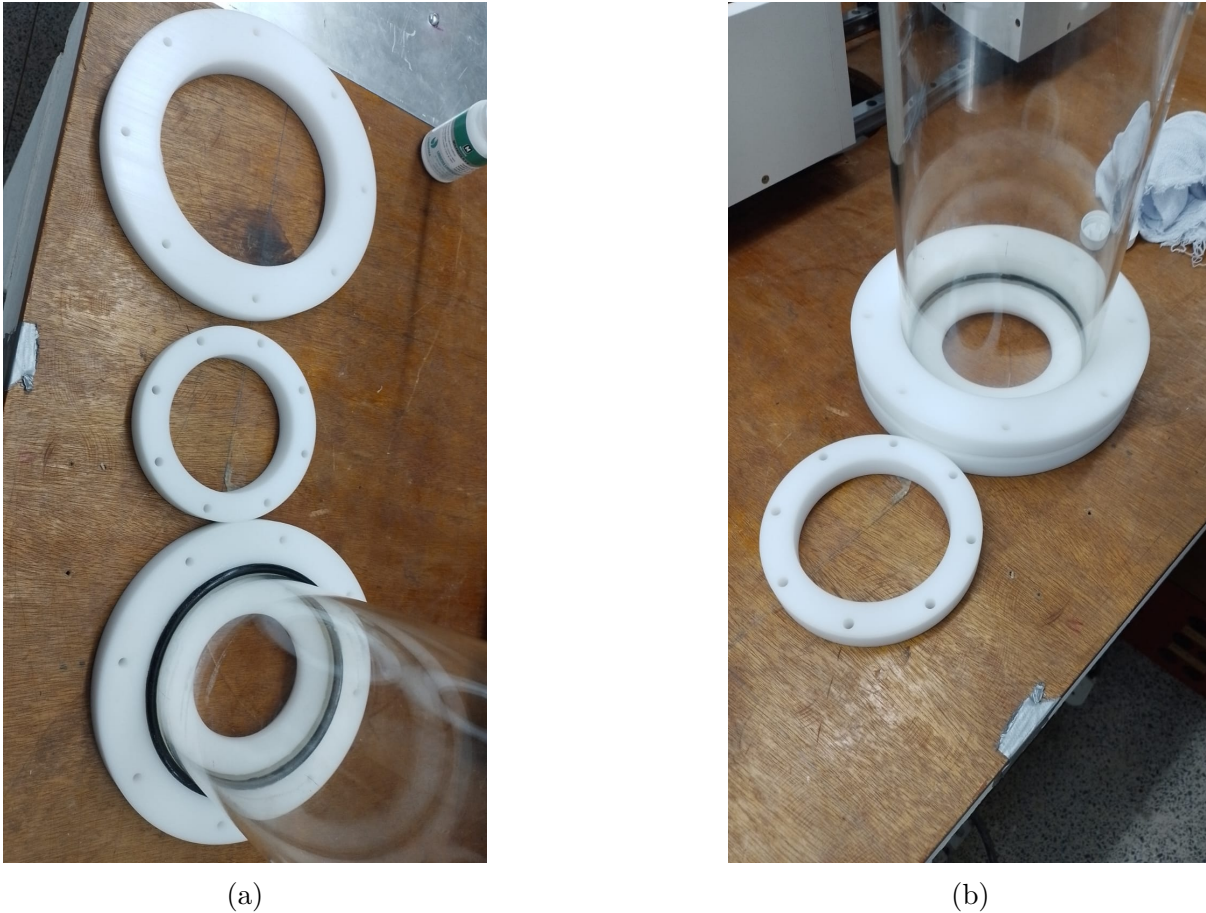


Figura 20 – Montagem das flanges de poliacetal na conexão entre os tubos. Foram utilizados graxa de vácuo e O-rings para ajuda na vedação do sistema. Fonte: LFP - UnB

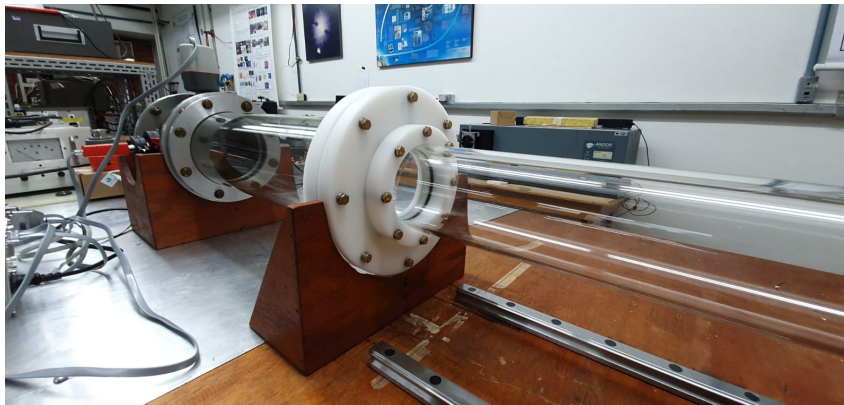


Figura 21 – Montagem final da câmara de vácuo. Fonte: LFP - UnB

### 3.2.2 Bobinas Magnéticas

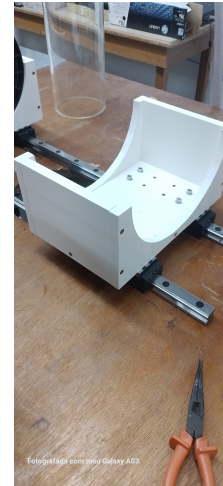
As bobinas foram enroladas em cobre esmaltado AWG 8, possuindo um diâmetro de  $3,62\text{ mm}$ , cada bobina é enrolada num carretel de plástico e possuem cerca de 250 voltas, sendo bobinas quase idênticas. As bobinas magnéticas serão posicionadas no tubo de maior comprimento, visando a construção do campo naquela área e serão conectadas

numa fonte de potencial variável para a regulação de seus campos.

A primeira parte a ser colocada foi o sistema de trilhos. O sistema de trilhos são constituídos de dois trilhos de aço paralelos sob dois suportes de madeiras, onde as bobinas serão encaixadas. As bobinas e o sistema de trilhos podem ser visualizados na figura 22:



(a) Bobinas magnéticas utilizadas no sistema. Fonte: LFP - UnB



(b) Montagem do sistema de trilhos. Fonte: LFP - UnB

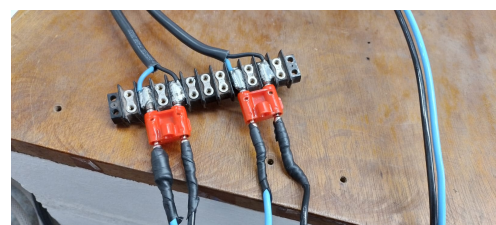
Figura 22 – Montagem final das bobinas

As bobinas foram conectadas a fonte de corrente variável. A conexão se dá por meio de um chaveamento que permite alternar a polaridade das bobinas, sendo uma ótima ideia do técnico Júlio César de Melo Almeida. O circuito está em série.

A fonte usada no experimento foi uma TCA 15-50B-1A, com capacidade de até 50 A e 15V.



(a) Fonte variável para a alimentação das bobinas. Fonte: LFP - UnB



(b) Fonte variável para a alimentação das bobinas. Fonte: LFP - UnB

Os campos magnéticos desejados de acordo com a simulação são obtidos no intervalo de 10 A até 25 A, a fonte escolhida cobre esse intervalo e permite também gerar campos mais fortes. Outro fato importante a se notar na montagem é que toda essa instrumentação será levada no mesmo referencial elétrico.

### 3.2.3 Montagem do sistema eletrônico

O Sistema eletrônico é composto por um gerador de ondas HP8648A de  $100\text{kHz}$  a  $1\text{GHz}$ , um amplificador Amplifier Research 25W 1000M7, um resistor e a antena helicoidal. Cada componente do sistema será detalhadamente mais discutida nessa seção. Um dos problemas enfrentados aqui foi a casar a impedância da antena com a o amplificador.

A antena foi a primeira a ser trabalhada. A antena helicoidal é uma antena de cobre, constituída em dois círculos que não se fecham e conectados por um fio de cobre que da uma semi volta.

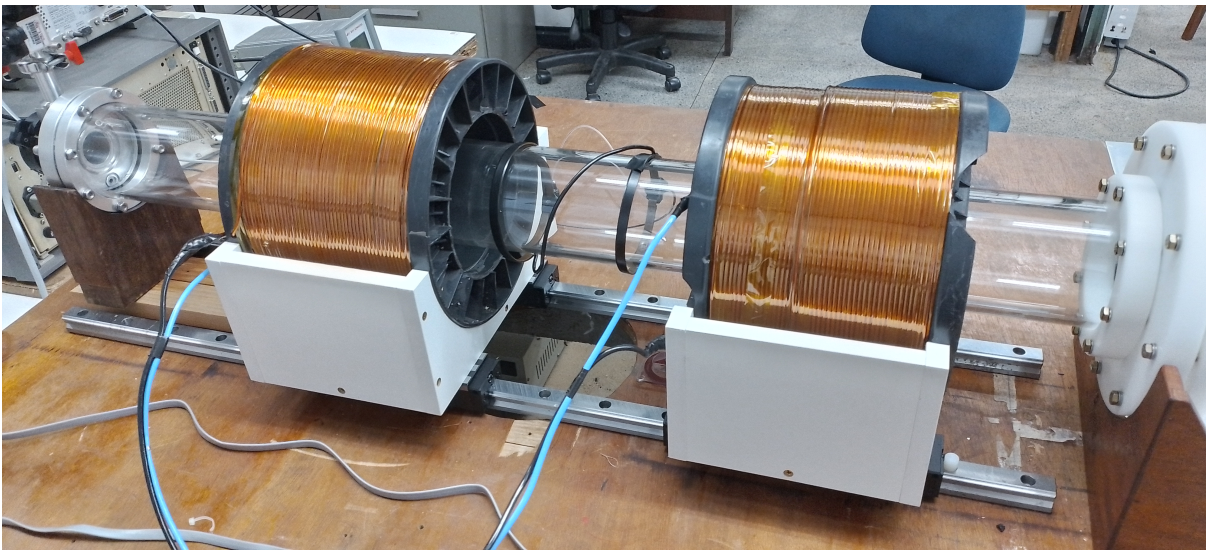


Figura 24 – Antena helicoidal usada no experimento, observe que o tipo da antena consiste numa meia volta através do eixo axial. Fonte: LFP - UnB

A antena utilizada, é uma antena do tipo helicóide de meia volta. Conectada a um amplificador de potência, enquanto este é conectado ao gerador de onda. O amplificador usado é um Amplifier Research 25W1000M7, amplificador de sinal que opera a  $25\text{W}$ , que é uma potencia relativamente baixa, mas devido a falta de disponibilidade de outros amplificadores usaremos este mesmo. Esse dispositivo é capaz de amplificar um sinal de  $25\text{MHz}$  para  $1\text{GHz}$  a  $25\text{w}$ .

Já o gerador de onda é um gerador Hewlett Packard 8648A, gerador de onda de  $1\text{dBm}$  cobrindo as frequências de  $100\text{kHz}$  até  $1000\text{MHz}$ .

Um problema que foi encontrado nessa etapa era casar a impedância entre o amplificador e a antena, no entanto essa dificuldade foi contornada colocando um fio blindado, um resistor e ferrite. A ferrite demonstrou-se muito útil e uma ótima contribuição do Técnico Júlio, já que ela resolveu diversos problemas, como a indução da antena na fonte das bobinas. O ferrite foi posicionado ao longo dos fios entre o amplificador e antena com visto nas figuras 26a e 26b, onde também demonstramos o resistor usado para o casamento da impedância.



Figura 25 – Equipamentos para a geração do sinal. Fonte: LFP - UnB



(a) Exemplo de ferrite usada no sistema. Fonte: LFP - UnB



(b) Caixa que contém o resistor usado para casamento de impedância. Fonte: LFP-UnB

Sendo assim, a montagem eletrônica foi totalmente aterrada no referencial da mesa de metal, esse "aterramento" na mesa ajudava a evitar na mudança de condições do plasma. O aterramento foi feito usando-se fita de alumínio, inclusive as bobinas, os trilhos e as flanges, exceto a flange na extremidade do propulsor. O aterramento pode ser visualizado na figura 27.

Optamos por esse aterramento na mesa, devido a falta de um terra na rede elétrica da Universidade de Brasília. Logo a longo prazo de utilização, isso pode se tornar um problema, pois o sistema da mesa pode vir a saturar. Logo as medidas devem ser realizadas da maneira mais rápida possível.



Figura 27 – Aterramento na mesa de metal. Fonte: LFP - UnB

### 3.2.4 Montagem do sistema eletrônico para medição utilizando Sonda de langmuir

A montagem do sistema de medição consiste na elaboração e montagem da sonda, e a conexão do sistema eletrônico para a medida.

A sonda de Langmuir, foi construída usando os materiais que estavam a disposição no laboratório. O orçamento estava baixo. Sendo assim, um fio de tungstênio de  $0.3\text{ mm}$  foi inserido numa haste de alumina de  $90\text{ cm}$ , que era envolta em uma haste de metal oca. A haste de metal servia para dar sustentação a haste de alumina, além de ser compatível com a flange disponível para realizar a medida. A parte que será exposta ao plasma é de  $0.5\text{ cm}$  de comprimento, que será levada em consideração para o cálculo da densidade eletrônica. A montagem final da sonda de Langmuir é demonstrada na figura 28b e a ponta exposta na figura 28a.

O sistema de medição foi montado utilizando um resistor shunt de  $1\text{ k}\Omega$  e tolerância de até  $30\text{ mA}$ . O multímetro usado foi um "Fluke True-RMS - 117". A fonte de alimentação usada era uma fonte de  $600\text{ V}$  e  $1\text{ A}$  variável. O resistor usado e a montagem das medições pode ser vista na figura 29a e 29b.

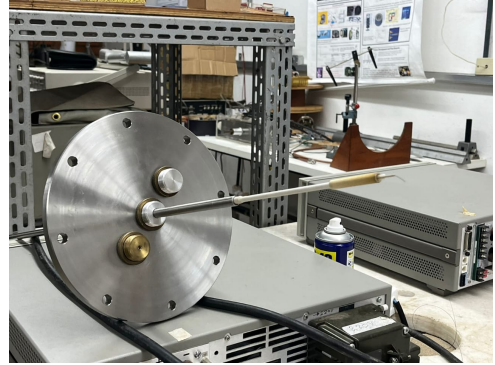
Logo, a montagem estando completa começou-se a realização das medidas no sistema.

## 3.3 Caracterização do sistema

A metodologia usada para caracterizar o sistema é dividida em duas fases: Caracterização do campo magnético e caracterização do plasma e suas características.



(a) Parte da sonda que fica exposta ao plasma, possuindo  $0.5\text{ cm}$  de comprimento e  $0.3\text{ mm}$  de diâmetro. Fonte: LFP - UnB.



(b) Montagem da sonda com a haste de alumina e a haste de metal conectada a flange passadora. Fonte: LFP - UnB.



(a) Resistor shunt utilizado na medida. Fonte: LFP - UnB



(b) Montagem do sistema de medida. Fonte: LFP - UnB

### 3.3.1 Método de Caracterização do campo magnético.

A caracterização do campo magnético se deu por volta de um Gaussímetro, onde foi medida a componente axial do campo magnético. Essa medição é feita com o sistema de vácuo desligado, onde uma sonda de componente axial de campo magnética é inserida na câmara de vácuo e obtém-se a configuração do campo.

O medidor usado é um Gaussímetro Walker Scientific MG-3D. Possuindo duas sondas que medem o campo magnético através do efeito Hall. O efeito Hall é melhor explicado no apêndice 6.4. Esse Gaussímetro é capaz de medir a intensidade do campo tanto na direção radial, quanto na direção axial do tubo.

A sonda para medição da componente axial, foi primeiramente conectada à uma

haste de aço inox onde foi gravada a metragem do sistema. Essa haste possui a capacidade de ser movida ao longo do sistema através por um tubo de plástico que estravessa o tubo de vidro. A montagem experimental foi feita como demonstrado nas figuras 30a e 30b. A sonda utilizada na medição é demonstrada na figura 31



(a) Cano de plástico onde a haste de metal e sonda entrariam no sistema. Fonte: LFP - UnB



(b) Montagem experimental para caracterização do campo magnético. Fonte: LFP - UnB



Figura 31 – Sonda para medida do campo axial. Fonte: LFP - UnB

A medida foi realizada ao longo de todo o tubo num intervalo de  $0.5\text{ cm}$  entre pontos. A análise dos dados foi feita usando-se o software Python. Nessa parte do sistema, gostaríamos de buscar a configuração do campo magnético no sistema e comparar com a simulação feita na parte de planejamento (Sec.3.1).



### 3.3.2 Caracterização dos parâmetros de plasma.

A caracterização dos parâmetros de plasma foram baseadas nos livros (WONG, 1977) e no artigo (CHEN, 2003). Aqui podemos obter as características do plasma através da sonda de langmuir e analisando a curva.

Uma curva de langmuir é bem característica. Possuindo três regiões, a região de saturação de íons, a região de saturação de elétrons e a região de transição. Além disso alguns pontos de grande interesse, sendo o "joelho" ("knee") que indicam o potencial de plasma, e o ponto no qual a curva cruza o eixo de tensão que indica o potencial flutuante. O potencial de plasma indica o início de uma corrente puramente eletrônica, enquanto o potencial flutuante indica uma corrente igual de elétrons e íons. A exemplificação dessas regiões é dada na figura:

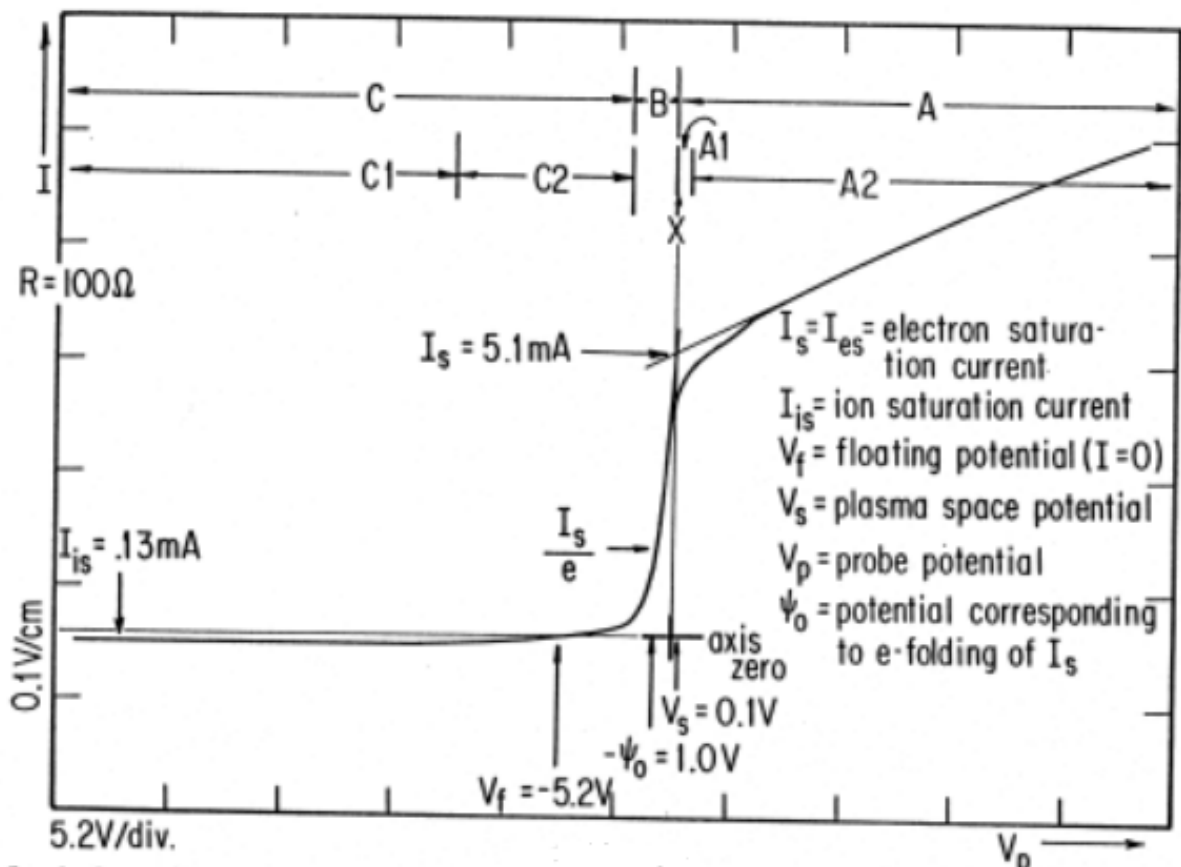


Figura 32 – Curva característica obtida por uma sonda de Langmuir. Aqui podemos ter noção das três regiões características: a região de saturação de íons, a região de transição e a região de saturação de elétrons. Fonte: (WONG, 1977)

Essa curva pode variar devido alguns parâmetros como a presença de RF, tipo de plasma no qual a sonda esta inserida e também do tipo de sonda. Os tipos de sonda são três: Sondas cilíndricas, sondas planas e sondas esféricas. Utilizou-se uma sonda cilíndrica como mostrado na figura (28b) para a realização das medições. Esses três tipos de sonda apresentam joelhos diferentes. O tipo de sonda que utilizaremos possui uma curvatura

menos acentuada na região do "joelho" que dependerá da região exposta ao plasma, portanto a importância dessa sonda ser a mais curta possível. Os tipos de sondas e as partes expostas ao plasma são dadas na figura.

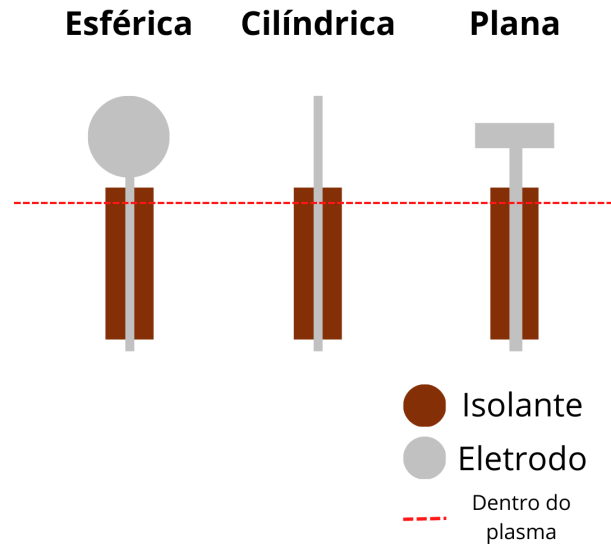


Figura 33 – Tipos de sondas de Langmuir para medição dos potenciais de plasma. Fonte: LFP - UnB

A medição será feita usando-se uma varredura de  $-100\text{ V}$  até  $100\text{ V}$ . Esse intervalo é justificado e razoável tendo em vista que após essas voltagens a perturbação gerada pela sonda começa a ser relevante, no entanto, uma varredura teste de  $-400 \leq V \leq 400$  foi feita para uma validação desse intervalo de varredura e verificação de possíveis outros efeitos que podem acontecer no plasma.

As medições foram feitas usando-se uma pressão de  $8 \times 10^{-4}$  Torr. Essa medida de pressão é feita antes de se ligar o RF, já que este acaba interferindo na medição de pressão. O medido utilizado para medir a pressão é um medidor Penning, da Edwards.

De acordo com (CHEN, 2003) e (WONG, 1977) podemos, a partir de uma sonda de Langmuir obter diversas características importantes do plasma, como: Correntes de saturação de íons e elétrons, potencial de plasma, potencial flutuante, densidade eletrônica, temperatura dos elétrons e velocidade térmica dos elétrons.

A propriedade mais importante a ser obtida aqui é a densidade eletrônica do plasma, dada por:

$$n_e = n_0 \exp\left\{-\frac{e|V_p|}{K_B T_e}\right\} \quad (3.1)$$

Onde temos o potencial de plasma medido  $|V_p|$ , a constante de Boltzmann  $K_B$  e a temperatura de elétrons dada por  $T_e$ . Podemos obter esse número sabendo apenas a

corrente de saturação eletrônica dada por:

$$I_e = n_e e S V_{th} \quad (3.2)$$

Aqui  $V_{th}$  é a velocidade térmica das partículas,  $S$  é a região da sonda exposta ao plasma. Teremos essas duas grandezas sendo dada por:

$$V_{th} = \sqrt{\frac{K_b T_e}{2\pi m_e}} \quad (3.3)$$

$$S = 2\pi(rh + r^2) \quad (3.4)$$

Onde temos a área superficial do cilindro na equação 3.4 e na equação 3.3 temos a temperatura eletrônica e a massa do elétron. Podemos então a partir dessas fórmulas, obter todos os valores necessários para medir. Considerando um plasma maxwelliano e frio a corrente medida é dada por:

$$\ln I = \ln I_e + \frac{e|V_p|}{K_b T_e} \quad (3.5)$$

Resolvendo para a temperatura eletrônica teremos:

$$T_e = \frac{e|V_p|}{K_B(\ln I_e - \ln I)} \quad (3.6)$$

Aqui, a corrente  $I$  é dada pelo potencial ponto logo após a mudança de sinal na corrente elétrica. Sendo assim poderemos substituir os valores encontrados na equação 3.6 em na equação 3.3 e a partir daí usar na equação 3.2 e obter a densidade eletrônica.

De maneira semelhante podemos obter para os íons a corrente de saturação dada por:

$$I_i = n_i e S \sqrt{\frac{2K T_e}{m_e}} \quad (3.7)$$

Tomando curva obtida pela sonda de Langmuir, podemos obter as três características principais para esses cálculos: A corrente de saturação de elétrons, a corrente de saturação de íons e o potencial de plasma de forma imediata. O potencial de plasma foi obtido ao se extrapolar uma curva sigmoideal (curva de Boltzmann) no gráfico e tomar o ponto no qual sua derivada possui um máximo na sua derivada. O método utilizado é melhor explicado no artigo (CHEN, 2003), e foi escolhido devido a dificuldade de usar os métodos demonstrado por (WONG, 1977) que consiste em traçar retas e pegar o ponto de

intersecção como o potencial de plasma. A corrente de saturação eletrônica foi tomada justamente como sendo a corrente correspondente ao potencial de plasma. A exemplificação desse método será dada na análise de dados. O erro é dado pelo próprio software.

### 3.3.3 Determinação da camada dupla

Outro objetivo da caracterização do estudo desse sistema é a característica queda de potencial da camada dupla demonstrada na figura 13 que surge tanto no potencial quanto na densidade eletrônica.

A área prevista para o aparecimento dessa queda é a cúspide magnética formada pelo campo das bobinas. Essa cúspide é formada devido as características do plasma de seguir as linhas do campo magnético. Logo decidiu-se medir o potencial de plasma ao longo dessa cúspide. O ideal era medir ambos os lados do propulso para obter um perfil completo, no entanto a falta de tempo nos obrigou a medir somente um lado. O lado escolhido é o campo próximo a flange dielétrica entre aproximadamente 40cm 60cm do propulsor, que é justamente a área onde o campo magnético esta se dispersando e onde a cúspide se forma.

Tendo em vista essa queda, mediu-se a o potencial de plasma num intervalo  $\Delta L = 2\text{ cm}$  fazendo a varredura da metade do tubo de maior diâmetro até o centro das bobinas. E então plotou-se um gráfico  $V_p \times \Delta L$  onde-se busca-se esse salto no potencial.

## 4 Resultados experimentais

Nessa seção explicitaremos os resultados experimentais obtidos durante a construção e da operação do sistema, além do diagnóstico de plasma. Iremos demonstrar alguns resultados qualitativos e quantitativos e melhorias realizadas no sistema HPT e uma análise dos resultados dos diagnósticos feitos de plasma.

### 4.1 Análise qualitativa

O sistema de vácuo, contando com a bomba difusora modelo Edwards 135l/s e a bomba mecânica modelo Edwards 5m<sup>3</sup>, é capaz de alcançar um vácuo de ordem de 10<sup>-7</sup> Torr, funcionando como o esperado. O sistema é alimentado por um gás de argônio 99% onde não observou-se vazamento, depois da troca das flanges. Na primeira montagem do sistema, o sistema foi montado com uma flange de Lucite (Acrílico), sendo este o material disponível naquele momento, porém, no primeiro teste de vácuo o material não resistiu e constituiu uma rachadura no sistema.

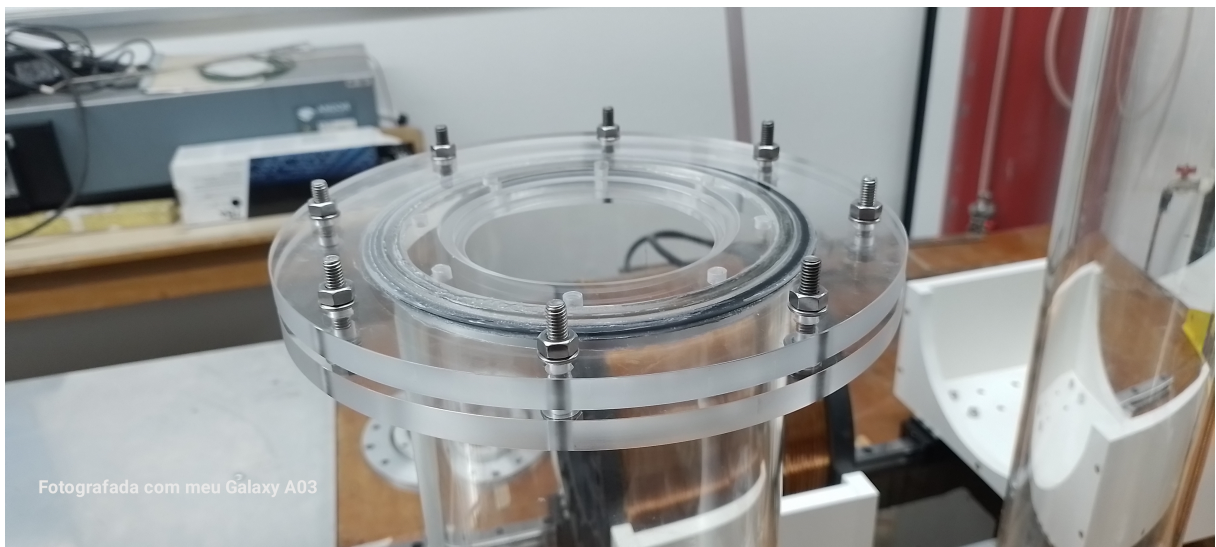


Figura 34 – Flange de acrílico utilizada na primeira montagem do sistema. Fonte: LPF - UnB

Essa rachadura fez com que o sistema não conseguisse alcançar o vácuo. Sendo assim, uma na internet pesquisa e a sugestão do técnico Júlio Melo levaram a flange de poliacetal já discutida na parte de construção. Essa flange de poliacetal se demonstrou resistente e qualificada para suportar o vácuo e também suportar as condições de altas temperaturas do plasma. O que observamos também é que a flange dielétrica não muda em anda as características do plasma, se tornando ideal para a realização de medidas naquela área e solucionando o problema encontrado na simulação do aluno Renan Almeida.

Outro fator que ajudou e muito em manter as condições de plasma estável foi usar a mesa metálica como um referencial elétrico. No início o plasma andava muito instável, qualquer toque nos aparelhos de alimentação (Fonte, gerador de RF e amplificador) e nas bobinas geravam uma perturbação no plasma. Sendo assim, ao colocarmos todo o sistema de alimentação, bobinas e trilhos no mesmo referencial essas perturbações acabaram por diminuir, tornando o plasma mais estável e menos suscetível as perturbações externas. Outro artefato que melhorou a estabilidade, foi o uso das ferrites, que absorviam algumas perturbações e permitiam uma passagem mais limpa da corrente no sistema. O uso das ferrites é de suma importância, já que permitiu a filtragem do RF emitido pela antena dispensando a gaiola de faraday. As primeiras medidas foram desconsideradas, já que houve interferências.

As bobinas funcionaram como o esperado, no entanto observa-se que elas esquentavam demais devido a passagem de corrente, sendo assim, uma faixa de segurança foi delimitada. A faixa de segurança esta entre correntes de 0 até 30 amperes, sendo recomendado sempre operar abaixo desse máximo. Como as medidas foram feitas entre 10 A e 25 A não houve esse problema, no entanto a bobina chegava a temperaturas relativamente altas.

Após esses primeiros testes e delimitações de limites partimos para a geração de plasma. A frequência escolhida para operação do RF foram de 17 MHz e amplitude inicial de 0 dBm para a onda hélicon incidente, esse valor foi escolhido devido ao fato de experimentos passados terem utilizados dessa frequência. Logo os parâmetros para o medição do propulsor estão listados na tabela 2 enquanto os parâmetros de funcionamento estão entre 3.

	Parâmetros de medição
Corrente Bobinas (A)	10 a 25
Pressão (Torr)	$10^{-4}$
Frequência de RF (MHz)	17
Amplitude RF (dBm)	0

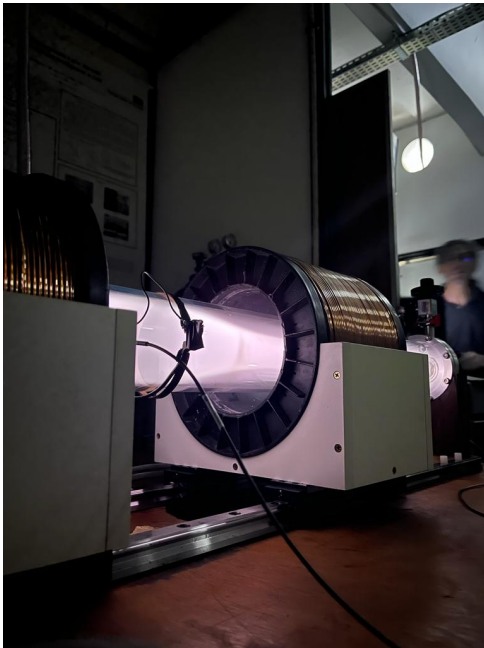
Tabela 2 – Parâmetros utilizados na medição de plasma.

	Parâmetros de funcionamento
Corrente Bobinas (A)	0 a 40
Pressão (Torr)	$10^{-5}$ a $10^{-2}$
Frequência de RF (MHz)	13 a 17
Amplitude RF (MHz)	$0a \pm 5$

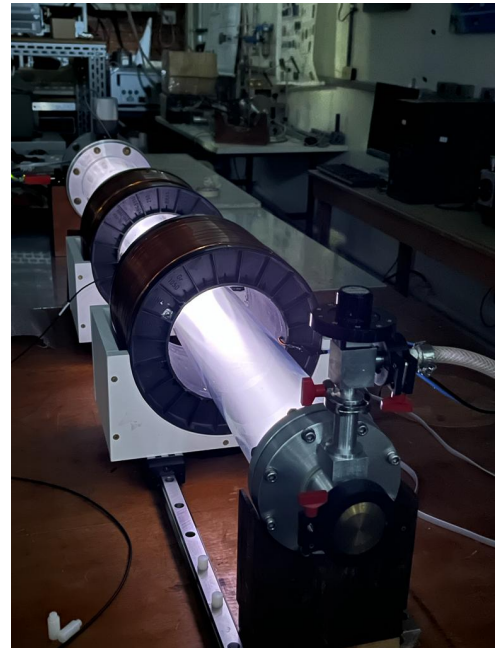
Tabela 3 – Parâmetros de funcionamento de Plasma.

Esses parâmetros foram utilizados durante todo o experimento, visando manter os mesmos parâmetros de plasma e assim manter o sistema inalterado durante as medições.

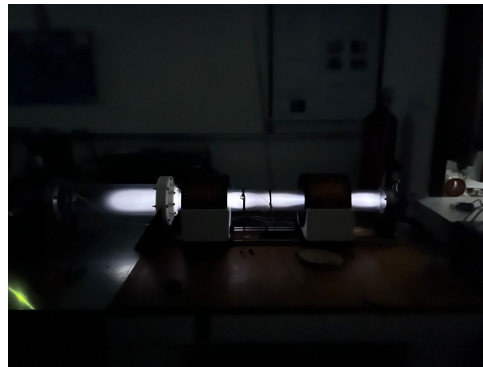
Logo, utilizando-se esses parâmetros conseguimos gerar plasma no sistema. Podemos ver o funcionamento do propulsor na figura 35.



(a)



(b)



(c)

Figura 35 – HPT funcionando no laboratório de física dos Plasmas da UnB. Fonte: LFP - UnB

O plasma gerado apresenta como o esperado uma garrafa de plasma presa ao campo magnético, como pode ser observado na figura 37a, onde temos o plasma sendo confinado no meio da bobina. E também apresenta uma cúspide magnética como pode ser observado nas figuras 36. Essa região será a delimitadora das medições. Outra observação a ser notada é que ao passar do tempo o plasma cobria toda a câmara de vácuo e é nesse momento que as medições são realizadas.

O plasma gerado apresenta a cor característica do argônio, um branco meio rosado, indicando há poucas impurezas no plasma de argônio. Um vazamento na câmara seria evidenciado pelo surgimento da cor azul. A cor azul indicaria a contaminação do gás de argônio por nitrogênio, principal gás presente na atmosfera. A cor azulada na foto



Figura 36 – Cuspide magnética formada pelo HPT. Fonte: LFP - UnB

pode ser justificada pelo modo noturno aplicado na câmara, o qual distorce as cores para evidenciar formas a noite.

#### 4.1.1 Frequência de Ressonância da Antena

Conseguimos também determinar a frequência de ressonância da antena, onde conseguiu-se alcançar o modo hélicon.

De acordo com (ZHANG et al., 2021), existem diversos modos no plasma, qualitativamente conseguimos alcançar, por um curto período de tempo, o modo hélicon alterando-se a frequência até alcançarmos a ressonância entre a antena e a onda emitida. No entanto, logo houve uma sobrecarga no amplificador. O modo hélicon pode ser visualizado nas figuras 37.

É possível ver que, durante a ressonância da antena ha a formação de ondas que guiam as partículas no movimento, semelhante a ondas estacionárias. No entanto, esse modo não pode ser caracterizado com grande precisão, tendo em vista a sobrecarga no amplificador.



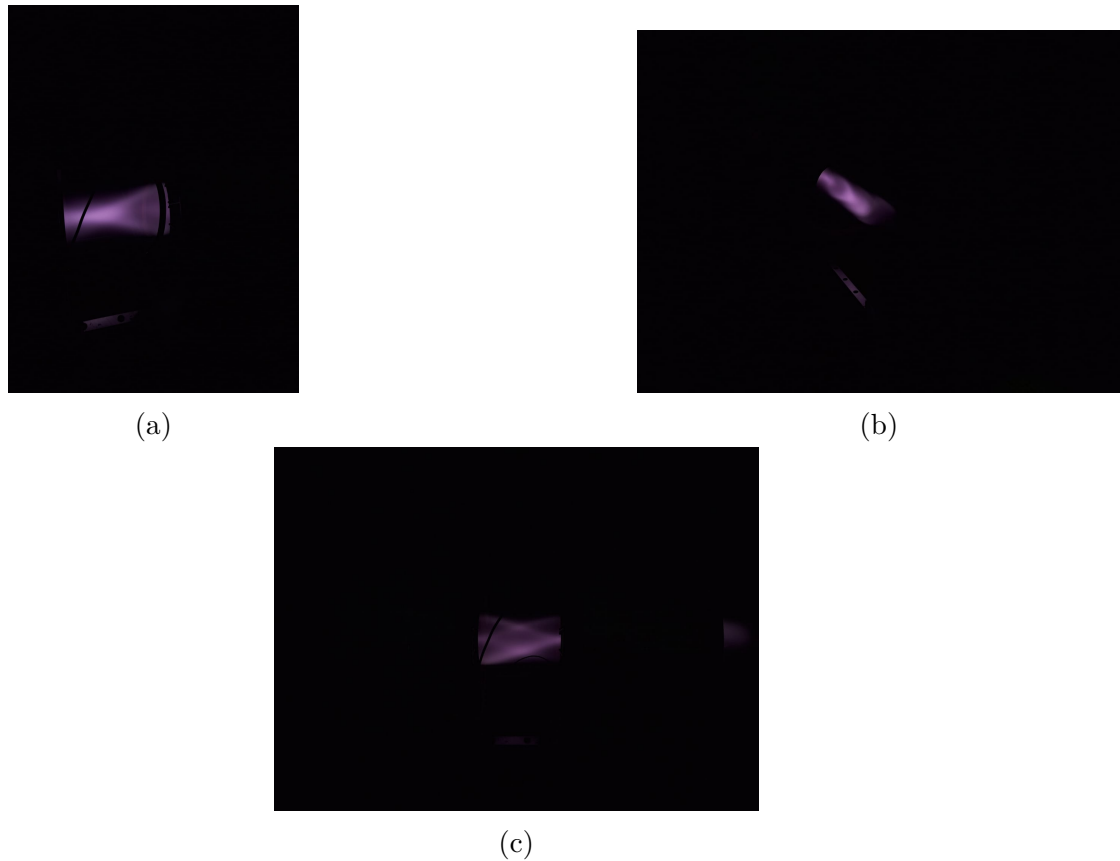


Figura 37 – Possível modo hélicon alcançado através da ressonância da antena

## 4.2 Resultados quantitativos

Nessa seção os resultados quantitativos serão apresentados. Logo, os dois principais resultados apresentados para a caracterização do sistema são: caracterização do campo magnético, caracterização do perfil eletrônico. No entanto, também analisaremos algumas outras características como o raio de Larmor dos elétrons e íons, além de suas respectivas frequências ciclotrônicas entre outras grandezas.

### 4.2.1 Caracterização do campo magnético

Como explicado na seção 3.3.1. O resultado obtido naquela configuração pode ser visualizado na figura 38.

Aqui observamos que o resultado condiz com a configuração obtida no planejamento do campo magnético (seção 3.1). No entanto, não obtivemos a amplitude correta para o campo magnético. No entanto, a configuração desejada é apresentada. Observa-se aqui que há os dois picos e um vale indicando a posição das bobinas e o vão entre elas, formando assim o espelho magnético. A região de medição se limita entre 400 e 600 *mm* que é onde forma-se a cúspide magnética.

Acreditamos que não conseguiu-se alcançar os números da simulação pelo fato que

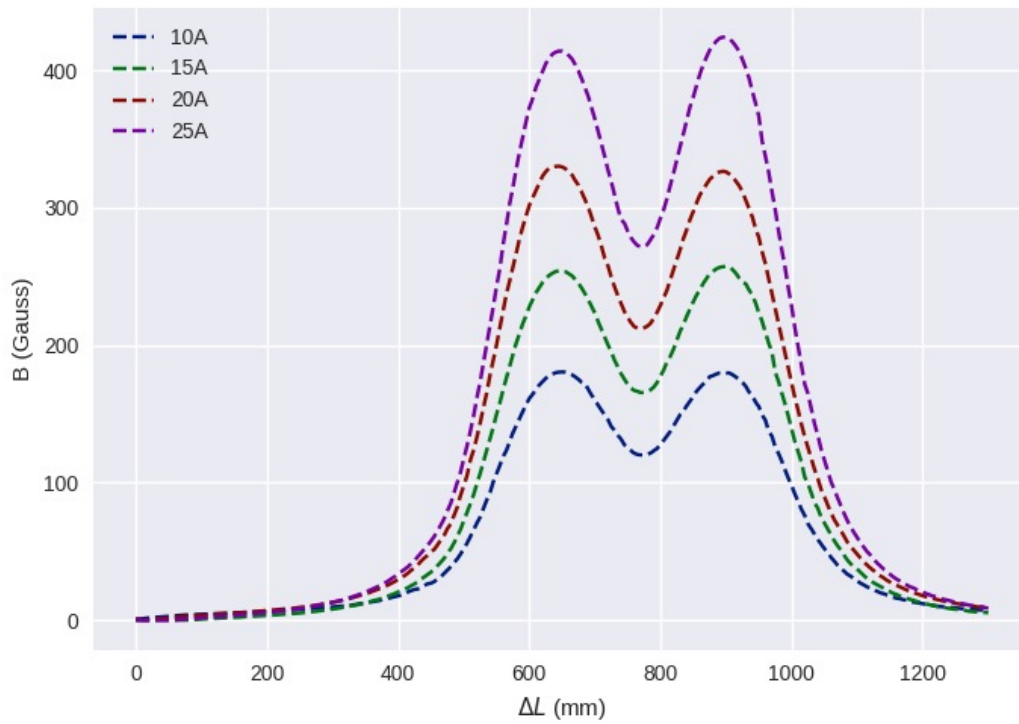


Figura 38 – Perfil de campo magnético obtido pela sonda ao longo do tubo. Fonte: LFP - UnB

as bobinas não foram feitas para esse experimentos e o número de voltas foram estimadas através de outro artigo que usava as mesmas bobinas. No entanto, observa-se que o campo aqui é bem menor. Logo, o número de voltas deve ser menor, por volta de 300 400 voltas.

### 4.2.2 Caracterização do plasma

A caracterização do plasma foi feita usando-se os métodos descritos na seção 3.3.2. Será abordada aqui apenas uma curva, a curva correspondente para  $600\text{ mm}$ . A curva em questão esta bem próxima ao centro da primeira bobina, no entanto, não exatamente no centro, devido limitações da própria sonda.

A curva obtida foi feita usando-se os parâmetros de medição. No entanto o campo magnético aqui é fixado em  $20\text{ A}$  e segue-se os outros parâmetros expostos na tabela 2 e no gráfico 38. A escolha dessa voltagem é apenas para mantermos o campo relativamente forte, acima de  $200\text{ Gauss}$ , de acordo com a figura 38, e também para evitar o superaquecimento dessas bobinas.

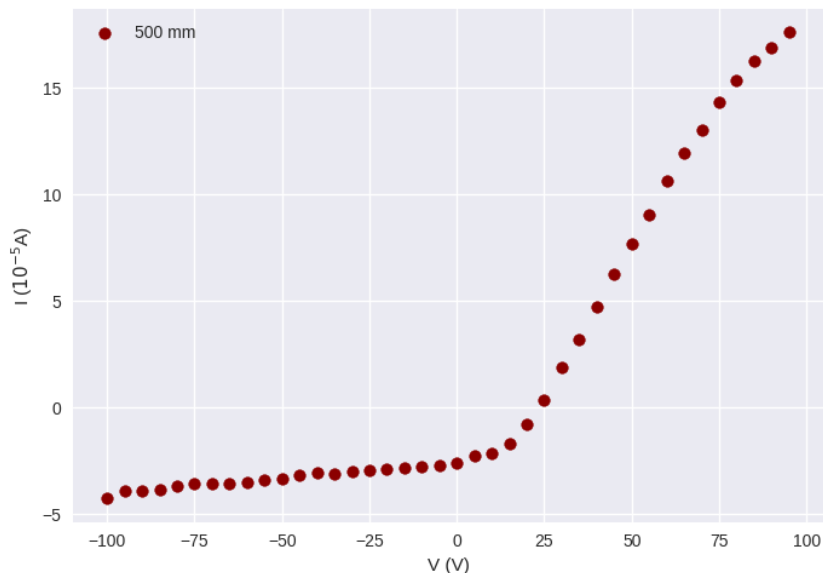
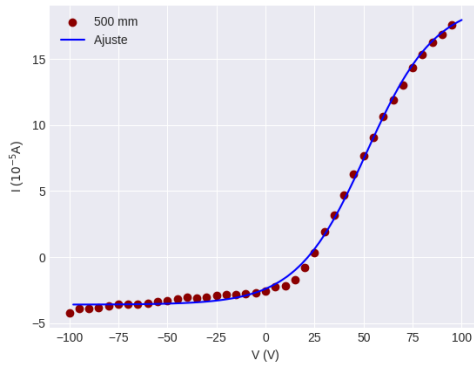
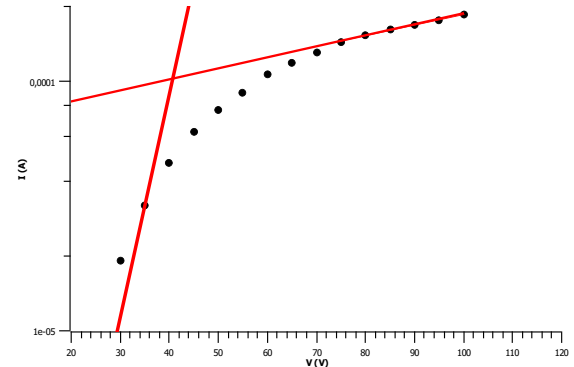


Figura 39 – Curva obtida para  $600\text{ mm}$ , observe que a curva possui um joelho menos acentuado, característico de sondas cilíndricas. Fonte: LFP - UnB

Nela observamos que há duas mudanças de inclinação. Uma entre  $0$  e  $25\text{ Volts}$  e outra por volta de  $40$  e  $70\text{ Volts}$ . No entanto mesmo a curva acentuando cada vez mais, quanto mais próxima de  $75\text{ Volts}$ . Observamos também que o formato do "joelho" condiz com o formato para uma sonda cilíndrica e sua curvatura é bem maior devido a presença de RF. Tomando por base o método especificado pelo (CHEN, 2003), extrapolou-se uma curva sigmoideal (curva S), depois em um gráfico semi-log, foi traçada uma reta na região de crescimento e outra na região de saturação. O ponto de intersecção entre essas duas retas é dado como o potencial de plasma, enquanto a corrente de saturação encontrada corresponde aonde a reta toca o eixo das ordenadas. Já a corrente de saturação de íons foi encontrada usando a mesma técnica. Que pode ser observada nas figuras 40.



(a) Curva ajustada para melhor visualização de dados. Fonte: LFP - UnB



(b) Aquisição do potencial de plasma, usando-se o método das retas. Fonte: LFP - UnB

Figura 40 – Análise do gráfico da curva de Langmuir para 600 mm

Logo, para esse valor de campo magnético e para essa posição obtivemos os valores demonstrados na tabela 4 para potencial de plasma e corrente de saturação eletrônica e área de contato com o plasma.

Os erros foram obtidos pelo próprio software de análise, e são erros baseados no ajuste que fizemos. Portanto a partir dos dados expostos na 4, e usando as equações, 3.2, 3.3 e 3.6. Obtemos os valores da tabela 5, para essas grandezas.

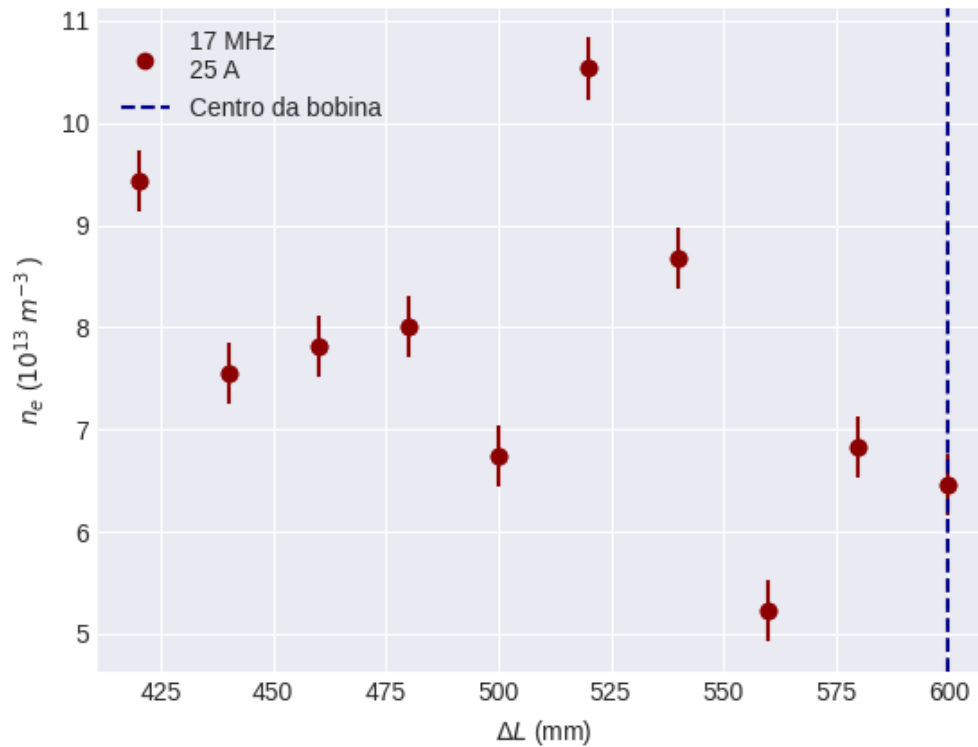
	Valores obtidos
$V_p (V)$	$42 \pm 0,6$
$I_e (10^{-5} A)$	$4,70 \pm 0,5$
$I_i (10^{-7} A)$	$7,3 \pm 0,8$
$S (10^{-6} m^2)$	$9.6 \pm 0,8$

Tabela 4 – Dados obtidos a partir da análise. Fonte: LFP - UnB

	Valores obtidos
$n_e (10^{13} m^{-3})$	$3,6 \pm 0,8$
$n_i (10^{13} m^{-3})$	$7,6 \pm 0,5$
$V_{th} (10^6 m/s)$	$3,4 \pm 0,5$
$T_e (eV)$	$8,2 \pm 0,7$

Tabela 5 – Valores obtidos executando os cálculos para as propriedades de plasma. Fonte: LFP - UnB

Os erros foram obtidos utilizando-se a fórmula geral de propagação de erros e pelo software usado para análise dos gráficos. Os erros estão arredondados. No entanto, observamos que os valores estão condizentes para plasmas de alta densidade eletrônica e gerados por RF. Sendo assim, podemos repetir essa análise para todas as curvas e a partir dos dados obtidos montar um perfil de densidade eletrônica:



g

Figura 41 – Perfil de densidade eletrônica obtido durante as medições. Fonte: LFP - UnB

Aqui observamos que as densidades eletrônicas estão bem dispersas. Isso deve-se ao fato de que a varredura é bem lenta, e por isso a densidade de partículas altera-se no tempo. Isso afeta também o erro de nossa medida, observe que a barra é relativamente grande, sendo aproximadamente 10% da medida. No entanto os valores estão condizentes com plasmas de alta densidade, como pode ser visto em (CHARLES et al., 2006). No entanto, não observamos um aumento significativa na densidade eletrônica como o esperado, apresentando um comportamento de aumento, mas nada exponencial ou um salto. Podemos também obter o perfil da densidade iônica do plasma, como é dado na figura 42, que é dada por:

Observamos também aqui que há um aumento na densidade de íons à medida que nos distanciamos das bobinas. Isso nos mostra que está havendo uma certa concentração maior de íons fora da região das bobinas, essas partículas não estão sendo presas no campo magnético. Tendo em vista o comportamento caótico, acreditamos que a queda não se apresente pelo fato de a configuração não possuir uma potência suficiente, não conseguindo atingir o modo hélicon. No entanto, isso pode ser explorado com outras configurações e com a inserção de uma sonda perturbativa no sistema. Outra configuração que podemos observar é o perfil do potencial de plasma, na figura 43.

Podemos observar que assim como a densidade de plasma, o potencial de plasma

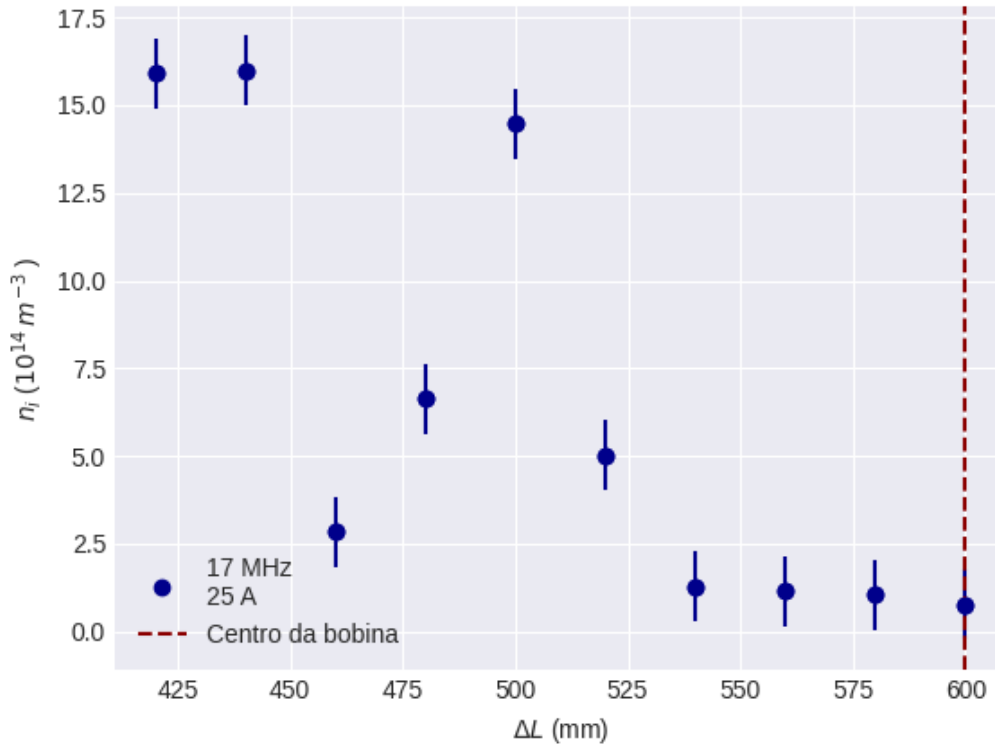


Figura 42 – Densidade iônica ao longo do eixo do tubo. Fonte: LFP - UnB

segue também um comportamento linear como demonstrado na figura 43. Isso acontece justamente por conta da varredura, observamos que ha muitos pontos fora da curva, por conta da varredura lenta e as propriedades de plasma mudarem durante a medida.

Outra grandeza que podemos medir é o raio de Larmor dos elétrons e dos íons de argônio. Sabendo, a velocidade térmica dos elétrons o raio de Larmor será dado por:

$$r_L = \frac{m_e V_{th}}{eB} \quad (4.1)$$

Usando os dados da figura 38 e considerando a posição de 600 mm teremos que:

	elétrons	íons
$r_L$ (mm)	5	8

Tabela 6 – Raio de larmor ionico e eletrônico.

Observamos então que os raios são menores que o diâmetro interno do tubo. No entanto, pela massa do íon ser maior que a massa do elétron, sua órbita aumenta, ressaltando que o raio interno do tubo de vidro é de 50mm.

Tomando a região de pico de para 20 A e a região de vale para a mesma corrente, podemos tomar a frequência eletrociclôtrônica e ionociclôtrônica. Essa frequência será dada

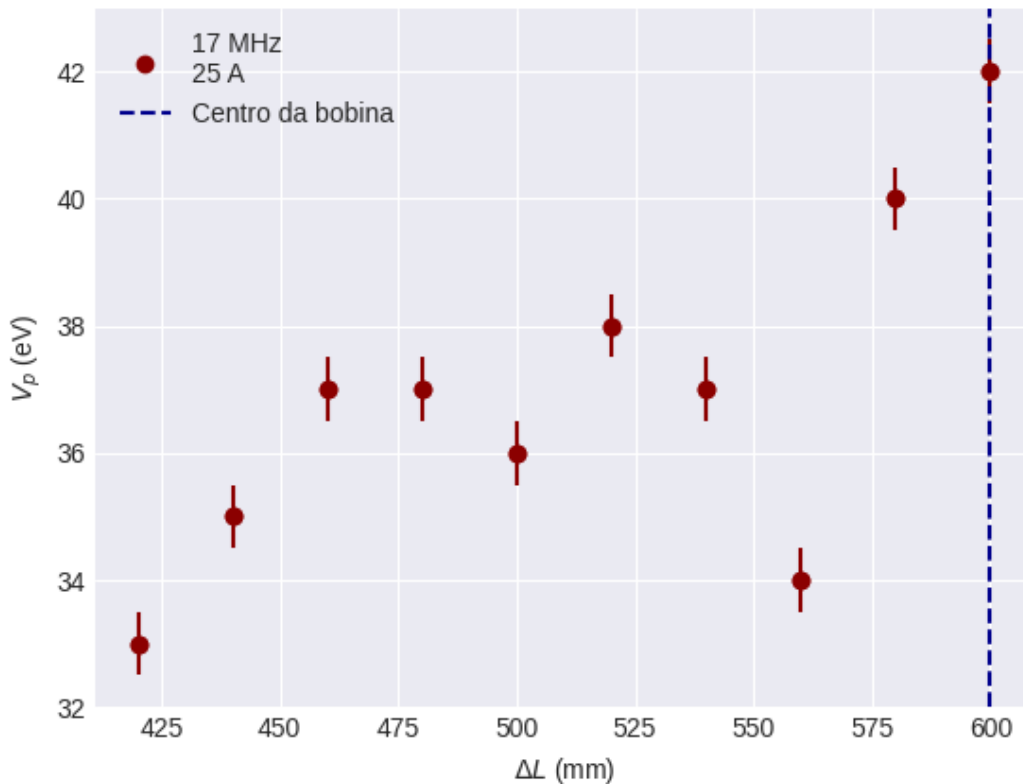


Figura 43 – Perfil de potencial de plasma ao longo do tubo. Fonte: LFP - UnB

pela equação 4.2

$$\omega = 2\pi f = \frac{qB}{m} \quad (4.2)$$

Logo, para o pico no centro das bobinas e no vale teremos:

	$f_c$ (MHz)	$f_i$ (MHz)
Pico	840	0.0115
Vale	560	0.0123

Tabela 7 – Frequências ionociclônicas ( $f_i$ ) e eletrociclônicas ( $f_c$ ) para o campo de 20 A.

Podemos observar que a frequência  $f_i < 17 \text{ MHz} < f_c$ , condizente com o esperado por uma onda hélicon.

Tendo em vista, os valores obtidos observamos que temos as condições de um plasma gerado por uma onda hélicon. Observa-se também através das figuras 41 e 41 que há uma alta densidade de partículas carregadas no plasma. Portanto podemos concluir que há a geração de uma plasma característico de uma onda helicon. No entanto, observamos pela figura 43 que há uma queda de potencial. Mas não há um salto, ou uma queda

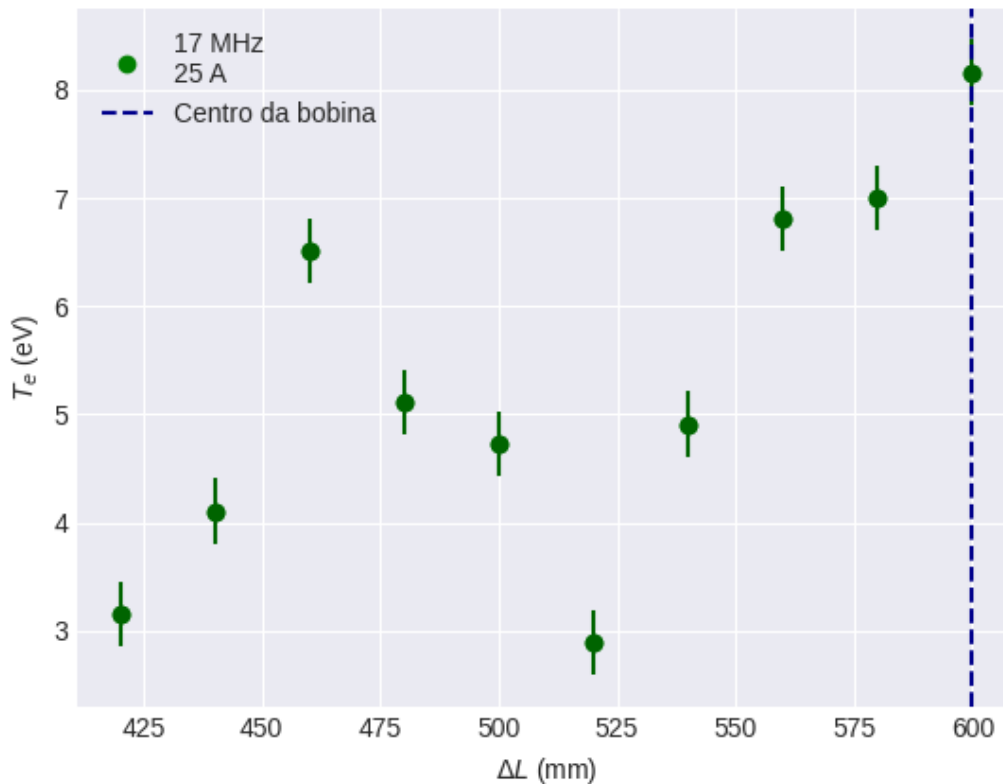


Figura 44 – Perfil da temperatura de elétrons ao longo do tubo.

abrupta, logo não conseguiu-se atingir o modo hélicon no plasma. Acredita-se que essa ausência de DL, seja devido ao tamanho do propulsor que necessita de uma alta potência, que não é atingível no nosso caso de apenas  $25\text{ W}$ . Vemos também que há uma diminuição linear na temperatura de elétrons, demonstrando que há uma diminuição ao longo do tubo. Isso é devido ao fato da distância da antena e do campo magnético, e a medida que o campo vai diminuindo, a frequência de oscilação e a velocidade térmica vão diminuindo e assim a temperatura eletrônica também cai.

Destarte, observamos que o sistema está funcionando bem e apresenta geração de plasma e funciona de maneira estável dentro dos parâmetros de funcionamento listados na tabela 2, no entanto várias melhorias podem ser feitas, visando a melhor performance e estética do sistema.



## 5 Melhorias Futuras

Observando as dificuldades encontradas no sistema, tanto qualitativas quanto quantitativas, há a sugestão de algumas melhorias a serem feitas futuramente no sistema, listadas abaixo:

- **Sugestões de Montagem**
  - Elaboração e teste de novas antenas.
  - Aumento de potência para o RF.
  - Criador de impedância para altas frequências.
  - Substituição das bobinas para ímãs permanentes.
  - Substituir a válvula de gás para um controlador de fluxo de massa
- **Sugestões para as medições**
  - Automatização da varredura.
  - Sistema de medições de espectroscopia
  - Teste de topologia do campo magnético.
  - Miniaturização do sistema

Podemos justificar os três primeiros como uma tentativa de evidenciar e potencializar a DL, já que como observado em artigos como (CHARLES; BOSWELL, 2003) e (SHINOHARA, 2018), entre outros, as potências utilizadas para esse tipo de aplicação são bem maiores que os 25 W disponíveis. Outro fator a ser observado é também a antena helicoidal disponível no laboratório. Esta pode ser melhorada e eventualmente substituída, valendo a tentativa de testar novas configurações para o sistema e ver o impacto de novas formas e tipos, como por exemplo as do tipo Nagoya 3, tipo sela e a do tipo Boswell utilizada por BOSWELL no artigo (CHARLES et al., 2006).

Tendo em vista, também o casamento de impedância entre o amplificador e a antena, já que a área há um intervalo de funcionamento bem delimitado entre um e outro determinado pela tabela 2, é necessário que seja criado um casamento de impedância variável para o sistema, para que assim possamos casar a impedância para frequências maiores que 20 MHz além de suportar as potências que virão, caso haja a compra de um novo amplificador.

A substituição de bobinas para ímãs permanentes evitam problemas que podem acontecer dentro das bobinas devido ao seu aquecimento. Outro fator é justamente aquecimento, a dissipação de energia pode danificar a bobina levando a perda de material o que é evitado com ímãs permanentes. Há também o fator indução da antena de RF, ela induz nas bobinas magnéticas uma corrente parasita, que pode prejudicar a estabilidade do sistema, isso é observado ao se remover a ferrite. Quando isso ocorre, a indução das antenas é tal, que as bobinas cessam seu funcionamento, podendo então ser evitado com ímãs permanentes.

Outro problema encontrado na montagem foi a válvula agulha, que não permitia um controle melhor da entrada de argônio no sistema. Sendo assim é sugerível que seja inserido um controlador de fluxo de massa no sistema, para melhor controle na pressão do mesmo, tendo em vista que isso também podia estar afetando a mudança nas características do sistema.

A automatização da varredura é extremamente necessária. Observou-se durante a análise de dados, que há uma significativa mudança nas propriedades de plasma quando a varredura é lenta, isso aumentado consideravelmente o erro além de bagunçar completamente os perfis de potencial de plasma. A sugestão para a melhoria da varredura é a compra de uma fonte de varredura ou fonte variável automática programável. Outra sugestão é utilizar um osciloscópio para a realização das medições. Esse circuito já existia no laboratório, no entanto foi desmontando por necessidade e urgência, porém, é de extrema importância que se elabore um novo para realizar medidas no sistema HPT.

Devido a construção do propulsor prever esse tipo de medida, seria interessante variar o campo magnético através dos trilhos para testar diversas configurações, variando assim o raio de Larmor do sistema, a prisão de íons e elétrons e até mesmo criar um degrau de potencial através da configuração das bobinas geradoras de campo. Alguns estudos ao redor do mundo, demonstram que gradientes de campos magnéticos, e até algumas geometrias potencializam a velocidade térmica das partículas ejetando mais íons.

Outra medida a ser feita para a caracterização do sistema, e que devido a falta de tempo não foi realizada, é a caracterização espectroscópica do sistema. O laboratório de física dos plasmas já possui um espectroscópio modelo ANDOR com uma CCD funcional para uso. No entanto, há a necessidade de adaptação do sistema para tal medida. Logo, haverá a necessidade de se comprar uma janela de inspeção de quartzo e passar no sistema uma fibra óptica que permita passar uma quantidade razoável de fótons para o medidor. Para assim realizar a medida espectroscópica do sistema.

Agora, o que é de extrema importância é a miniaturização desse sistema. Ao redor do mundo, os dispositivos HPT são consideravelmente menores que o sistema montado, isso deve-se a necessidade de que o campo seja suficiente fraco permitindo uma emissão maior de cargas. outro motivo é a facilidade de aplicabilidade, um propulsor menor é mais

atrativo e pode ser aplicado com mais facilidade em algumas aplicações, como propulsão de cubesats.

Dito isso, essas foram as dificuldades enfrentadas e os possíveis motivos que podem estar suprimindo a queda abrupta de potencial usada no nosso sistema. Acredito que se forem aplicadas o sistema terá um funcionamento melhor e apresentará uma queda relativamente maior de potencial e densidade eletrônica.



## Considerações finais e Conclusão

A propulsão a plasma utilizando-se conceitos eletromagnéticos vem ganhando sua notoriedade ao longo do tempo, sendo assim, buscamos a construção e a caracterização de um sistema de propulsão do tipo HPT. O sistema apresentou um bom funcionamento, apesar de sua pequena queda de potencial como demonstrado na figura 43 e uma pequena queda na densidade eletrônica, observada na 41, normalmente esse tipo de propulsor possui quedas muito maiores na casa de 80 100 V sendo insuficiente. Portanto o sistema não apresentou uma queda abrupta, ou exponencial, como esperado para uma DL, mas ainda assim pode vir a apresentar no futuro caso o sistema seja melhorado e algumas sugestões sejam acatadas. No mais, os objetivos com esse trabalho foram cumpridos. Aqui conseguimos realizar o diagnóstico do plasma observando seu perfil de densidade eletrônica, perfil de potencial, a temperatura de elétrons e ainda extrair o máximo de informações pela curva de Langmuir, levando a um entendimento superior do uso dessa técnica.



# Referências

- BLOCK, L. P. A double layer review. *Astrophysics and Space Science*, Springer, v. 55, n. 1, p. 59–83, 1978. Citado 3 vezes nas páginas 15, 39 e 40.
- CHARLES, C.; BOSWELL, R. Current-free double-layer formation in a high-density helicon discharge. *Applied Physics Letters*, American Institute of Physics, v. 82, n. 9, p. 1356–1358, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 20, 38 e 71.
- CHARLES, C. et al. Helicon double layer thrusters. In: *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 4838. Citado 3 vezes nas páginas 20, 67 e 71.
- CHEN, F. F. Langmuir probe diagnostics. In: *Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEEICOPS meeting, Jeju, Korea*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 20–111. Citado 7 vezes nas páginas 15, 44, 45, 55, 56, 57 e 65.
- CHEN, F. F. *Introduction to plasma physics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 23 e 24.
- CHOUËIRI, E. Y. A critical history of electric propulsion: The first 50 years (1906-1956). *Journal of propulsion and power*, v. 20, n. 2, p. 193–203, 2004. Citado na página 29.
- ELLINGBOE, A.; BOSWELL, R. Capacitive, inductive and helicon-wave modes of operation of a helicon plasma source. *Physics of Plasmas*, American Institute of Physics, v. 3, n. 7, p. 2797–2804, 1996. Citado na página 26.
- GODDARD, R. Method of and means for producing electrified jets of gas. *Patent*, v. 1, n. 363, p. 037, 1920. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 31.
- GOEBEL, D.; WIRZ, R.; KATZ, I. Analytical ion thruster discharge performance model. *Journal of Propulsion and Power - J PROPUL POWER*, v. 23, p. 1055–1067, 09 2007. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.
- JAHN, R. G.; CHOUËIRI, E. Y. Electric propulsion. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Third edition. New York: Academic Press, 2003. p. 125–141. ISBN 978-0-12-227410-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105002015>>. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- LANGMUIR, I. The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths. *Physical review*, APS, v. 33, n. 6, p. 954, 1929. Citado na página 39.
- NAIK, P. K. *Vacuum: Science, Technology and Applications*. [S.l.]: CRC press, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 80 e 82.
- O'REILLY, D.; HERDRICH, G.; KAVANAGH, D. Electric propulsion methods for small satellites: A review. *Aerospace*, v. 8, p. 22, 01 2021. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.

SHINOHARA, S. Helicon high-density plasma sources: Physics and applications. *Advances in Physics: X*, Taylor & Francis, v. 3, n. 1, p. 1420424, 2018. Citado na página 71.

TSIOLKOVSKY, K. E. Exploration of the universe with reaction machines. *The Science Review*, v. 5, 1903. Citado 3 vezes nas páginas 15, 29 e 30.

TURNER, M. J. *Rocket and spacecraft propulsion: principles, practice and new developments*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.

WONG, A. Y. *Introduction to experimental plasma physics*. [S.l.]: Citeseer, 1977. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 16, 55, 56 e 57.

WRIGHT, W.; FERRER, P. Electric micropropulsion systems. *Progress in Aerospace Sciences*, Elsevier, v. 74, p. 48–61, 2015. Citado na página 35.

ZHANG, T. et al. Influence of neutral depletion on blue core in argon helicon plasma. *Physics of Plasmas*, AIP Publishing, v. 28, n. 7, 2021. Citado na página 62.



## 6 Apêndice

### 6.1 Equação de Tsiolkovsky

A equação de Tsiolkovsky é um dos principais princípios da propulsão aeroespacial. Desenvolvida por Konstantin E. Tsiolkovsky ela descreve como a variação de massa do foguete se relaciona com a variação de velocidade do mesmo. Consideremos um foguete de massa  $M(t) = m + \Delta m_p$  variante no tempo, onde  $m$  é a massa da estrutura do foguete e  $\Delta m_p$  é a massa do propelente, e que o foguete se encontre em um espaço livre de perturbações de tal forma que permaneça em velocidade constante, teremos:

$$\vec{F} = 0 \quad (6.1)$$

Portanto, considerando que o momento do sistema em um dado instante  $t$  é:

$$\vec{P}(t) = M\vec{v} \quad (6.2)$$

Em um instante  $t + \Delta t$ , o propelente começa a ser expelida, em relação a um referencial em repouso teremos:

$$\vec{P}(t + \Delta t) = m(\vec{v} + \Delta\vec{v}) + \Delta m_p(\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (6.3)$$

Portanto, teremos pela conservação do momento:

$$\vec{P}(t + \Delta t) - \vec{P}(t) = m\Delta\vec{v} - \Delta m_p\vec{v}_p = 0 \quad (6.4)$$

Onde resolvendo para  $\Delta\vec{v}$ :

$$\Delta\vec{v} = \frac{\Delta m_p}{m}\vec{v}_p \quad (6.5)$$

Portanto, diferenciando e tomando o referencial que em repouso, teremos que:

$$m d\vec{v} = -\Delta m_p \vec{v}_p \quad (6.6)$$

Dividindo ambos os lados no tempo teremos:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dm_p}{dt} (-\vec{v}_p) \quad (6.7)$$

Que é a equação do empuxo  $T$ . Sendo assim, podemos resolver essa equação de uma velocidade  $v_0$  até uma  $v_f$ , portanto a massa também irá variar entre  $m_0$  e  $m_e$ , onde  $m_e$  é a massa expelida e  $m_0 = m_p$ :

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_0 = -\vec{v}_p \ln \frac{m_e}{m_0} \quad (6.8)$$

Temos então a equação de foguete de Tsiolkovsky, essa equação nos mostra como um foguete se move através da conservação do momento linear e depende apenas de três parâmetros  $v_p$  que é a velocidade de exaustão do foguete a massa expelida  $m_e$  e a massa inicial  $m_0$ . Ela pode ser escrita de outra forma, considerando que  $m_0 = m_e + m_p$ , onde  $m_p$  é a massa do propelente no instante da medida:

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_0 = -\vec{v}_p \ln \frac{m_e}{m_p + m_e} \quad (6.9)$$

## 6.2 Funcionamento das bombas mecânicas e difusoras

A ferramenta principal para a tecnologia de vácuo, são as bombas de vácuo. O primeiro dispositivo criado, em 1640 na Alemanha, era uma bomba mecânica podendo ser classificada como uma bomba de deslocamento (NAIK, 2018). Nesse tipo de bomba, o gás é sugado e expelido usando princípios puramente mecânicos, como a força centrífuga e a compressão de um gás. Ao passar do tempo, outros tipos de bombas foram sendo inventadas, sendo elas as bombas difusoras, as turbo-moleculares, as criogênicas, as iônicas e etc. Cada uma usa um princípio próprio e possui seu próprio alcance de funcionamento. As criogênicas e iônicas são as mais potentes podendo alcançar cerca de  $10^{-14}$  Torr (NAIK, 2018).

### 6.2.1 Bombas mecânica

O funcionamento de uma bomba mecânica é bem conhecido. A bomba mecânica puxa o ar através de uma válvula, conectada a câmara de vácuo, que puxar o ar e joga-o para fora do sistema. O princípio dessas bombas é bem simples e podem ser compreendidos observando a figura 45

### 6.2.2 Bombas difusora

Uma bomba difusora funciona usando um gradiente de pressão criado pela injeção de um óleo especial dentro do sistema. Esse óleo especial é aquecido e logo depois arremessado no sistema criando um gradiente de pressão, puxando as partículas do sistema para fora. No entanto, esse tipo de bomba funciona quando já ha um vácuo da ordem

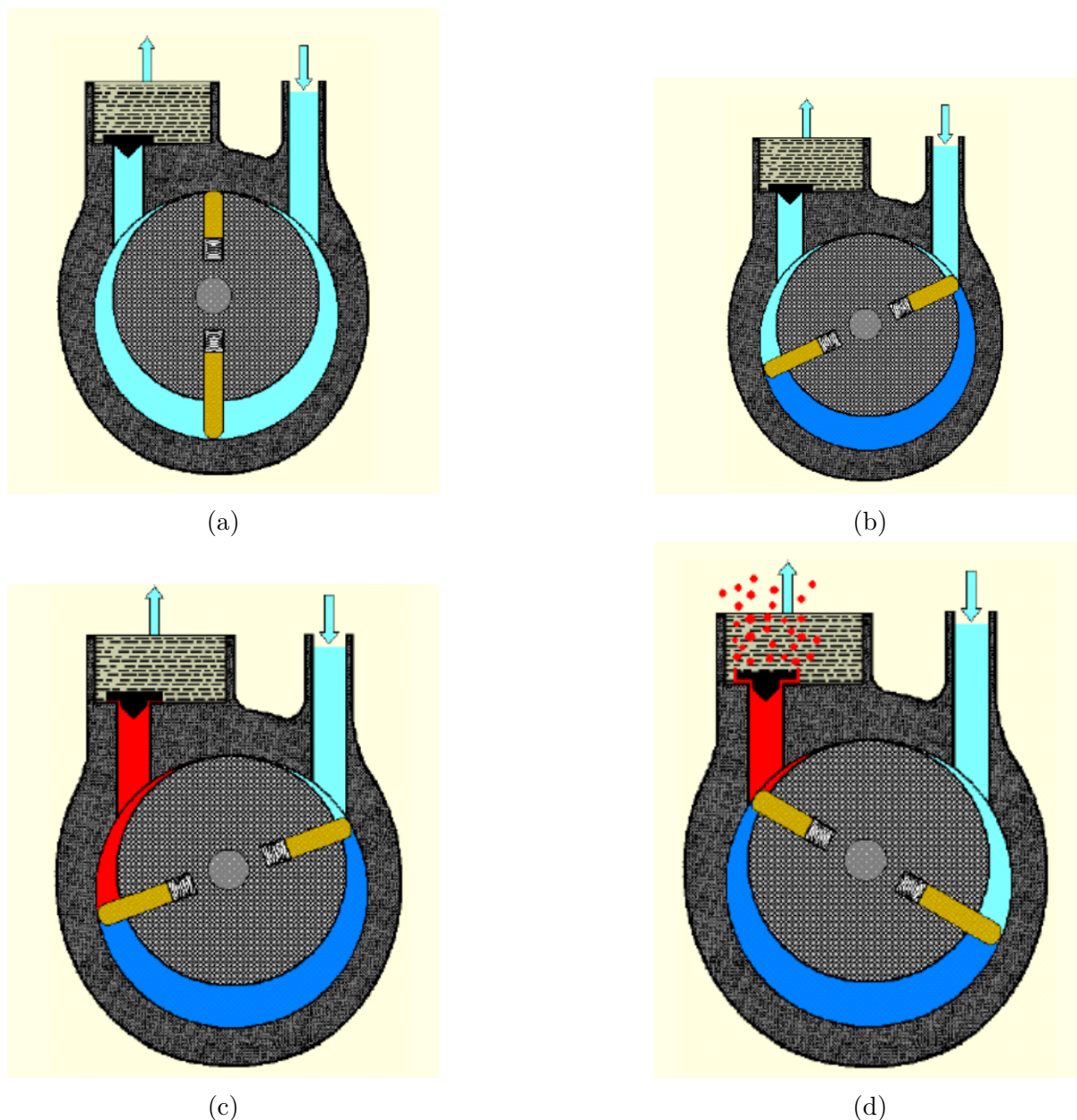


Figura 45 – Funcionamento de uma bomba mecânica. Fonte: CBPF

de  $10^{-2}$  Torr no sistema, funcionando logo após a bomba mecânica. Já a bomba difusora, consegue alcançar altos vácuos com facilidade chegando em  $10^{-6}$  Torr. Logo, para se conseguir altos vácuos, costuma-se usar ambos os tipos de bomba.

O corpo de uma bomba difusora é bem simples, possuindo um recipiente para o óleo, e estrutura semelhantes a "andares", cada qual com sua "garganta" por onde o óleo é arremessado no sistema.

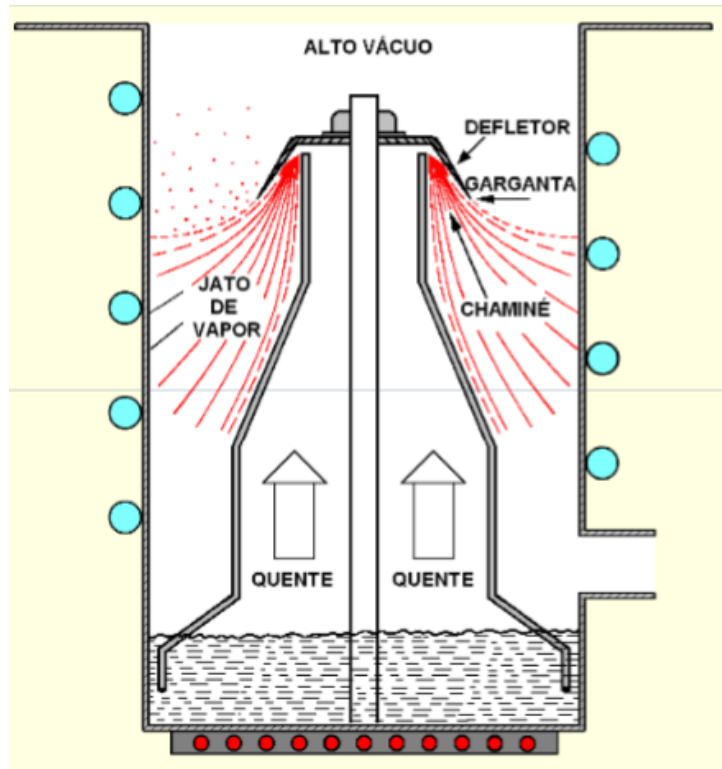


Figura 46 – Esquema de uma bomba difusora. Fonte: CBPF

### 6.3 Funcionamento dos medidores de vácuo

O medidor utilizado para medir o baixo vácuo ( $10^{-1}$  -  $10^{-2}$ ) foi um Pirani da marca Edwards. O Pirani APG100-XM (Fig. 47).

Os medidores do tipo Pirani, inventados por Marcello Pirani em 1906 (NAIK, 2018), são medidores baseados na condutividade térmica dos gases. O funcionamento desse medidor se baseia no aquecimento de um fio, que irá executar a medida. A medição é realizada pela perda de calor desse fio devido à colisão de partículas do gás do sistema descrita pela teoria cinética dos gases. Um esquema eletrônico desse arranjo pode ser visto na figura 48.

Com alcances típicos de até  $10^{-2}$  Torr, os medidores Pirani são de grande ajudar para medir os vácuos de bombas mecânicas. No sistema era será utilizado juntamente com outro medidor, atuando até a sua precisão máxima possuindo.

#### 6.3.0.1 Medidores Penning

O outro medidor que ajudará o Pirani, nas medidas de pressão no sistema de vácuo, será um medidor de ionização chamado de medidor Penning. O funcionamento de um medidor Penning é baseado no uso de um ânodo plano fixado entre dois catodos frios envoltos a um campo magnético axial, esse sistema ioniza o gás criando uma corrente elétrica que é proporcional a pressão do gás no sistema. A esquematização do sistema



Figura 47 – Medidor Pirani APG-100-xm. Fonte: Edwards Vacuum

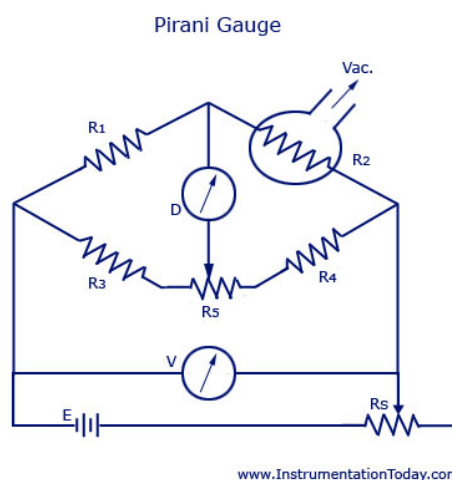


Figura 48 – Esquema do funcionamento de um medidor Pirani geral. Fonte: Instrumental Today.

pode ser visualizada na figura 49

O modelo utilizado no sistema será um Edwards WRG200 (Fig. 50), cujo alcance de medida é de  $10^{-2}$   $10^{-9}$  Torr. Ele começará agir logo após o acionamento da bomba difusora.

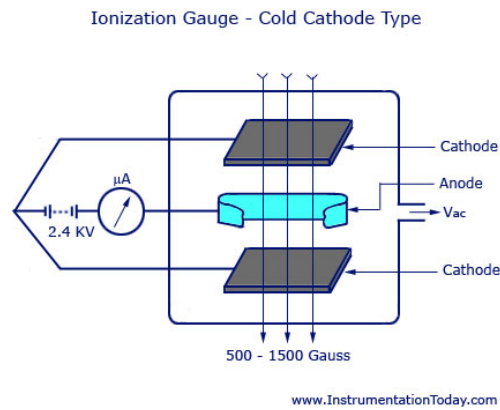


Figura 49 – Esquema eletrônico de um medidor de ionização. Fonte: Instrumental Today.



Figura 50 – Medidor WRG200 da Edwards. Fonte: Edwards Vacuum

## 6.4 Efeito Hall

O efeito Hall consiste na separação de correntes opostas em um material condutor devido a presença de um campo magnético perpendicular, levando a criação de um potencial mensurável que separa as cargas. Descoberto pelo físico Edwin H. Hall, esse efeito é de grande utilidade em propulsão elétrica, já que guia boa parte dos propulsores do tipo Hall.

A esquematização do potencial criado pelo campo magnético perpendicular a uma corrente pode ser visualizado na figura:

Logo, podemos deduzir o potencial que é gerado nesse efeito. Para isso devemos conhecer apenas o campo magnético, a espessura do condutor, a área da sua seção transversal e as forças que agem no sistema. Teremos portanto, partindo do equilíbrio entre as cargas quando estão separadas:

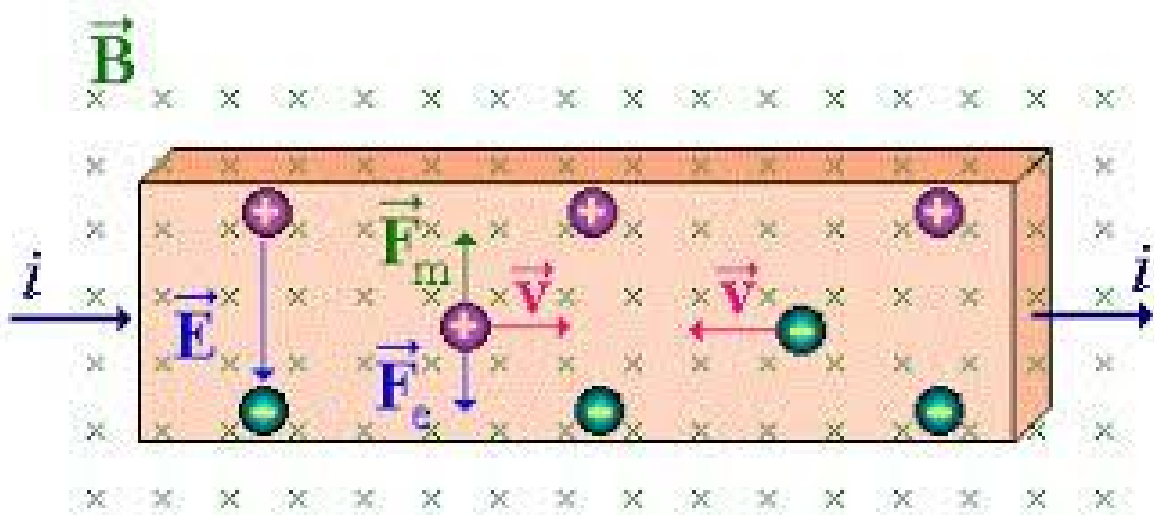


Figura 51 – Esquematização do efeito Hall. Fonte: IF-USP

$$F_e = F_m \quad (6.10)$$

$$q\vec{E} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6.11)$$

Como o campo elétrico e o campo magnético são perpendiculares teremos que:

$$qE = qvB \quad (6.12)$$

Teremos, considerando uma quantidade  $n$  de portadores de carga:

$$nqE = nqvB \quad (6.13)$$

Logo teremos:

$$nq\frac{V}{c} = \frac{I}{A}B \quad (6.14)$$

resolvendo para  $V$  teremos a tensão hall dada por  $V_h$ :

$$V_h = \frac{IBc}{nqA} \quad (6.15)$$

Logo, observamos que esse potencial pode gerar a separação de cargas, isso faz com que possamos usar esse princípio para detecção de campos magnéticos, quando impomos um potencial  $V_h$  ou saber o potencial num conduto quando sabemos o campo magnético. Esse efeito é muito usado para construção de medidores de campo magnético e também pode ser usado para propulsão aeroespacial.