



Universidade de Brasília – UnB
Darcy Ribeiro - Instituto de Física
Física - Bacharelado

**Simulação do ambiente espacial próximo à
Terra: projeto e construção de aparato
experimental**

Autor: João Gabriel Borges Aquino
Orientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Brasília, DF
2023

João Gabriel Borges Aquino

Simulação do ambiente espacial próximo à Terra: projeto e construção de aparato experimental

Monografia submetida ao curso de graduação em Física - Bacharelado da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Física - Bacharelado.

Universidade de Brasília – UnB

Darcy Ribeiro - Instituto de Física

Orientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Brasília, DF

2023

João Gabriel Borges Aquino

Simulação do ambiente espacial próximo à Terra: projeto e construção de aparato experimental/ João Gabriel Borges Aquino. – Brasília, DF, 2023-59 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Darcy Ribeiro - Instituto de Física , 2023.

1. Magnetosfera. 2. Plasmas. I. Prof. Dr. José Leonardo Ferreira. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB - Darcy Ribeiro . IV. Simulação do ambiente espacial próximo à Terra: projeto e construção de aparato experimental

CDU 02:141:005.6

João Gabriel Borges Aquino

Simulação do ambiente espacial próximo à Terra: projeto e construção de aparato experimental

Monografia submetida ao curso de graduação em Física - Bacharelado da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Física - Bacharelado.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 10 de julho de 2023 – Data da aprovação do trabalho:

Prof. Dr. José Leonardo Ferreira
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda
Convidado 1

Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes
Convidado 2

Brasília, DF
2023

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

Resumo

Este trabalho visa apresentar o planejamento e desenvolvimento de um aparato de emissão de campo magnético uniforme para ser incorporado ao projeto Clima Espacial, em andamento no Laboratório de Física de Plasmas (LFP) da Universidade de Brasília (UNB). O projeto Clima Espacial é parte do projeto UNIESPAÇO da AEB (Agência Espacial Brasileira) e tem o objetivo de construir um dispositivo que pode produzir plasmas confinados por campos magnéticos em diferentes configurações. O intuito é reproduzir, adequadamente em escala, por meio de experimentos as condições encontradas em plasmas espaciais próximo à Terra, a fim de estudar ondas e turbulências no plasma da magnetosfera terrestre, associações onda-partícula, dinâmica de plasma e fenômenos de confinamento magnético. Esse modelo requer um campo magnético uniforme para representar o campo magnético interplanetário (*IMF*).

O projeto do aparato experimental para a emissão desse campo foi desenvolvido neste trabalho. Esse campo magnético tem configuração axial, acompanha o eixo da máquina e é gerado por seis bobinas. O trabalho foi dividido nas seguintes etapas: criação de um protótipo em CAD compatível com a câmara de vácuo do LFP, análise da teoria do sistema de bobinas, simulação no software *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), que permite simular diferentes modelos e analisar o comportamento do campo magnético resultante, teste prático no tubo de Crookes, experimento de emissão de plasma em menor escala onde foi adicionado duas bobinas para testes de plasmas magnetizados, apresentação do ambiente metodológico do projeto Clima Espacial, análise de posicionamento, dimensionamento e distribuição de sistema de bobinas, e o desenvolvimento da estrutura. Os resultados obtidos demonstraram que a configuração alcançada proporcionou um campo magnético aproximadamente uniforme em 60 % da câmara de vácuo com a utilização de 6 bobinas. Esse resultado é de grande importância para a simulação de ambientes espaciais próximos à Terra, uma vez que a uniformidade do campo magnético é essencial para reproduzir condições simplificadas.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama do vento solar e várias interações com campo da terra. . . .	16
Figura 2 – Buraco coronal, com extensão de 800 mil km ao longo de seu longo eixo; 02/12/2023].	17
Figura 3 – Grande Preminência solar em 2010 e planeta terra em tamanho real para dimensionar.	19
Figura 4 – Distorção exagerada das linhas de campo pelas ondas Alfvén.	19
Figura 5 – Diagrama esquemático sol-terra.	21
Figura 6 – Detecção da Onda <i>Whistler</i>	22
Figura 7 – Espira Circular no plano xy.	25
Figura 8 – Campo axial de uma configuração de Helmholtz	26
Figura 9 – Configuração das ondas Ordinarias.	28
Figura 10 – Configuração das ondas Extraordinarias.	28
Figura 11 – Página principal do FEMM. Fonte: https://www.femm.info	31
Figura 12 – Tubo de Crookes criado no software FUSION360	32
Figura 13 – Bobinas no tubo de Crookes.	34
Figura 14 – Simulação pelo FEMM para as atuação das bobinas no tudo de Crookes.	35
Figura 15 – Gráfico resultado de intensidade do campo magnético para as bobinas do tubo de Crookes com distância igual ao raio.	36
Figura 16 – Tubo de Crookes utilizando argônio. $B=0 A$	37
Figura 17 – Tubo de Crookes utilizando argônio. $B=25 A$	37
Figura 18 – Tubo de Crookes utilizando nitrogênio. $B=0 A$	37
Figura 19 – Tubo de Crookes utilizando nitrogênio. $B=25 A$	38
Figura 20 – Foto da câmara de vácuo do Laboratório de Física de Plasmas da UNB.	40
Figura 21 – Diagrama técnico da câmara de vácuo e sua estrutura.	41
Figura 22 – Esboço da câmara vista de cima. Projeto Clima Espacial.	42
Figura 23 – Configuração experimental e resultado fotografado no projeto da Universidade da Califórnia.	43
Figura 24 – Configuração experimental e resultado fotografado no projeto da Universidade da Califórnia em 2020.	43
Figura 25 – Diagrama da câmara do LFP para posicionamento das bobinas.	44
Figura 26 – Modelo (i) constituído de 3 bobinas centrais idênticas e 2 externas. A esquerda apresenta a intensidade de \mathbf{B} e a direita é tem-se as bobinas posicionadas na parte lateral do cilindro (câmara de vácuo).	45
Figura 27 – Gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (i)	46

Figura 28 – Simulação no FEMM do Modelo (ii). O retângulo apresenta a variação máximo entre o topo e o mínimo do vale	47
Figura 29 – Resultado gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (ii).	47
Figura 30 – Dimensões para o corte da chapa e visualização do carretel utilizado no modelo (iii).	48
Figura 31 – Estrutura para Bobina	49
Figura 32 – Simulação no FEMM do Modelo (iii).	52
Figura 34 – Esboço projeto Clima Espacial após inserção do modelo (iii). Com 2 pares de bobina externas extras.	52
Figura 33 – Resultado gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (iii)	53
Figura 35 – Projeção para 7 carretéis na câmara Hall realizado no Fusion 360.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de fios AWG conversão para medidas métricas.	49
Tabela 2 – Comprimento total do fio para realização da bobina central.	50

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Revisão fenomenológica	15
2	REVISÃO TEÓRICA	25
2.1	Bobinas Magnéticas	25
2.2	Relação Plasma e Eletromagnetismo	27
3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS BOBINAS MAGNÉTICAS	31
3.1	Teste Prático - Bobinas Magnéticas no Tubo de Crookes	32
4	DESENVOLVIMENTO	39
4.1	A câmara de vácuo	39
4.2	Projeto Clima Espacial	41
4.3	Proposta Central	43
4.3.1	Modelo (iii)	48
5	COMENTÁRIOS FINAIS E PROJEÇÕES FUTURAS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 Introdução

1.1 Revisão fenomenológica

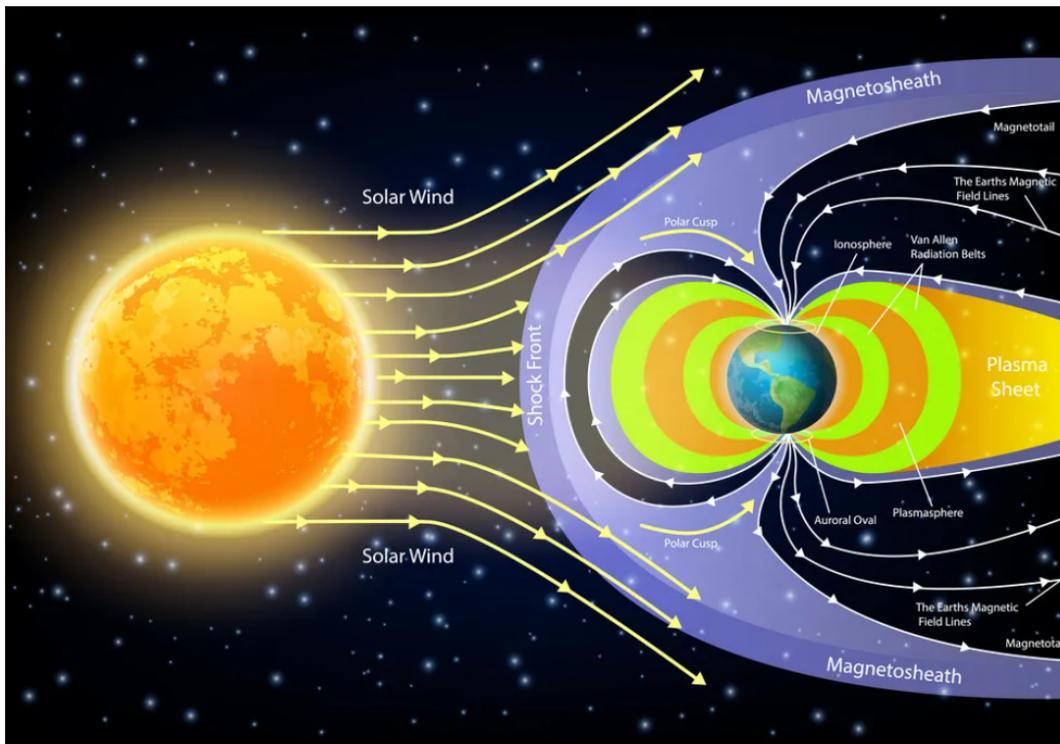
A magnetosfera é a região em torno de um planeta influenciada pelo seu campo magnético, caso este o possua. Essa extensa camada magnética exerce um papel vital ao desviar o vento solar e proteger a atmosfera e biosfera terrestres contra partículas carregadas. Embora a magnetosfera da Terra tenha sido extensivamente estudada por meio de sondas espaciais, teoria e simulações numéricas, ainda persistem deficiências na compreensão da estrutura e dinâmica do plasma próximo à Terra.

Diante disso, em experimentos com plasmas, geralmente realizados em câmaras de vácuo a introdução de um campo magnético uniforme - comumente realizado por meio de bobinas e ímãs - ao longo do eixo da câmara possibilita uma investigação mais detalhada da relação entre o plasma e o campo magnético. Esse campo proporciona o controle preciso do movimento das partículas carregadas, contribuindo para *insights* sobre a dinâmica do plasma e os processos físicos envolvidos.

Embora associar um campo magnético uniforme a uma máquina de simulação da magnetosfera para estudar o comportamento de partículas carregadas na região em torno da Terra seja uma abordagem interessante, é importante ter em mente que essa técnica não é totalmente realista. A magnetosfera é naturalmente não uniforme em sua totalidade, e o *IMF* também não. No entanto, ao comparar as dimensões dos campos terrestre ou o *IMF* com satélites artificiais ou outros corpos produzidos pelo homem presentes no espaço, localmente, para os satélites, o campo é uniforme, o que torna as investigações laboratoriais com essa configuração muito valiosa.

É válido destacar que a Terra - como fonte de plasma magnetosférico - contém uma quantidade considerável de gás ionizado advindo de ambientes internos e externos. No que se refere aos externos, o Sol desempenha papel crucial no fornecimento desse material, assim como mostrado na Figura [1] e, por isso, a ele é dedicado grande interesse nesta pesquisa.

Figura 1 – Diagrama do vento solar e várias interações com campo da terra.



Fonte: *Vector Shock -solar-wind-diagram-vector-21409409*

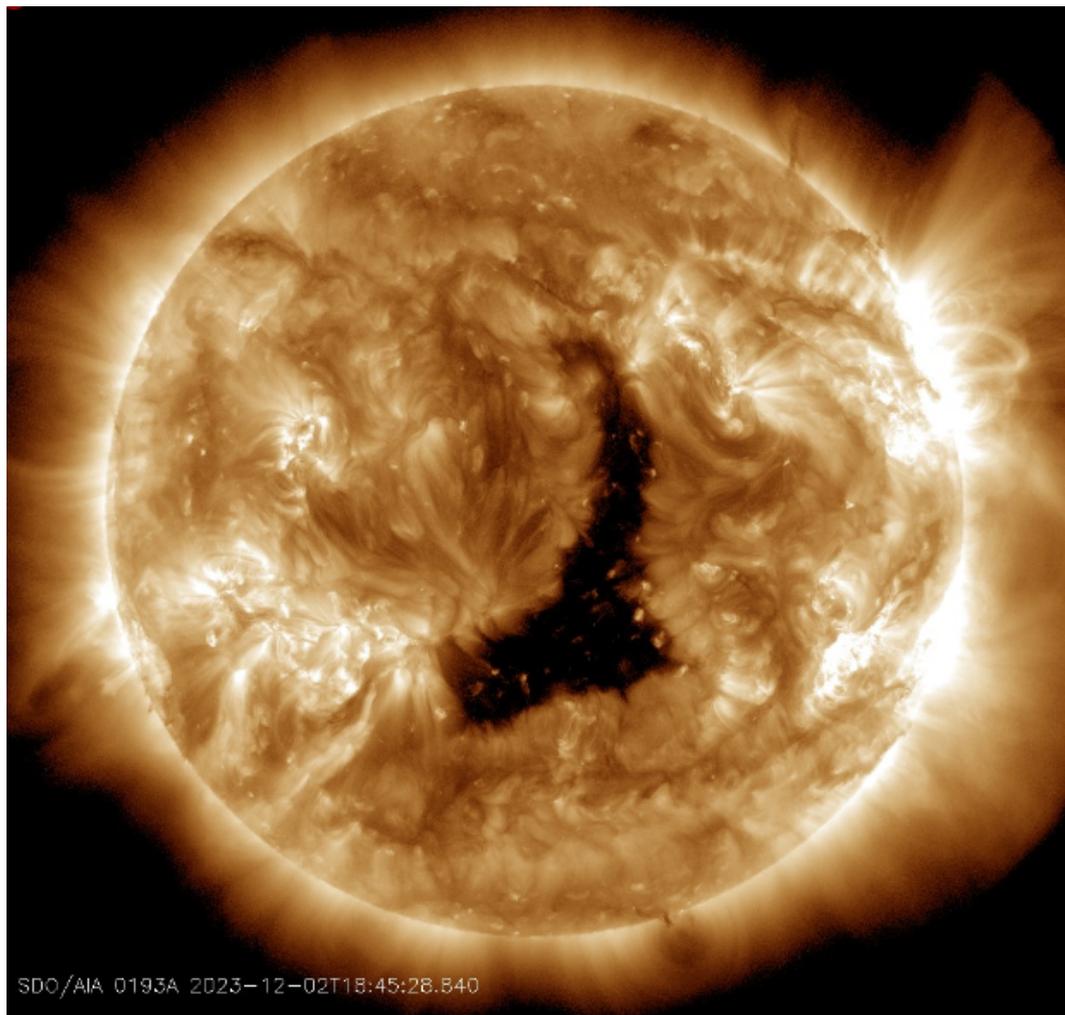
Quando se trata da interação entre o Sol e a Terra, o vento solar destaca-se como um dos pontos mais importantes, recebendo atenção especial por representar um dos principais desafios para a comunidade astrofísica. A problematização desse fenômeno permanece em aberto desde a sua proposição. O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas, composto predominantemente por núcleos de hidrogênio (H^+ , 95%) e hélio (He^+ , 4%), e também por 1% de outras partículas, como carbono, nitrogênio, oxigênio, magnésio, entre outras. Essas partículas transportam o campo magnético do Sol pelo espaço. O fluxo de partículas para fora da superfície solar resulta da enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário, impulsionando as partículas para longe do Sol, apesar da forte atração gravitacional que sofrem.

Ao contrário de outras áreas da física, o conhecimento das propriedades do vento solar é mais baseado em observações do que em fundamentação teórica. No entanto, em órbita da Terra, suas características são bem conhecidas. Sua velocidade, densidade e campo magnético médios nessa região são aproximadamente 400 km/s , $5 \frac{\text{partículas}}{\text{cm}^3}$ e 5 nT , respectivamente (ABBO; OFMAN, 2016). Devido à sua constante expansão, suas características são bastante variáveis, dependendo da região do espaço analisada, atividade solar e da região do Sol de onde os feixes são provenientes. Como o vento solar é um plasma altamente condutor, ele transporta consigo as linhas de campo magnético do Sol, mantendo-as 'congeladas'. Assim, o campo magnético interplanetário é uma expansão do

campo magnético solar. Devido a esse 'congelamento' e à rotação diferenciada do Sol em relação a diferentes latitudes, o aspecto do campo magnético torna-se espiralado [(JR et al., 2011)].

O vento solar é geralmente aludido a três tipos de regimes, a saber: rápido, lento e transiente (NEUGEBAUER; SNYDER, 1962). O rápido origina-se no interior de buracos coronais visto na Figura [2] ou regiões de campo magnético que estão direcionadas para fora da superfície solar com velocidades de até 750 km/s , temperaturas de 800 MK e apresenta ondas Alfvén. A criação do vento solar lento, por outro lado, é aparentemente dada pelas linhas de campo para dentro da superfície solar, como entre áreas turbulentas, e as bordas de um buraco coronal (ABBO; OFMAN, 2016), estes comumente apresentam velocidades de até 500 km/s e temperaturas de 100 MK . Por fim, eventos como ejeção de massa coronal (EMC) são considerados parte do regime transiente e relacionam-se com os ciclos de mancha solar (RAOUAFI et al., 2021).

Figura 2 – Buraco coronal, com extensão de 800 mil km ao longo de seu longo eixo; 02/12/2023].

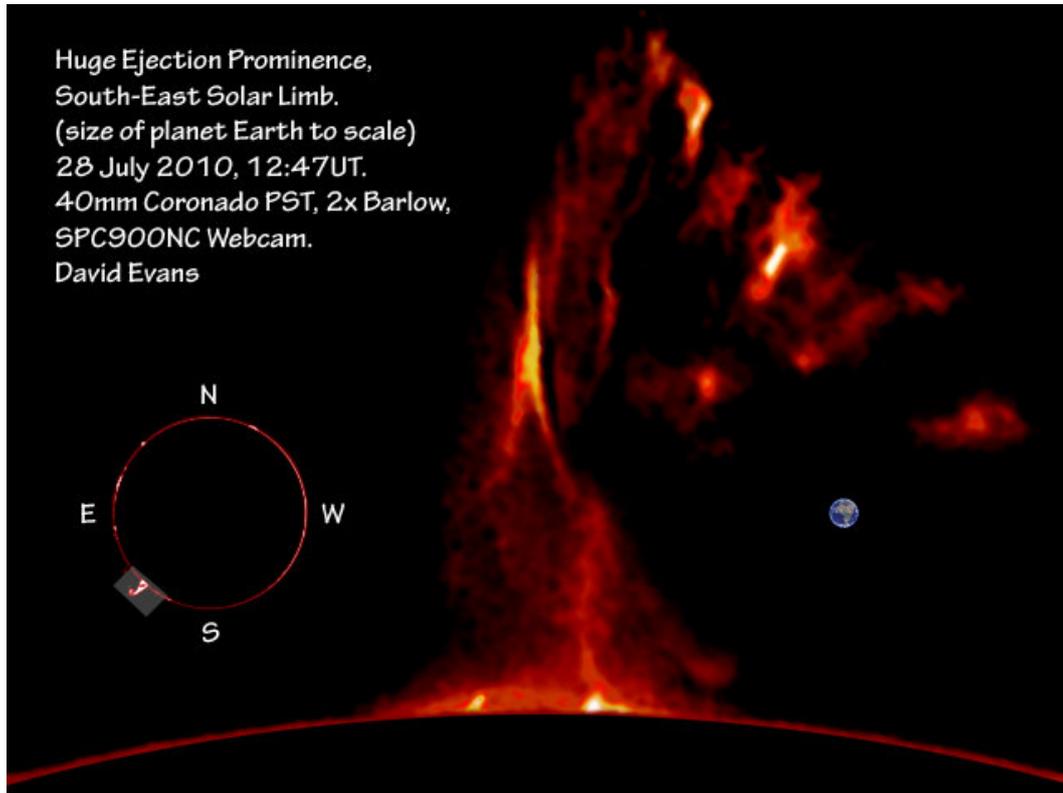


Fonte: Observatório de Dinâmicas Solares (SDO) NASA, <https://sdo.gsfc.nasa.gov>

Este fluxo constante de partículas eletricamente carregadas emitidas pelo Sol geram e carregam campos magnéticos que ao interagir com o campo magnético da Terra, provocam distúrbios no ambiente espacial e em suas proximidades sob a forma de distorções nas linhas de campo terrestre, interferências nos sistemas eletrônicos dos satélites e desgastes desses materiais, bem como indução de correntes elétricas indesejadas, emissão de radiação, tempestades geomagnéticas, auroras boreais, dentre outras possibilidades (ZONG, 2022).

Partículas carregadas também podem ser localizadas em regiões conhecidas como Cinturões de Van Allen, como ilustrado na Figura [1]. Os cinturões em questão são formados por fontes internas e externas de plasma e contêm elétrons e prótons energéticos confinados no campo magnético da Terra, aos quais compete proteger principalmente o planeta contra a radiação cósmica, desviando e capturando partículas carregadas altamente energéticas provenientes de erupções solares e ejeções de massa coronal (EMC) e o constante vento solar (JORGENSEN; PATAMIA; GASSEND, 2007). As EMC são consideradas os eventos mais intensos na superfície do Sol e decorrem da liberação súbita de energia armazenada no campo magnético do Sol na forma de Proeminência Solar, assim como fotografado em 2010 mostrado na Figura [3], a qual nada mais é que enormes estruturas em forma de laço que acompanham as linhas de campo para fora da superfície solar. Uma vez rompidas, geram as EMC.

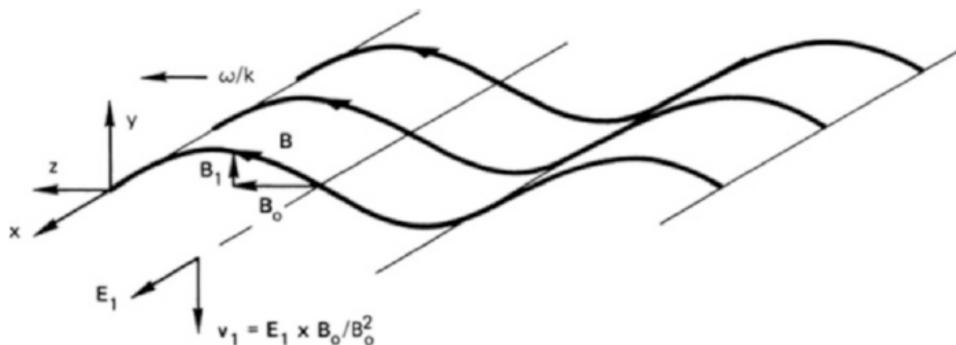
Figura 3 – Grande Preminência solar em 2010 e planeta terra em tamanho real para dimensionar.



Fonte: Blog GAEA HORUS, <http://gaea-horus.blogspot.com/2010/07/proeminencia-solar.html>

A onda Alfvén, onda de baixa frequência de oscilações iônicas na presença de campo magnético e que possui geometria ao longo do campo magnético (\mathbf{B}). Quando as componentes dos campos do fluido e externo são adicionadas, as linhas de força adquirem uma oscilação senoidal, como ilustrado de maneira exagerada na Figura [4]. O campo elétrico induz um deslocamento no plasma, na direção negativa de \mathbf{y} .

Figura 4 – Distorção exagerada das linhas de campo pelas ondas Alfvén.



Fonte: (CHEN, 2016)

Dado que a frequência é baixa, íons e elétrons apresentarão o mesmo deslocamento v_y . Consequentemente, o fluido move-se para cima e para baixo na direção de y . Como a oscilação no campo está se movendo com a velocidade de fase ω/k , a linha de força também está se movendo para baixo. Assim, fluido e linhas de campo oscilam juntos, como se as partículas estivessem ligadas às linhas.

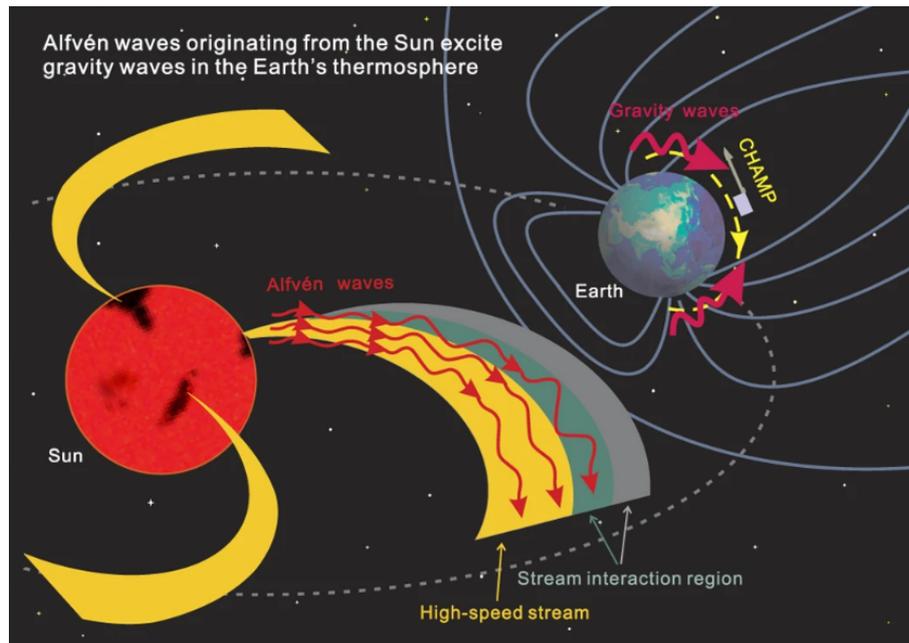
As linhas de força comportam-se como cordas carregadas de massa sob tensão, e uma onda Alfvén pode ser considerada como a perturbação propagante quando as cordas são 'dedilhadas'. Esse conceito de plasma 'congelado' nas linhas de força e movendo-se com elas é útil para entender muitos fenômenos de plasma de baixa frequência [(CHEN, 2016)].

O teorema de Alfvén refere-se ao resultado fundamental da magnetohidrodinâmica, que afirma que fluidos eletricamente condutores e os campos magnéticos dentro deles são compelidos a se moverem juntos no limite de grandes números de Reynolds Magnéticos (Rm) como quando o fluido é um condutor perfeito ou quando as escalas de velocidade e comprimento são infinitamente grandes. Os movimentos de ambos são constrictos de forma que todos os movimentos de fluido perpendicular ao campo magnético resultam em um movimento perpendicular correspondente do campo à mesma velocidade e vice-versa.

A conexão entre o movimento do fluido e o movimento do campo magnético é detalhada em dois resultados principais, frequentemente referidos como conservação de fluxo magnético e conservação de linha de campo magnético. A conservação de fluxo magnético implica que o fluxo magnético através de uma superfície que se move com a velocidade do fluido é constante, e a conservação de linha de campo magnético implica que, se dois elementos de fluido estão conectados por uma linha de campo magnético, eles continuarão conectados até atuação uma força maior (MOZER; PRITCHETT, 2010).

Diferentemente das ondas sonoras ou das ondas eletromagnéticas clássicas, as ondas de Alfvén dependem das propriedades magnéticas do meio em que se propagam. Estas são amplamente utilizadas na produção de plasma, na ressonância de plasmas magnetizados e no acionamento de corrente em experimentos laboratoriais (ELFIMOV et al., 1997). Nos últimos anos, a teoria dessas ondas tem sido intensivamente estudada, não apenas em conexão com experimentos controlados, mas também em aplicações de plasmas espaciais. As propriedades das mesmas dependem fortemente da estrutura do campo magnético e da relação entre a velocidade de fase de Alfvén e a velocidade térmica dos elétrons.

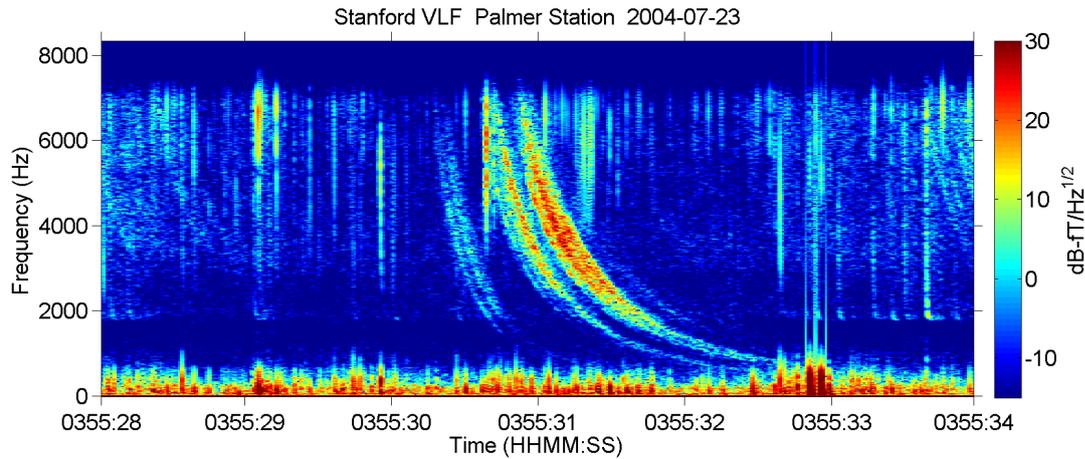
Figura 5 – Diagrama esquemático sol-terra.



Fonte: Nature 2016, <https://www.nature.com/articles/srep18895/figures/4>

As principais ondas eletromagnéticas propagando ao longo de \mathbf{B} é uma onda polarizada circularmente à direita (R) e uma à esquerda (L). A onda R, tem frequência de ressonância com o movimento ciclotrônico dos elétrons. A direção de rotação do plano de polarização alinha-se com a direção de giro dos elétrons. No entanto, a onda perde sua energia ao acelerar continuamente os elétrons, tornando-se incapaz de se propagar.

Por outro lado, a onda L não apresenta ressonância ciclotrônica com os elétrons, pois gira no sentido oposto e tem frequência de corte e banda em baixas frequências. A onda R tem a frequência de corte mais alta, possui duas bandas de frequência e a segunda banda de propagação tem $v_\phi < c$, abaixo da frequência de oscilação dos íons. A onda nesta região de baixas frequências é chamada de modo *whistler*. Estes podem ser causados por descargas elétricas na atmosfera, que geram pulsos eletromagnéticos intensos, os quais se propagam através de hemisférios ao longo das linhas do campo geomagnético (KONAN; MISHRA; LOTZ, 2020). A identificação e caracterização desse fenômeno são meios essenciais para a compreensão da plasmosfera e têm um gráfico de detecção na Figura 6.

Figura 6 – Detecção da Onda *Whistler*.

Fonte: *Stanford VLF 2010*

Com base nos objetivos delineados e nos desafios científicos apresentados, este estudo visa contribuir para o avanço da compreensão dos fenômenos associados a plasmas magnetizados, feixes de partículas carregadas e campos magnéticos. Com o desenvolvimento de um aparato com campo magnético uniforme e regulável, pretende-se abrir novas perspectivas para a investigação teórica e experimental dos efeitos do plasma em resposta a diferentes condições. A relevância desse projeto reside não apenas no enriquecimento do conhecimento fundamental em física de plasmas, mas também na busca por aplicações práticas em áreas como a exploração espacial e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Ao responder aos questionamentos propostos e explorar as complexas interações entre o plasma e o campo magnético, espera-se contribuir para a simulação em laboratório do ambiente espacial no LFP, abrindo caminho para futuras pesquisas e aplicações espaciais que possam beneficiar o Programa Espacial Brasileiro.

O objetivo principal desta pesquisa é projetar e construir um aparato de campo magnético axial uniforme controlável para contribuir com projeto Clima Espacial, que se dedica à simulação do ambiente espacial próximo à Terra - este complexo e instável - de maneira simplificada. Quanto aos objetivos específicos deste trabalho, elencam-se os seguintes pontos:

- gerar um aparato de emissão com um campo magnético regulável e uniforme ao longo do eixo axial da câmara de vácuo do LFP;
- apresentar modelos de simulação do aparato; e
- elaborar uma proposta estrutural da máquina, apresentando seu posicionamento e dimensões e resultados das simulações.

Como não existe atualmente um aparato de emissão de campo magnético axial na câmara de vácuo do LFP a adoção dessa estratégia metodológica justifica-se pela busca das seguintes relevâncias teóricas e experimentais:

- contribuir para a compreensão dos efeitos de ondas e turbulência no plasma da magnetosfera;
- explorar fenômenos envolvendo ondas de plasma no ambiente espacial;
- investigar processos de confinamento magnético e relações magnetoidrodinâmicos ;
- validar modelos teóricos e de simulação da magnetosfera;
- examinar novos regimes de plasma
- estudar de fenômenos associados a ejeção de massa coronal e formação de sub-tempestades geomagnéticas; e
- aplicar novas tecnologias e técnicas de diagnóstico para o *IMF*.

Alguns questionamentos ainda debatidos responsáveis pelos primeiros *insights* desta investigação, são:

1. Como se comporta o plasma confinado próximo à Terra?
2. De que maneira ocorre e quais os impactos do confinamento de plasma próximo à Terra?
3. Quais são os meios para criar um dispositivo que possibilite simular plasma magnetosférico e a interação Sol-Terra em experimento?

O desenvolvimento deste projeto, pretende-se, por ora, oferecer esclarecimento acerca do item 3 somente; os demais serão trabalhados em pesquisas vindouras para que a descrição do fenômeno com plasmas seja mais densa.

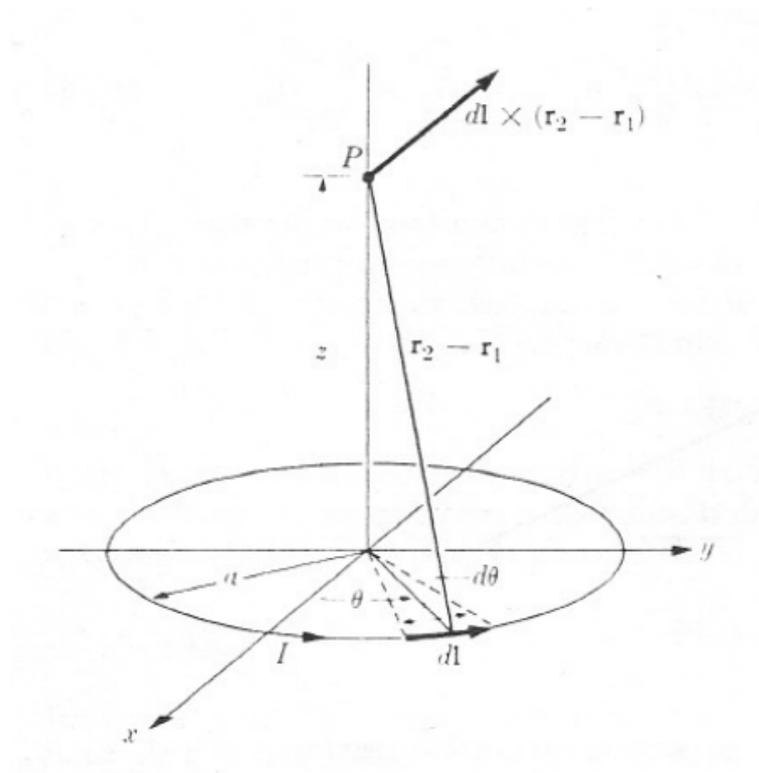
2 Revisão Teórica

2.1 Bobinas Magnéticas

Campos magnéticos são produzidos por correntes elétricas - sejam elas macroscópicas via fios condutores, sejam elas microscópicas associadas aos elétrons em órbita nos átomos. Considere uma espira circular de acordo com a Figura [7]. O campo magnético produzido por tal circuito será calculado no ponto "P" (\mathbf{r}_2) sobre o eixo z ; a espira circular está no plano xy . A indução magnética pela lei de Biot e Savart é dada pela equação:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_2) = \frac{\mu}{4\pi} I_1 \int_1 \frac{d\mathbf{l}_1 \times (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^3} \quad (2.1)$$

Figura 7 – Espira Circular no plano xy .



Fonte: (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1988)

$$d\mathbf{l} = a \cdot d\theta(-i\sin\theta + j\cos\theta),$$

$$\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = -i a \cos\theta - j a \sin\theta + k z,$$

$$|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = (a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$$

Substituindo as equações acima na Equação 2.1 tem-se:

$$B(z) = \frac{I\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(iz\cos\theta + jzasen\theta + \mathbf{k}a^2)}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} d\theta.$$

Assim o campo magnético dado pela bobina é:

$$B(z) = \frac{I\mu_0}{2} \frac{a^2}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \mathbf{k}. \quad (2.2)$$

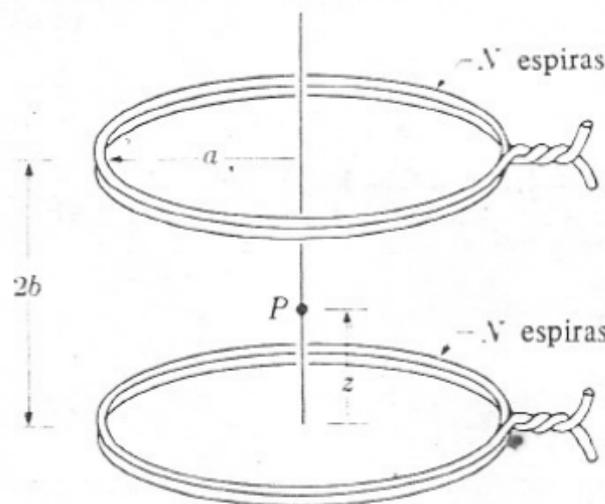
Para um sistema de bobinas que pretende alcançar uma configuração de um campo magnético uniforme axial é geralmente utilizado o arranjo de Helmholtz. Esse se compõe de duas bobinas circulares de mesmo raio, com um eixo comum, separadas por uma distância escolhida de tal modo que a segunda derivada de \mathbf{B} se anula num ponto sobre o eixo a meia distância entre as bobinas. A Figura [8] ilustra essa configuração. A indução magnética no ponto \mathbf{P} é

$$B_z(z) = \frac{N\mu_0 I a^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{[(2b - z)^2 + a^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

obtida pela aplicação da Equação [2.2] a cada uma das bobinas. O fator N é incluído para o caso em que cada bobina contenha N espiras. A derivada primeira de B_z em relação a z é:

$$\frac{dB_z}{dz} = \frac{\mu_0 N I a^2}{2} \left\{ -\frac{3}{2} \frac{2z}{(z^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{3}{2} \frac{2(z - 2b)}{[(2b - z)^2 + a^2]^{\frac{5}{2}}} \right\}$$

Figura 8 – Campo axial de uma configuração de Helmholtz



Fonte: (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1988)

Em $z = b$ esta derivada se anula. A derivada segunda em relação a z é

$$\frac{d^2 B_z}{dz^2} = -\frac{3\mu_0 N I a^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{5}{2} \frac{2z^2}{(z^2 + a^2)^{\frac{7}{2}}} + \frac{1}{[(2b - z)^2 + a^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{5}{2} \frac{2(z - 2b)^2}{[(2b - z)^2 + a^2]^{\frac{7}{2}}} \right\}$$

Em $z = b$ esta se reduz a

$$\frac{d^2 B_z}{dz^2} \Big|_{z=b} = -\frac{3\mu_0 N I a^2}{2} \left\{ \frac{b^2 + a^2 - 5b^2 + b^2 + a^2 - 5b^2}{(b^2 + a^2)^{\frac{7}{2}}} \right\}$$

que se anulará se $a^2 - 4b^2 = 0$. Assim, a escolha apropriada de b é

$$2b = a \tag{2.3}$$

isto é, a separação das bobinas ($2b$) será igual a o raio (a) observado na figura [8]. Com essa separação a indução magnética no ponto médio será:

$$B_z = \frac{\mu_0 N I}{a} \frac{8}{5^{\frac{3}{2}}} \tag{2.4}$$

Esta sessão é uma aplicação básica da lei de Biot-Savart e pode ser encontrada no livro Fundamentos da Teoria Eletromagnética no capítulo 8.4 (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982).

2.2 Relação Plasma e Eletromagnetismo

Magnetohidrodinâmica (MHD) trata do estudo da dinâmica de fluidos condutores de eletricidade. Exemplos desses fluidos incluem plasmas, metais líquidos, água salgada ou eletrólitos. Tal área de pesquisa foi iniciada por Hannes Alfvén (SHEIKHOLESAMI; GANJI, 2016), pela qual ele recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1970. O conceito fundamental por trás da MHD é que campos magnéticos podem induzir correntes em um fluido condutor em movimento, o qual - por sua vez - cria forças no fluido e altera o próprio campo magnético. O conjunto de equações que descrevem a MHD é uma combinação das equações de Navier-Stokes da dinâmica dos fluidos e das equações de Maxwell do eletromagnetismo:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p + g\rho \tag{2.5}$$

$$\mathbf{E} + v \times \mathbf{B} = \mathbf{j}\eta \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(v\rho) = 0 \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \tag{2.8}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\mu_0} \tag{2.9}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (2.12)$$

Considerando a propagação de ondas eletromagnéticas de plasma em contato com o campo magnético presente, os casos onde a interação é perpendicular e paralela trazem resultados como:

$$\mathbf{k} \perp B_0, E_1 \parallel B_0 : \frac{c^2 k^2}{w^2} = (1 - \frac{w_p^2}{w^2})(Onda - O) \quad (2.13)$$

$$\mathbf{k} \perp B_0, E_1 \perp B_0 : \frac{c^2 k^2}{w^2} = (1 - \frac{w_p^2 w^2 - w_p^2}{w^2 w^2 - w_h^2})(Onda - X) \quad (2.14)$$

$$k \parallel B_0 : \frac{c^2 k^2}{w^2} = 1 - \frac{w_p^2/w^2}{1 - (w_c/w)}(Onda - R) \quad (2.15)$$

$$\frac{c^2 k^2}{w^2} = 1 - \frac{w_p^2/w^2}{1 + (w_c/w)}(Onda - L) \quad (2.16)$$

Ondas de íons:

$$k \parallel B_0 : w^2 = k^2 \nu_A^2 (Ondas - Alfvén) \quad (2.17)$$

$$k \perp B_0 : \frac{w^2}{k^2} = c^2 \frac{\nu_s^2 + \nu_A^2}{c^2 + \nu_A^2} (Ondas - Magnetosônicas) \quad (2.18)$$

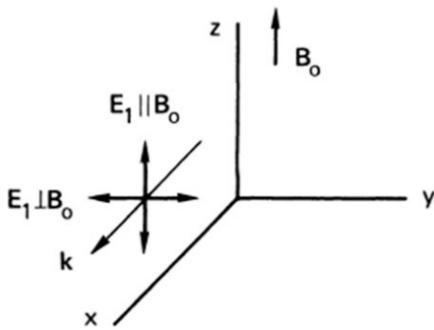


Figura 9 – Configuração das ondas Ordinarias.

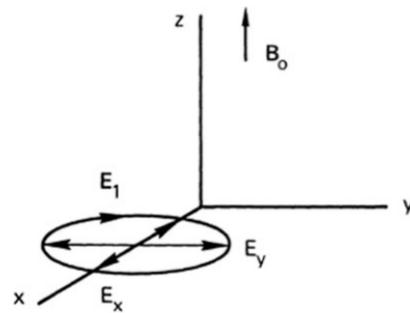


Figura 10 – Configuração das ondas Extraordinarias.

Este conjunto de relações de dispersão é bastante simplificado, cobrindo apenas as direções principais de propagação visto nas Figuras 9 e 10. Frequentemente, assume-se um arranjo complexo ser uma modificação ou sobreposição desses modos básicos de oscilação (CHEN, 2016). Apesar de sua limitação, trata de um rol de equações muito

útil como referência ao discutir movimentos de ondas mais complexos, pois em todas as configurações de interação do campo magnético, seja com elétrons ou íons, transversal ou paralelo, é possível obter relações de dispersão que caracterizam o movimento das partículas com carga e estas sempre dependem do campo magnético atuante. A MHD provê as ferramentas de análise necessárias para a compreensão da interação campo-carga destas e outras ondas a ponto de colaborar com a ampliação e o aprofundamento de fenômenos interplanetários ao redor da Terra.

3 Simulação Computacional das Bobinas Magnéticas

As simulações foram realizadas pelo Finite Element Method Magnetics (FEMM) Figura [11], um programa apropriado para solucionar problemas eletromagnéticos de baixa frequência em duas dimensões planas e domínios simétricos ao eixo. O FEMM atualmente aborda problemas magnetoestáticos lineares e não-lineares; problemas magnéticos com tempo harmônico linear e não-linear; problemas eletrostáticos lineares; e problemas de fluxo de calor no estado de equilíbrio.

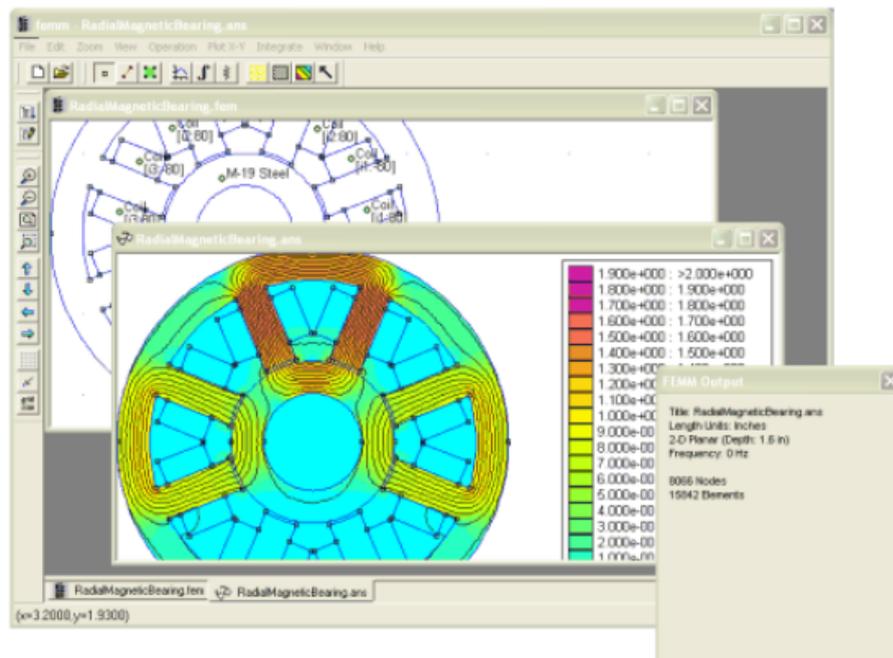


Figura 11 – Página principal do FEMM. Fonte: <https://www.femm.info>

O programa permite a criação de uma geometria que consiste em um tubo cilíndrico e bobinas, no qual o tubo funciona como uma estrutura central ao redor do qual as bobinas são posicionadas. Por meio desse arranjo torna-se possível definir a propriedade de permeabilidade magnética dos materiais envolvidos: o tubo cilíndrico (câmara de vácuo), das bobinas constituídas de poliacetal e dos fios de cobre.

Pode-se também especificar o número de voltas em cada bobina, a corrente elétrica que passa por elas e sua localização ao redor do tubo cilíndrico. Esses parâmetros são fundamentais tendo em vista que afetam a força e a direção do campo magnético gerado por cada bobina.

Munido dessas especificidades, o FEMM realiza a simulação do sistema utilizando

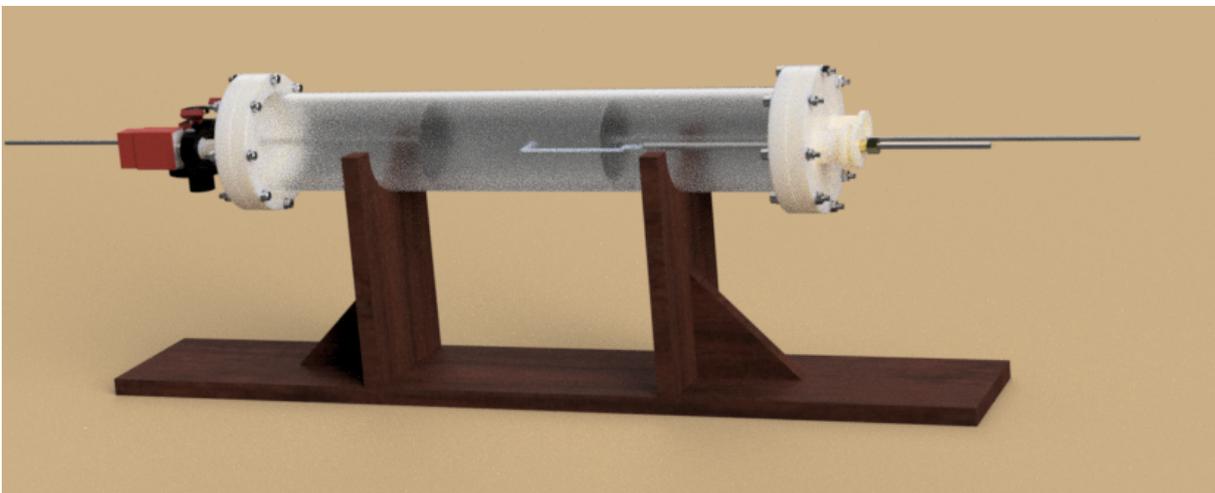
o método dos elementos finitos. Ele utiliza um problema variacional que envolve a solução da equação diferencial ao longo do domínio do problema. Esse domínio é dividido em um grande número de sub-regiões não sobrepostas, chamadas de elementos finitos, cada uma com uma geometria simples (por exemplo, triângulos). Em cada sub-região, a solução da equação diferencial parcial é aproximada por uma função polinomial simples. Esses polinômios devem ser unidos para que, onde as arestas dos elementos adjacentes se sobrepõem, as representações do campo devem concordar para manter a continuidade. Uma vez feito isso, a integral variacional é avaliada como uma soma de contribuições de cada elemento finito. O resultado é um sistema algébrico para a solução aproximada, tendo um tamanho finito em relação à equação diferencial parcial original de dimensionalidade infinita. Se forem usadas regiões pequenas o suficiente, a solução aproximada se aproxima da solução exata (BALTZIS, 2010).

Merece menção também que os resultados coletados da simulação podem ser observados sob a forma visual ou de dados. Essa flexibilidade no manejo dos dados também perfaz-se no estudo do campo magnético, o qual pode apresentar-se em diferentes seções do tubo cilíndrico ou em pontos específicos de interesse, bem como incluir informações sobre a intensidade, direção e outras propriedades relevantes.

3.1 Teste Prático - Bobinas Magnéticas no Tubo de Crookes

Visando otimizar as qualidades do campo magnético, primeiramente, foi realizado um experimento menor - o tubo de Crookes Figura [12] - constituído por um sistema de confinamento magnético simples por meio da configuração de Helmholtz. A ideia consistiu-se em aperfeiçoar o experimento já em funcionamento e criar bobinas idênticas para o tubo.

Figura 12 – Tubo de Crookes criado no software FUSION360



Fonte: O autor

A título de conhecimento, o tubo de Crookes é um dispositivo científico histórico inventado por Sir William Crookes no século XIX, usado para investigar fenômenos elétricos em baixas pressões de gás. Ele é composto por um tubo de vidro evacuado contendo um gás a baixa pressão, geralmente, mercúrio ou argônio, eletrodos internos (ânodo e cátodo) e um sistema para gerar diferença de potencial elétrico entre os eletrodos (BEHLING, 2018).

Quando uma alta voltagem é aplicada ao tubo de Crookes, ocorrem vários fenômenos físicos, dentre eles, a formação de plasma devido à ionização dos átomos presentes no gás de baixa pressão.

Inicialmente, a alta voltagem acelera os elétrons livres ali presentes, os quais colidem com os átomos do gás e fornecem energia suficiente para a remoção de outros elétrons dos mesmos átomos, excitando suas moléculas. Como resultado, alguns átomos tornam-se íons positivos, e os elétrons removidos contribuem para excitar mais moléculas, causando uma reação em cadeia chamada Descarga de Townsend (MEYERS, 2002) - ela, o principal motivo da formação do plasma no tubo.

Por conta da formação desse plasma no tubo cilíndrico, a escolha para este experimento foi o par de bobinas de Helmholtz com a função de criar um campo magnético uniforme no interior do tubo. Quando posicionadas corretamente, elas produzem um campo magnético uniforme ao longo do eixo central do tubo de Crookes. As partículas carregadas são, então, sujeitas a uma força perpendicular à direção do campo magnético e à velocidade das partículas, em conformidade com a Lei de Força de Lorentz.

A introdução do campo magnético no tubo de Crookes resulta em vários efeitos, como (MEYERS, 2002):

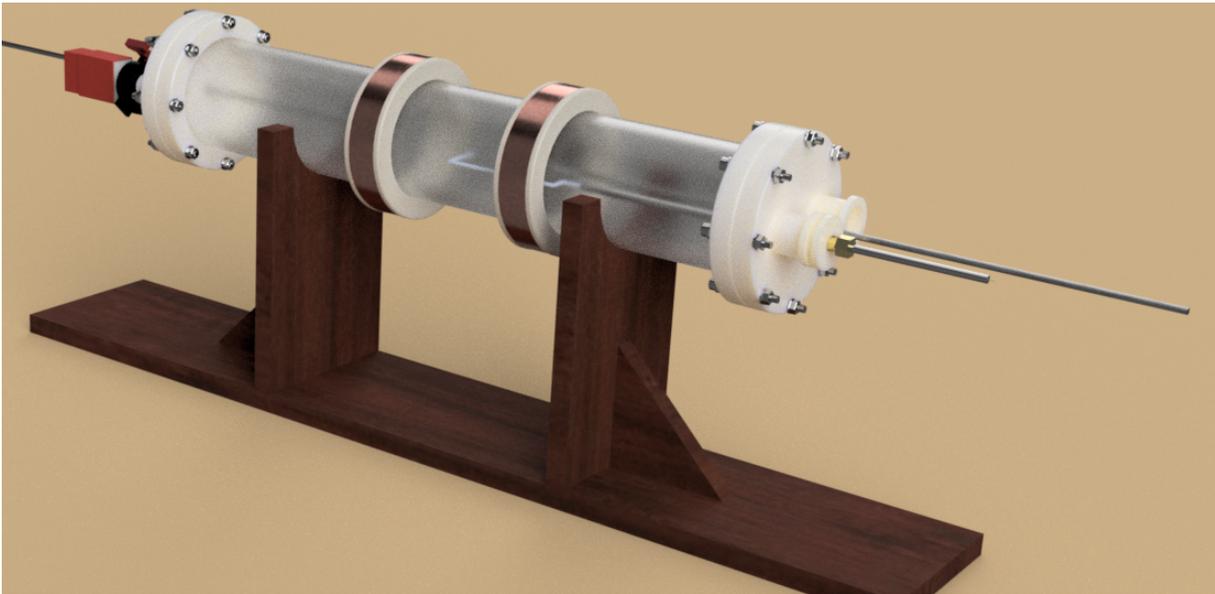
(i) Desvio dos raios catódicos: os raios catódicos, que consistem em elétrons em movimento rápido, são desviados de sua trajetória original quando em contato com o campo magnético em decorrência da força magnética exercida nos elétrons em direção perpendicular ao campo e à sua velocidade, conforme acima mencionado. O desvio desses raios permite determinar a relação entre a carga dos elétrons e sua massa, além de proporcionar informações sobre a natureza das partículas carregadas.

(ii) Formação de padrões: o campo magnético pode afetar a trajetória dos elétrons e íons no plasma, levando à formação de padrões ou estruturas característicos, os quais podem ser observados como regiões brilhantes ou escuras no tubo de Crookes.

(iii) Supressão da zona luminosa: o campo magnético aplicado pode influenciar a região luminosa do plasma. A depender da intensidade do campo, pode-se suprimir ou reduzir a emissão de luz visível na zona luminosa, tornando-a menos brilhante. Esse efeito desdobra-se da interação entre o campo e os elétrons acelerados no plasma, relação esta que afeta os movimentos dos elétrons e a recombinação dos átomos excitados.

Em resumo, ao adicionar um par de bobinas de Helmholtz na experiência do tubo de Crookes Figura [13], cria-se um campo magnético uniforme, o qual favorece o estudo dos desvios de raios catódicos, a formação de padrões no plasma e a influência na zona luminosa.

Figura 13 – Bobinas no tubo de Crookes.



Fonte: O autor

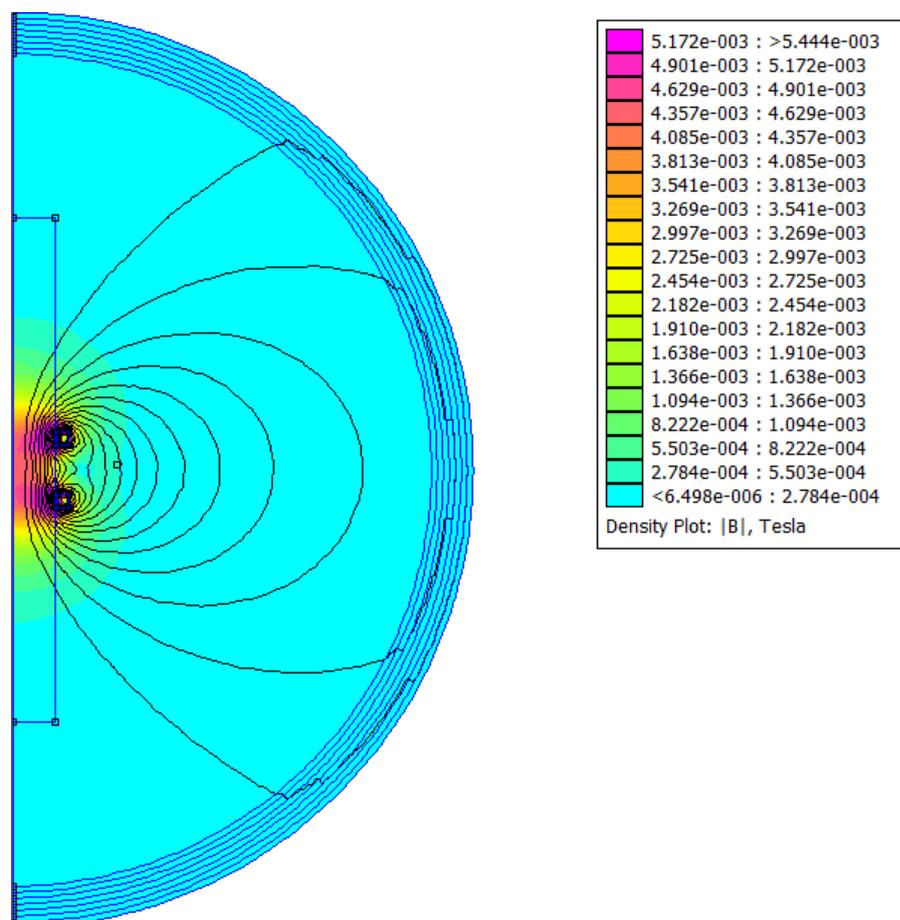
A primeira etapa envolveu medidas sistemáticas para determinação da localização e sustentação das bobinas com vistas a garantir a facilidade de sua instalação e deslocamento.

Acrescido a isso, outros cuidados foram tomados: (i) realizou-se um estudo utilizando o programa FEMM para simular o desempenho das bobinas Figura [14]; (ii) fez-se uso de coordenadas previamente estabelecidas para fins de definição do formato da seção transversal das bobinas; e (iii) determinou-se o número de voltas na bobina com base no comprimento e na relação do número de camadas assim como no calibre do fio de cobre utilizado, AWG 10, de diâmetro 2,6 *mm*.

O tubo de vidro possui um raio de 50 *mm*, as bobinas foram projetadas para ter um raio de 52 *mm* e um comprimento de 60 *mm*; para cada camada na estrutura, então, foram necessárias 23 voltas de fio. No que concerne a contenção dos fios à estrutura da bobina, requiriu-se paredes de altura de 10,4 *mm* para sustentar as 4 camadas na seção transversal, o que implicou no quantitativo de 92 voltas.

O resultado das simulações, em que as duas bobinas foram construídas no tubo, pode ser visto na Figura 14:

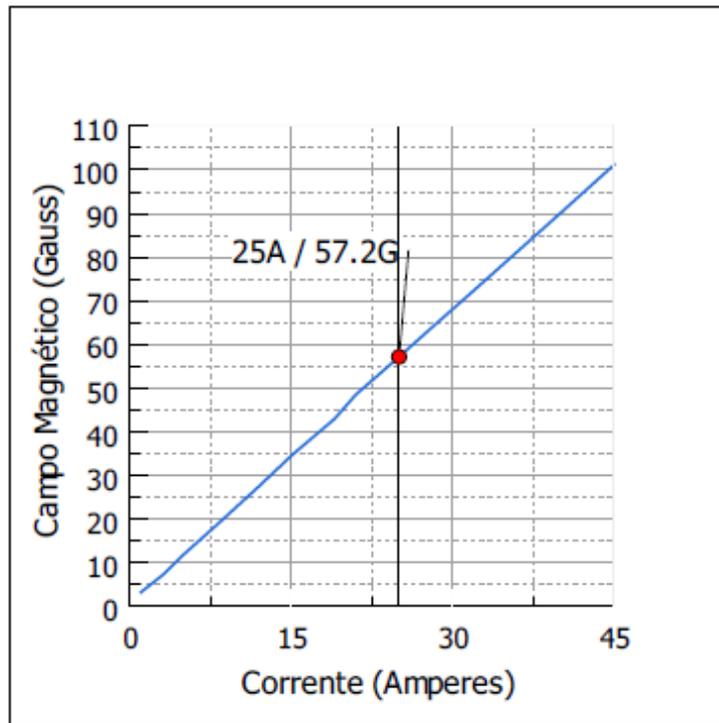
Figura 14 – Simulação pelo FEMM para as atuação das bobinas no tubo de Crookes.



Fonte: O autor

Vale frisar que as duas bobinas estão conectadas em série e, com uma aplicação de apenas 5 A, gerou-se um total de $4 \times 10^{-3} T$ ou 40 G para o campo magnético.

Figura 15 – Gráfico resultado de intensidade do campo magnético para as bobinas do tubo de Crookes com distância igual ao raio.



Fonte: O autor

O resultado de intensidade para as bobinas já construídas em configuração de Helmholtz (Distância = 2* Raio das bobinas) em gráfico pode ser observado na Figura [15]. Nela é possível observar que a intensidade do campo resultante encontrado foi quase 4 vezes menor que o esperado para 5 A. Isso se deve porque a utilização do fio não foi a ideal, a estrutura impossibilitou a quantidade de voltas suficientes para um campo mais intenso.

Mesmo assim as Figuras [16,17,18,19] apresentam alguns resultados obtidos com a aplicação das bobinas magnéticas no tubo de Crooks com 0 A e 25 A ($\approx 60G$). Nestas imagens fica clara que há atuação do campo magnético resultante das bobinas magnéticas no plasma DC (*Direct Current*) criado pelo tubo.

Figura 16 – Tubo de Crookes utilizando argônio. $B=0 A$

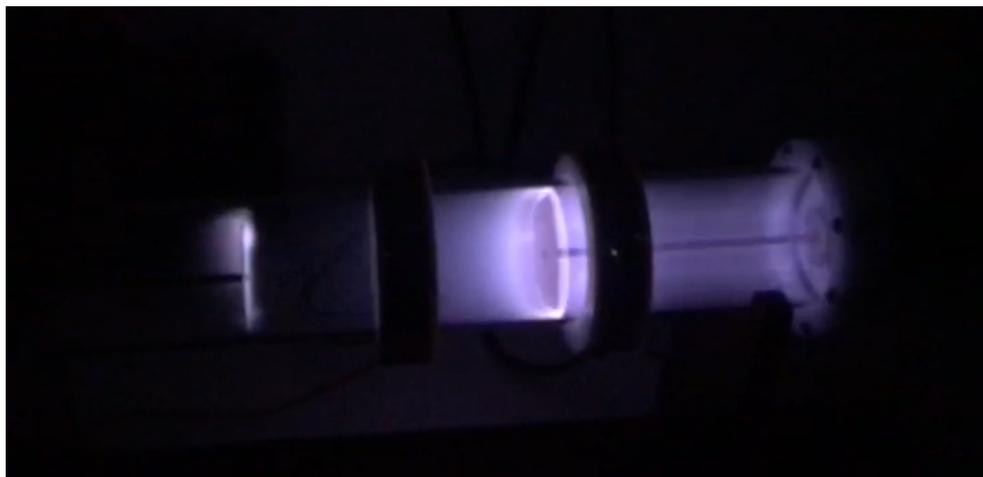


Figura 17 – Tubo de Crookes utilizando argônio. $B=25 A$

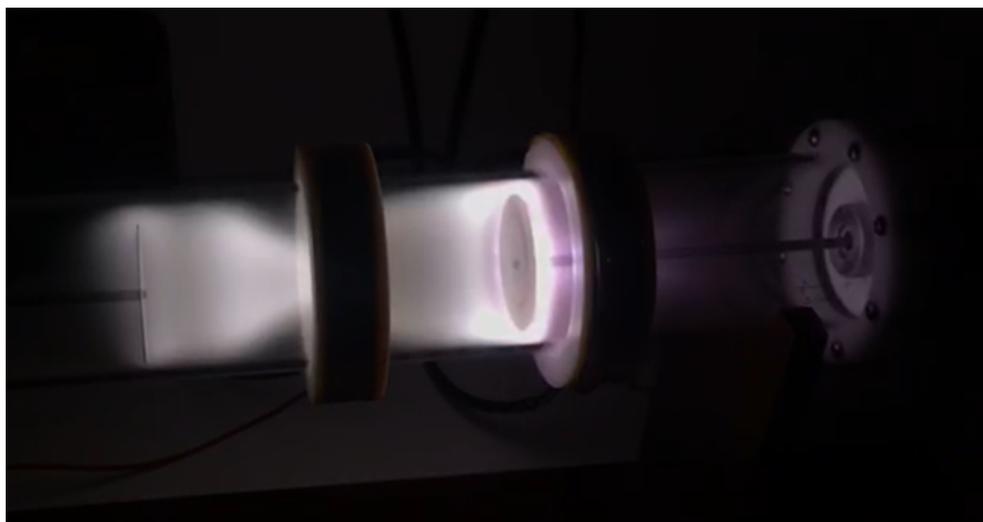


Figura 18 – Tubo de Crookes utilizando nitrogênio. $B=0 A$

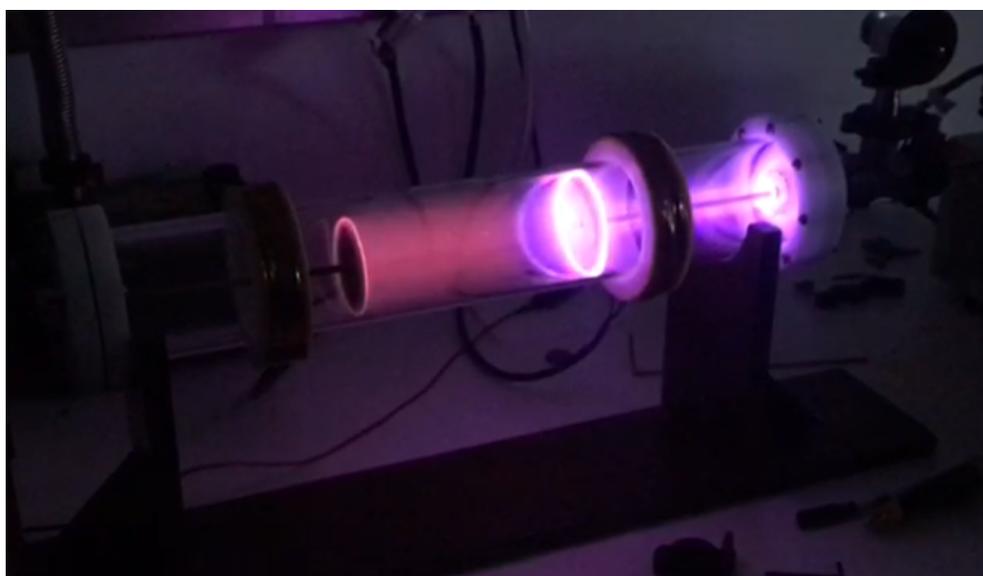
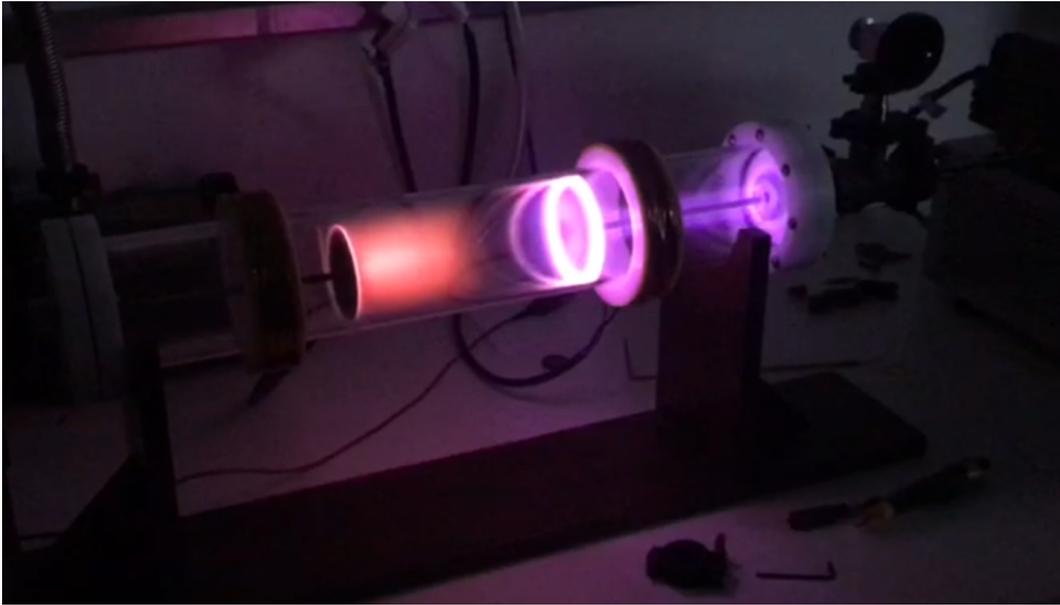


Figura 19 – Tubo de Crookes utilizando nitrogênio. $B=25\text{ A}$ 

Fonte: O autor

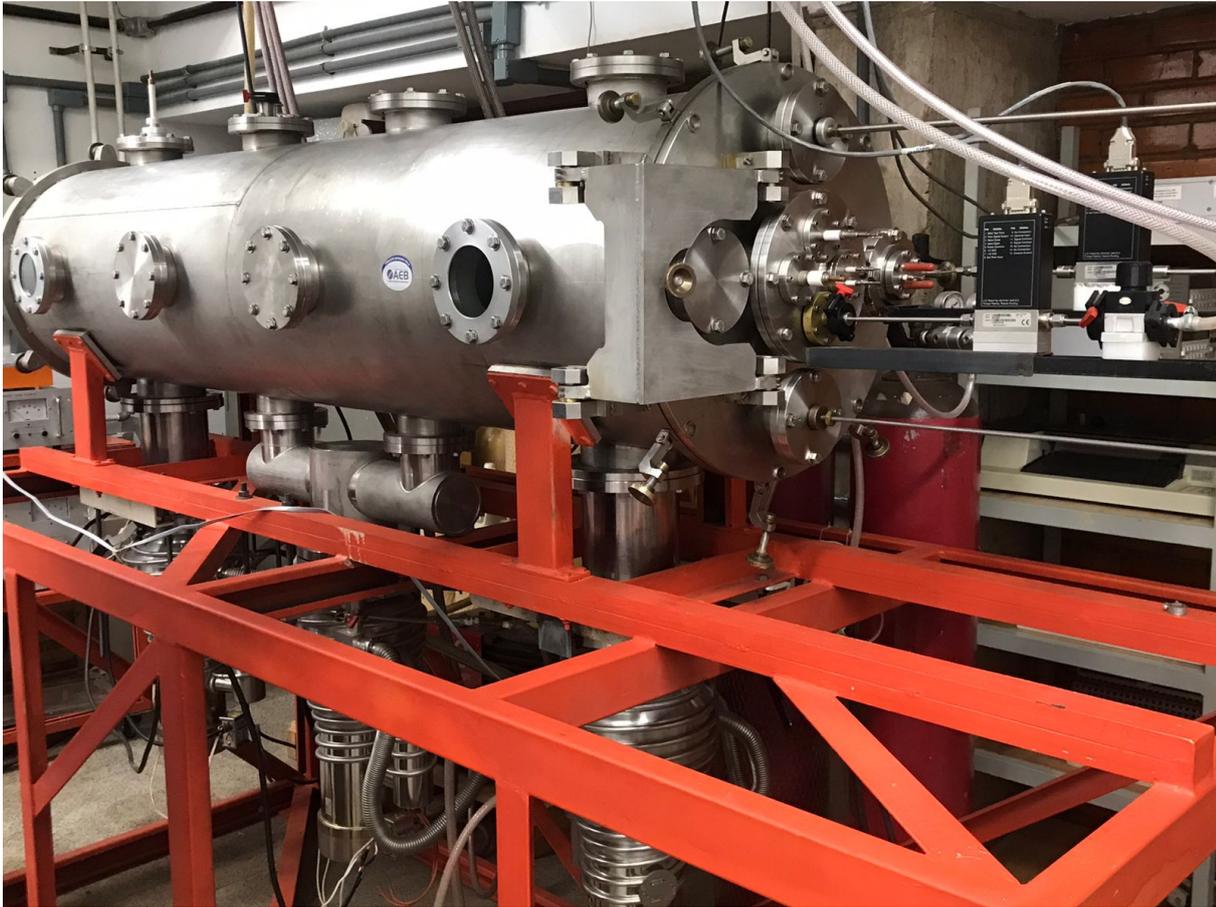
4 Desenvolvimento

4.1 A câmara de vácuo

O LPF da UnB é equipado com uma câmara de vácuo com as seguintes dimensões: 0,5 *m* de diâmetro e 2,0 *m* de comprimento mostrados nas Figuras [20] e [21]. Além de já se encontrar instalada, a câmara apresenta-se em pleno funcionamento para testes de propulsores elétricos. Um dos principais enfoques desse aparelho atualmente é o estudo do Propulsor Hall de Ímã Permanente (PMHT), também conhecido como PHALL . O plasma gerado possui a forma de uma coluna cilíndrica e é considerado relativamente frio pela literatura da área devido às suas propriedades de temperatura - a qual oscila em torno de 2 *eV* (25 *MK*) - e taxa de ionização. O componente central desse aparato é a câmara de vácuo cilíndrica, feita de aço inoxidável, capaz de atingir uma pressão correspondente a 10^{-7} *Torr*.

Tal câmara é munida de um total de 4 bombas de vácuo para sucção. A primeira é uma bomba mecânica com capacidade de funcionamento de até 10^{-3} *Torr*, que funciona à base de palhetas em conjunto de uma câmara de óleo e apresenta uma vazão de 35 m^3/h . As outras três são bombas de difusão, onde o gás de difusão é aquecido via óleo, com uma vazão média total de 10800 m^3/h .

Figura 20 – Foto da câmara de vácuo do Laboratório de Física de Plasmas da UNB.



O autor

A caracterização dos parâmetros do plasma dentro dessa cúpula - como densidade e temperatura dos elétrons, perfil de potencial do plasma e instabilidades - é realizada por meio de sondas Langmuir (WONG; CALIFORNIA, 1977). A aceleração iônica é determinada por sensores de energia enquanto a dinâmica dos íons no canal de aceleração é mensurada com base na temperatura dos íons por meio da técnica de espectroscopia de plasma.

A configuração citada proporciona o estabelecimento de uma plataforma robusta não somente para a investigação de plasmas como também para a obtenção de dados essenciais, capazes de lançar luz sobre as propriedades e os fenômenos relacionados. A disponibilidade de instrumentação e técnicas de medição avançadas também abre possibilidades para futuros estudos sobre o comportamento do plasma e o desenvolvimento de novas aplicações na área de propulsão espacial.

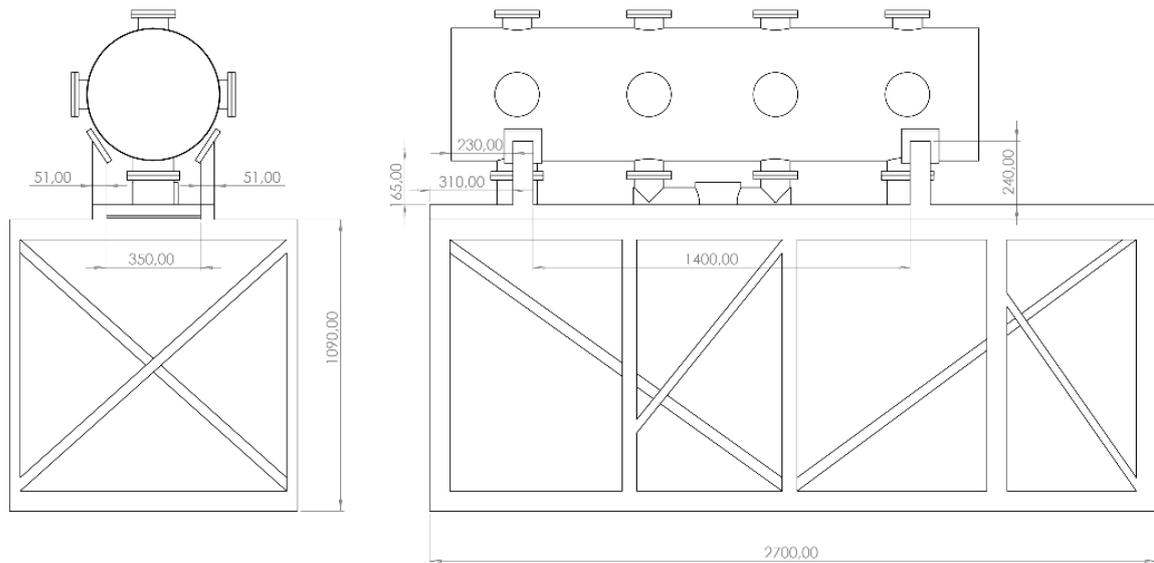


Figura 21 – Diagrama técnico da câmara de vácuo e sua estrutura.

4.2 Projeto Clima Espacial

Uma vez que as características do vento solar (ou seja, velocidade do vento, densidade, etc.) estão além do controle direto, sua importância paramétrica só pode ser avaliada por meio de um conjunto de medidas simultâneas amplamente dispersas por toda a magnetosfera, uma perspectiva ambiciosa já que isso tudo tem de ser feito fora da atmosfera. Da mesma forma, muitos modelos de simulação computacional do vento solar/magnetosfera aproximam o ambiente real do plasma espacial invocando resistividade *ad hoc* ou uma resistividade puramente numérica para alcançar dissipação de energia ou difusão de campo (Yur et al., 1995).

O Projeto Clima Espacial tem como objetivo principal transformar a câmara mencionada na seção anterior em um ambiente de plasma dinâmico que reproduza o máximo possível de características geomagnéticas. Atualmente, a reprodução exata dos parâmetros da magnetosfera em laboratório não é possível. Talvez nem seja desejável, uma vez que as diferenças qualitativas entre o experimento de laboratório e o ambiente espacial podem, na verdade, ampliar o conhecimento da magnetosfera, fornecendo um espaço de parâmetros mais relevante para testar mecanismos e modelos generalizados. Portanto, o conjunto de características do laboratório reproduz a magnitude relativa, em vez do valor absoluto, dos parâmetros do espaço.

Vários diagnósticos medem quantidades associadas ao plasma do vento solar simulado, tais como velocidade do fluxo de plasma, densidade, temperatura e campos elétricos e magnéticos, os quais podem ser observados na Figura [22].

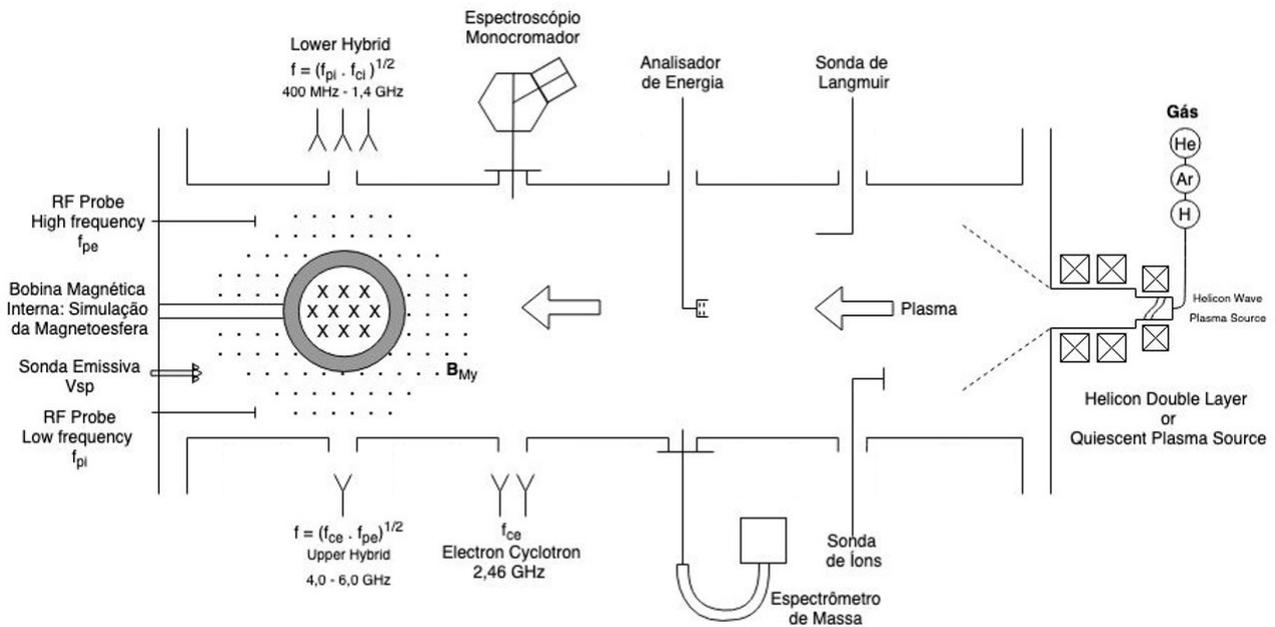


Figura 22 – Esboço da câmara vista de cima. Projeto Clima Espacial.

Alguns experimentos relatam simulações em laboratório com análogos do IMF voltados para o sul ou para o norte. O primeiro experimento foi realizado há 110 anos por Birkeland [(WIKIPÉDIA, 2021)], representando um avanço significativo para a física espacial. Ele utilizou experimentos de laboratório com um dispositivo chamado *Terrrella*, que manipula um feixe de elétrons contra um campo magnético dipolar para simular a magnetosfera terrestre. A partir da década de 1950, feixes de plasma foram empregados por Bostick (1963), Cladis (1964), Kawashima e Fukushima (1964), Kawashima e Mori (1965) [(YUR et al., 1999)]. Nos últimos 50 anos, muitos experimentos com *terrella* foram conduzidos por diversos grupos [(PODGORNY; DUBININ; POTANIN, 1978)], [(BAUM; BRATENAHN, 1982)], [(MINAMI; TAKEYA, 1985)], entre outros.

Medidas dos regimes de fluxo lento e rápido do 'vento solar' foram realizadas nesses experimentos. O fluxo lento foi caracterizado por um número de Mach de Alfvén (número característico para a relação entre a velocidade do plasma e a velocidade da onda Alfvén) relativamente pequeno ($\approx 1,5$) e um número de Knudsen (o número de Knudsen é um número adimensional, definido como a razão entre o comprimento do caminho livre médio molecular e uma escala de comprimento fisicamente representativa. Se o número de Knudsen é próximo ou maior que 1, o caminho médio livre de uma molécula é comparável a escala de comprimento do problema, e a consideração de continuidade da mecânica dos fluidos não é mais uma boa aproximação. Nesse caso, a mecânica estatística deve ser usada) de cerca de 5, enquanto no regime de alta velocidade, o comprimento de inércia iônica era maior que o tamanho da magnetosfera, implicando fortes efeitos Hall [(SHAIKHISLAMOV et al., 2014)]. O campo elétrico foi medido diretamente no plasma

e verificado como correspondente ao IMF e à velocidade de convecção fornecida. Uma característica específica desses experimentos é que o campo magnético foi congelado diretamente no plasma dentro da pistola de plasma. No entanto, tal técnica não foi repetida posteriormente.

Outros grupos [(YUR et al., 1999)] usaram em vez disso um campo magnético externo aplicado entre a pistola de plasma e a região de interação. Nas figuras [23] e [24], o ponto de reconexão magnética foi observado na cauda quando o campo voltado para o sul foi aplicado.

Figura 23 – Configuração experimental e resultado fotografado no projeto da Universidade da Califórnia.

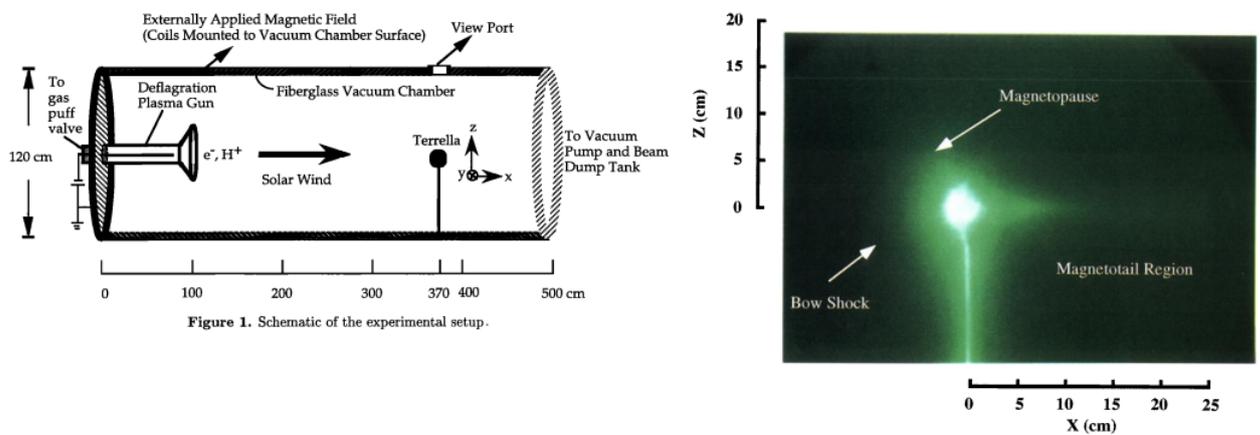
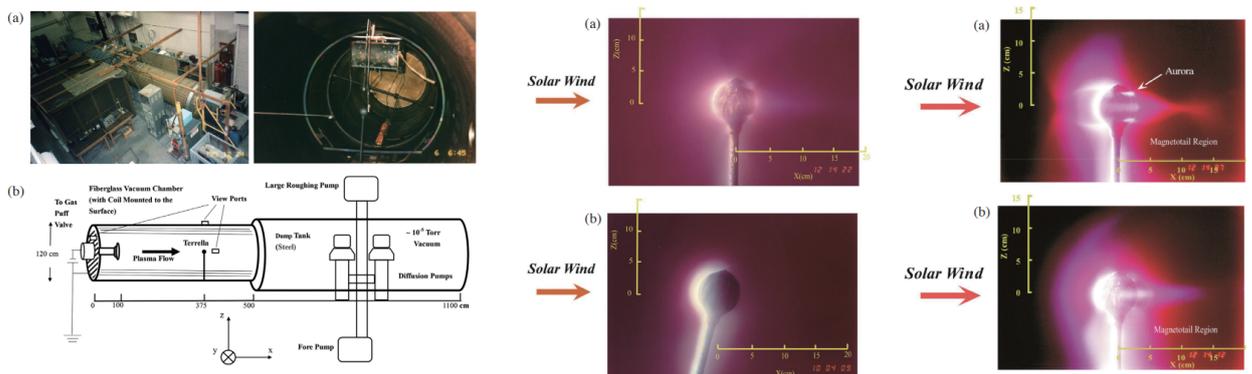


Figure 1. Schematic of the experimental setup.

Fonte: (YUR et al., 1999)

Figura 24 – Configuração experimental e resultado fotografado no projeto da Universidade da Califórnia em 2020.



Fonte: (FU et al., 2020)

4.3 Proposta Central

A proposta central é idealizar a configuração das bobinas que serão instaladas ao redor do eixo central da câmara de vácuo do LFP para representar o campo magnético

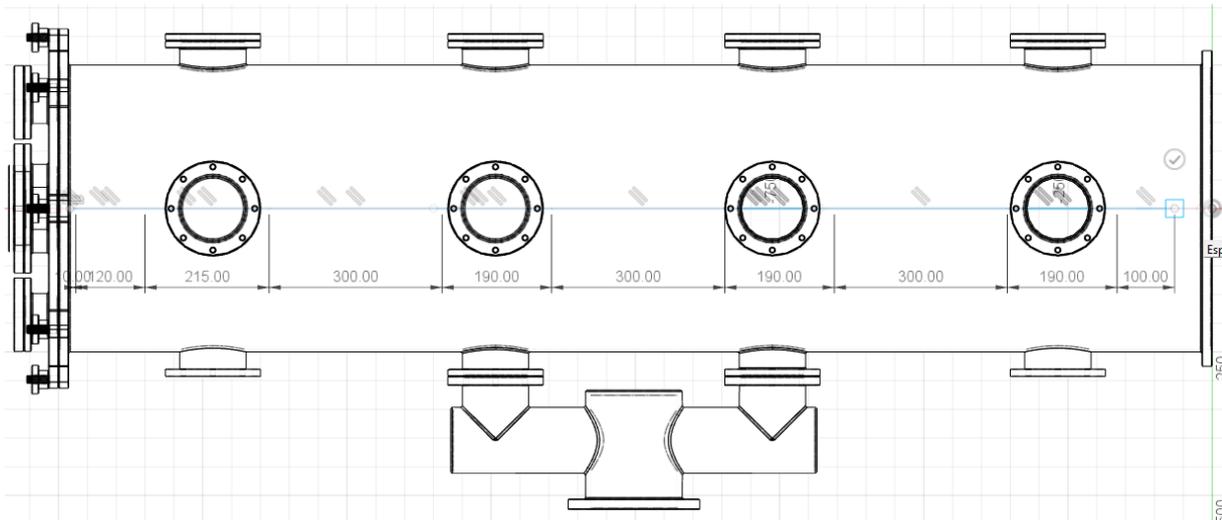


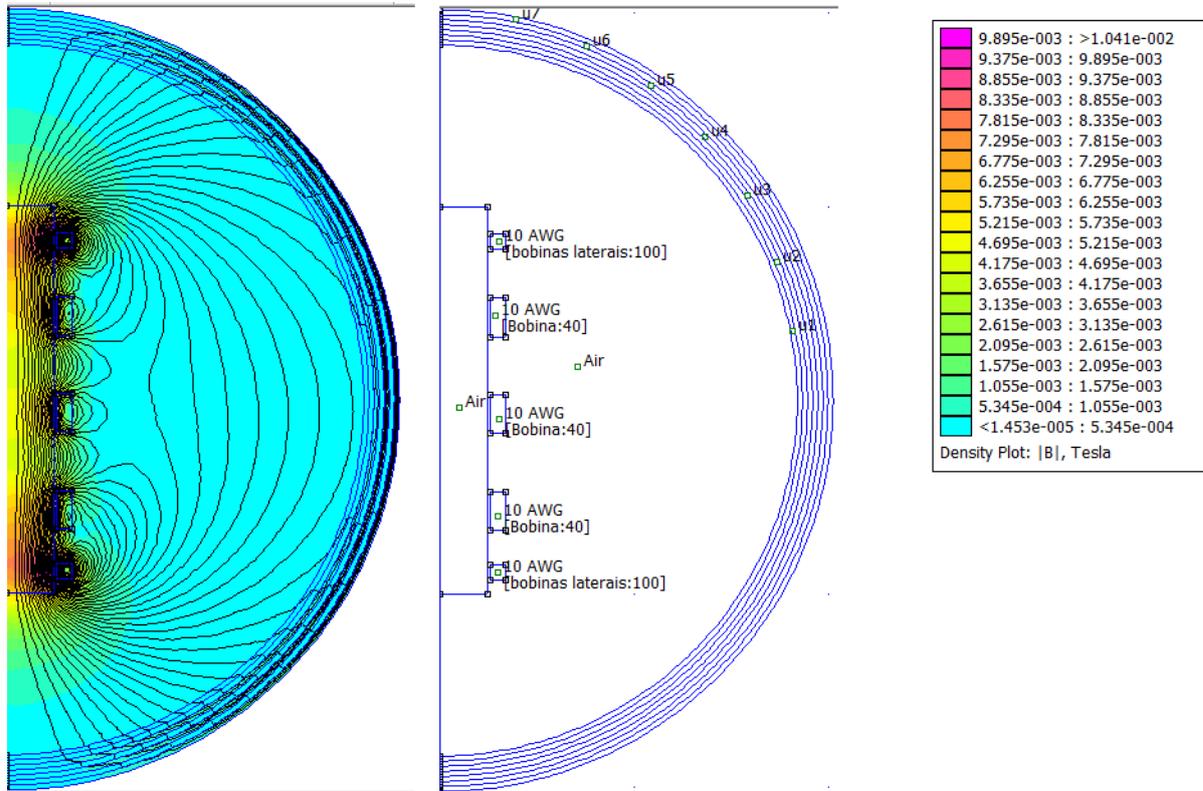
Figura 25 – Diagrama da câmara do LFP para posicionamento das bobinas.

interplanetário no projeto Clima Espacial. Três configurações serão apresentadas.

Para alcançar um campo magnético uniforme, o primeiro aspecto a considerar é a localização das bobinas e quais simetrias podem ser aproveitadas. A Figura [25] mostra um diagrama da câmara de vácuo, destacando a distinção entre as seções externas e as centrais.

A consequência dessa distinção foi a concepção do modelo (i) representado na Figura [26]. Na imagem, é possível visualizar um retângulo maior na vertical preenchido com "Air" e uma estrutura composta por três retângulos menores internos com 40 voltas e dois quadrados externos com 100 voltas, todos preenchidos com fio AWG 10. Embora na Figura [26] as linhas de campo pareçam seguir um padrão linear, o gráfico apresenta um resultado mais detalhado de uma linha que passaria pelo centro do cilindro. É importante mencionar que na Figura [26], só é possível visualizar metade do problema, já que o FEMM utiliza uma configuração chamada "axisymmetric" na qual a parte visível corresponde apenas a metade da seção transversal. Em outras palavras, a linha usada pelo FEMM para o gráfico do campo magnético resultante no centro da câmara na verdade se estende além do limite da Figura [26], à esquerda.

Figura 26 – Modelo (i) constituído de 3 bobinas centrais idênticas e 2 externas. A esquerda apresenta a intensidade de \mathbf{B} e a direita é tem-se as bobinas posicionadas na parte lateral do cilindro (câmara de vácuo).



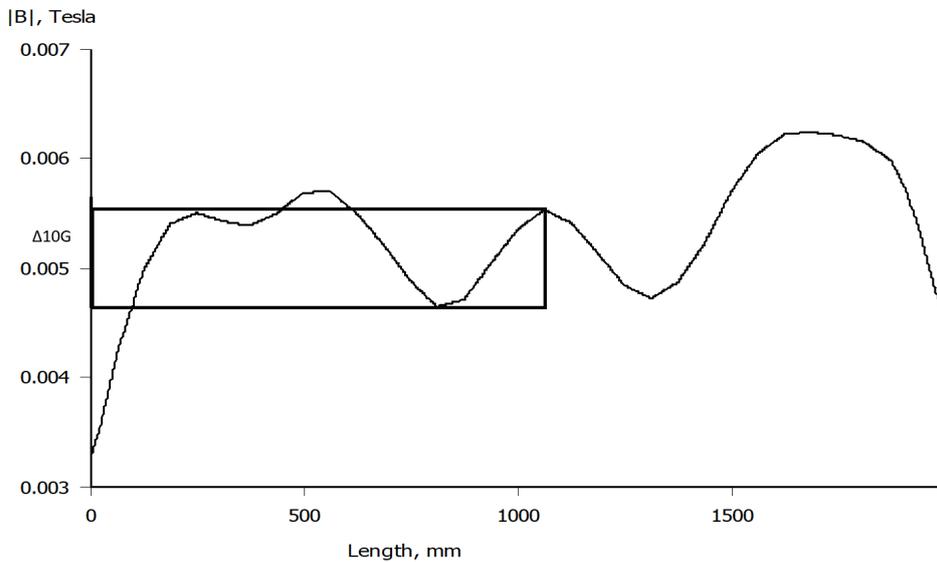
Fonte: O autor

O resultado gráfico do modelo (i) é mostrado na Figura [27]. A análise deste gráfico oferece várias clarificações: o pico central, correspondente ao campo magnético da bobina central, está distante demais, uma vez que é possível identificar dois vales entre a bobina central e as externas. Além disso, observa-se que as quatro bobinas externas formaram pares, onde as primeiras estão um pouco mais distantes do que o necessário, enquanto as últimas à direita estão mais próximas, sem apresentar nenhum vale e com um pico maior e mais proeminente.

Com base nessas informações e em outras considerações técnicas relacionadas à estrutura da câmara, o Modelo (ii) foi concebido e está apresentado na Figura [28]. As principais modificações neste protótipo incluíram a redução no número de bobinas para resolver a simetria central em três partes idênticas. A decisão de resolver apenas a simetria central se deve ao fato de que a câmara de vácuo possui portas, uma delas é visível na Figura [25] e a outra na foto (Figura [20]). A segunda porta, impõe limitações ao tamanho das bobinas. A ideia era que as bobinas que permanecerão nas portas serão diferentes das demais para compensar a restrição na extremidade da câmara.

No Modelo (ii), houve também a inclusão das janelas presentes na estrutura, desen-

Figura 27 – Gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (i)



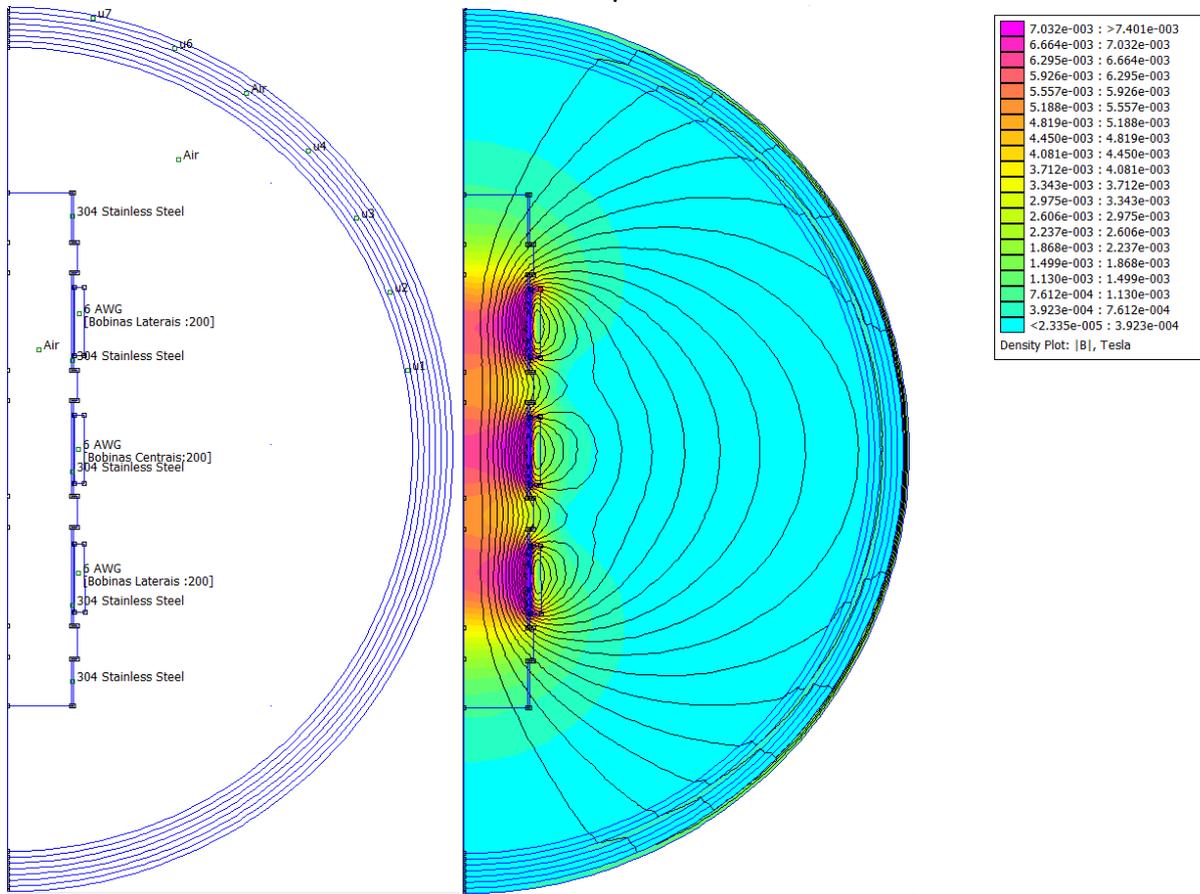
O autor

volvidas em CAD e transferidas diretamente para o FEMM, em vez de maneira indireta. Isso significa que a câmara agora corresponde fielmente às medidas reais para uma análise mais precisa da posição de cada bobina. O resultado gráfico do Modelo (ii) pode ser encontrado na Figura [29]. As bobinas concebidas neste protótipo possuem exatamente 255 mm de raio (r). Portanto, de acordo com a Equação (3) e o conhecimento prévio da configuração de Helmholtz, deduz-se que a distância entre os centros das bobinas deve ser r . No entanto, devido às janelas nesta configuração, a distância entre as bobinas é de aproximadamente $1,5 * r$.

Juntamente com todo esse histórico, foi concebido mais um modelo. Neste caso, o foco também foi direcionado apenas para a simetria central da câmara de vácuo. Houve uma mudança significativa no design das bobinas, pois o posicionamento no modelo (ii) indicou que a distância entre elas deveria ser segmentada. Em cada abertura central, com tamanho de 300 mm conforme mostrado na Figura [25], agora serão posicionadas duas bobinas, separadas ao máximo possível, aproximadamente a uma distância de ≈ 0.9 de raio. Essas bobinas possuem dimensões significativamente menores do que as anteriormente apresentadas na Figura [30].

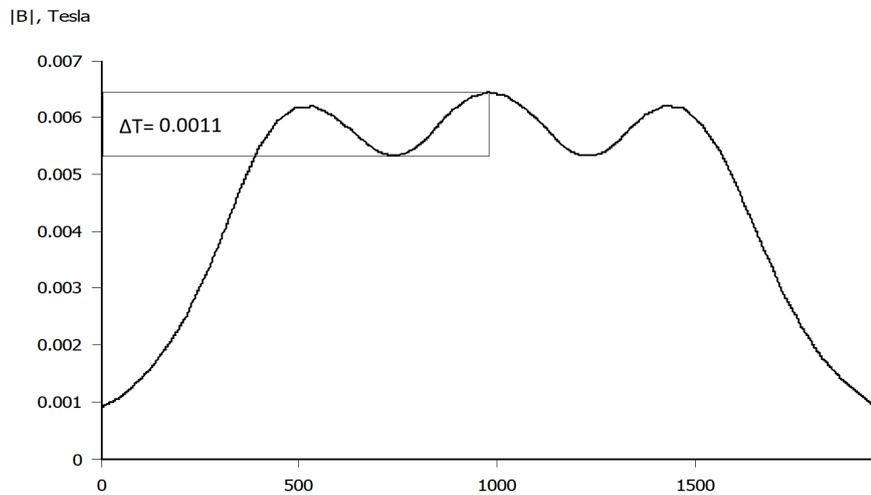
No entanto, a questão da simetria central torna-se problemática devido às janelas presentes na câmara de vácuo. A solução para essa limitação não será abordada aqui, mas sugere-se a utilização de barras condutoras conectando as bobinas. Essa gaiola formada pelas barras poderia ajustar o campo magnético, alinhando-o de forma a compensar a falta de distância entre as bobinas.

Figura 28 – Simulação no FEMM do Modelo (ii). O retângulo apresenta a variação máxima entre o topo e o mínimo do vale



Fonte: O autor

Figura 29 – Resultado gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (ii).



Fonte: O autor

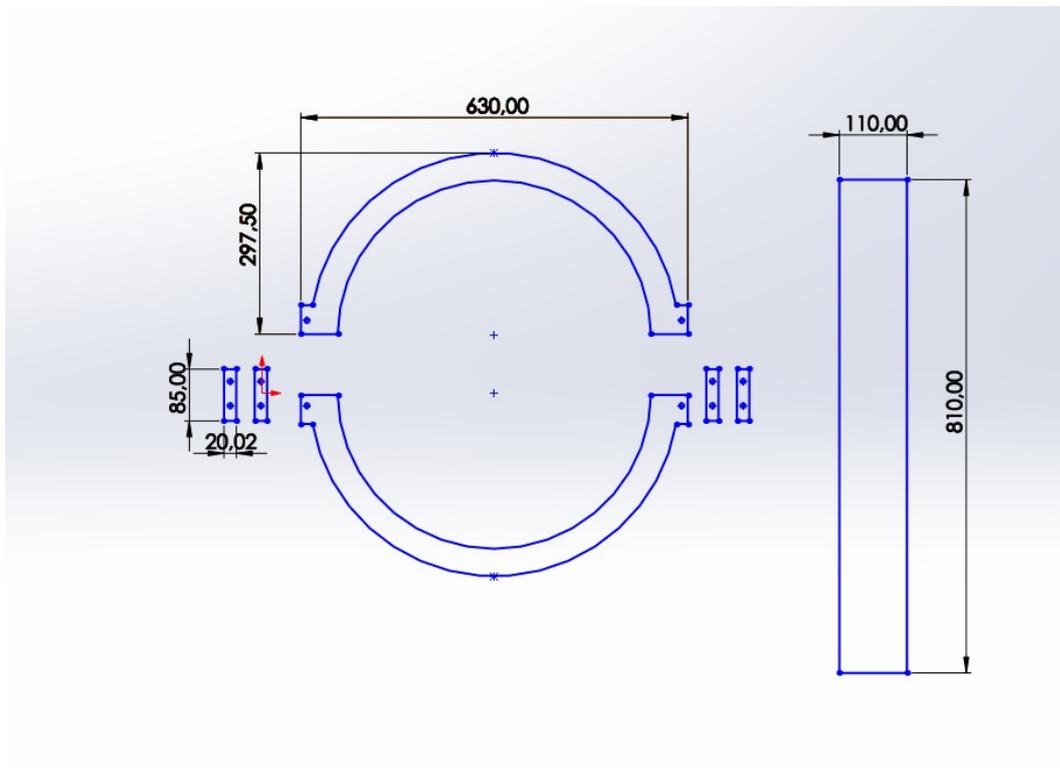
O modelo (iii) mencionado anteriormente foi produzido e desenvolvido no LFP. Agora, vamos discutir suas características em detalhes.

4.3.1 Modelo (iii)

O modelo (iii) foi produzido inicialmente para lidar com as dificuldades estruturais encontradas na câmara devido às janelas. A instalação do protótipo foi realizada separadamente, conectando cada meio arco visível na figura [31b].

O processo de construção foi conduzido da seguinte maneira: inicialmente, procedeu-se ao corte das chapas conforme mostrado na figura [30], que apresenta as dimensões do carretel. Os meio arcos correspondem às paredes laterais de cada bobina, enquanto o retângulo maior representa a base. A base foi calandrada e soldada junto com as paredes laterais, com o objetivo de formar uma única peça, conforme ilustrado na figura [31b]. Cada conjunto de duas peças da figura [31b] compõe um carretel, e após a inserção na câmara de vácuo, o conjunto de carreteis está concluído.

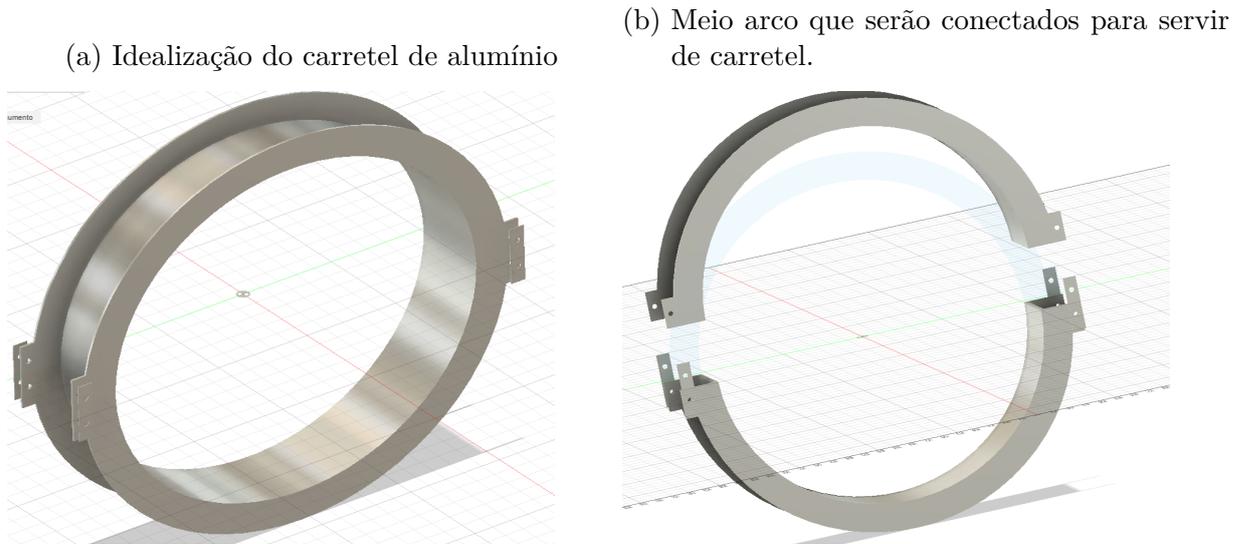
Figura 30 – Dimensões para o corte da chapa e visualização do carretel utilizado no modelo (iii).



O autor

A seleção do tipo de fio para formar as bobinas é crucial, especialmente considerando a necessidade de resistir às altas correntes ($\approx 25 A$) planejadas para uso no laboratório. O fio de cobre AWG 7 (diâmetro = 3.665 mm) foi escolhido por suas exce-

Figura 31 – Estrutura para Bobina



Fonte: O autor

lentes características nesse contexto. Além de suportar altas correntes visto na Tabela [1], o teste prático (Tubo de Crookes) mostrou que o uso de fios muito grossos e rígidos de cobre pode dificultar significativamente a fabricação das voltas das bobinas. Portanto, a preferência recai sobre fios mais finos, desde que apresentem uma resistência à corrente adequada.

Tabela 1 – Tabela de fios AWG conversão para medidas métricas.

Numero (AWG)	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Kg/km	ohms/km	Capacidade (A)
1	7,348	42,41	375	1,40	120
2	6,544	33,63	295	1,50	96
3	5,827	26,67	237	1,63	78
4	5,189	21,15	188	0,8	60
5	4,621	16,77	149	1,01	48
6	4,115	13,3	118	1,27	38
7	3,665	10,55	94	1,70	30
8	3,264	8,36	74	2,03	24
9	2,906	6,63	58,9	2,56	19

Fonte: IF UFRGS

Se considerar o espaço disponível para os fios no carretel, conforme ilustrado na Figura [30], temos uma largura de 110 mm, sendo que apenas 100 mm ficam expostos, pois as paredes das bobinas serão soldadas nas bordas, ocupando 5mm de cada lado.

Utilizando o fio de 3.665 mm temos:

$$\frac{100}{3.665} \approx 27,28 \quad (4.1)$$

A razão acima apresenta o espaço disponível horizontalmente pelo diâmetro do fio. Portanto o resultado representa a quantidade de voltas possíveis horizontalmente de serem enroladas em cada camada utilizando o fio AWG 7. A parte não inteira do resultado corresponde a aproximadamente 0,28 de uma volta, o que para o fio utilizado equivale a cerca de 1,02 *mm*. Portanto, se fossem enroladas 27 voltas completas, restaria apenas aproximadamente 1 *mm* como espaço de erro. Optou-se por utilizar 26 voltas completas para garantir o espaço suficiente.

Ao considerar a quantidade de voltas para cada camada, agora será estimado o número possível de camadas a serem realizadas. Na figura [25], é possível observar um conector em formato de 'T' na parte externa inferior da câmara de vácuo. Este conector é responsável por fixar uma das bombas difusoras e também limita a altura das paredes laterais das bobinas.

Com base nessas informações, a altura lateral do arco foi obtida por meio de medições diretas e indiretas (usando o software Fusion em CAD), sendo o valor considerado mais adequado de 40 *mm*.

Prontamente com a altura e o diâmetro do fio, é possível acomodar aproximadamente $40/3.665 = 10.91$ *mm* voltas em cada camada. Isso implica que seriam viáveis um total de 10 camadas com 26 voltas cada, deixando um espaço de 3.335 *mm*, o que é mais aceitável para possíveis erros durante a fabricação.

Todas as bobinas do projeto foram concebidas para serem idênticas, com um raio de 255 *mm* e comprimento lateral de 110 *mm*, conforme demonstrado nos carretéis das Figuras [30] e [31a]. A área de seção dos fios, inicialmente, possui um raio de 260 *mm* e um comprimento de 100 *mm*, podendo essas dimensões serem ajustadas conforme necessário.

Com essas medidas e o uso do fio de cobre AWG 7, é possível calcular a quantidade de fio utilizada. A tabela [2] abaixo apresenta os valores do raio interno (r_i) e o comprimento de fio para cada camada da bobina:

Camada	$r_0 + r_{fio}$ (<i>mm</i>)	Comprimento de fio 1ª volta (<i>m</i>)	Comprimento de fio 26 voltas (<i>m</i>)
1ª	261,8	1,64	42,76
2ª	265,46	1,66	43,36
3ª	269,12	1,69	43,96
4ª	272,78	1,71	44,56
5ª	276,44	1,74	45,16
6ª	280,1	1,76	45,76
7ª	283,76	1,78	46,36
8ª	287,42	1,80	46,95
9ª	291,08	1,83	47,55
10ª	294,75	1,85	48,15
Total	—	—	454,56m

Tabela 2 – Comprimento total do fio para realização da bobina central.

Os carretéis de fio adquiridos, com capacidade máxima de até 45kg, proporcionam uma extensão total de $10.71 \frac{m}{kg} \times 45 kg = 481,95 m$ para o fio AWG 7. Essa quantidade é considerada mais do que suficiente para a construção de cada uma das seis bobinas projetadas.

O posicionamento preciso das bobinas foi realizado com o auxílio do software Autodesk Fusion 360, utilizando informações detalhadas dos carretéis. Essas informações foram incorporadas na simulação do FEMM, que, por sua vez, proporcionou os resultados visualizados na Figura [32] e no gráfico da Figura [33].

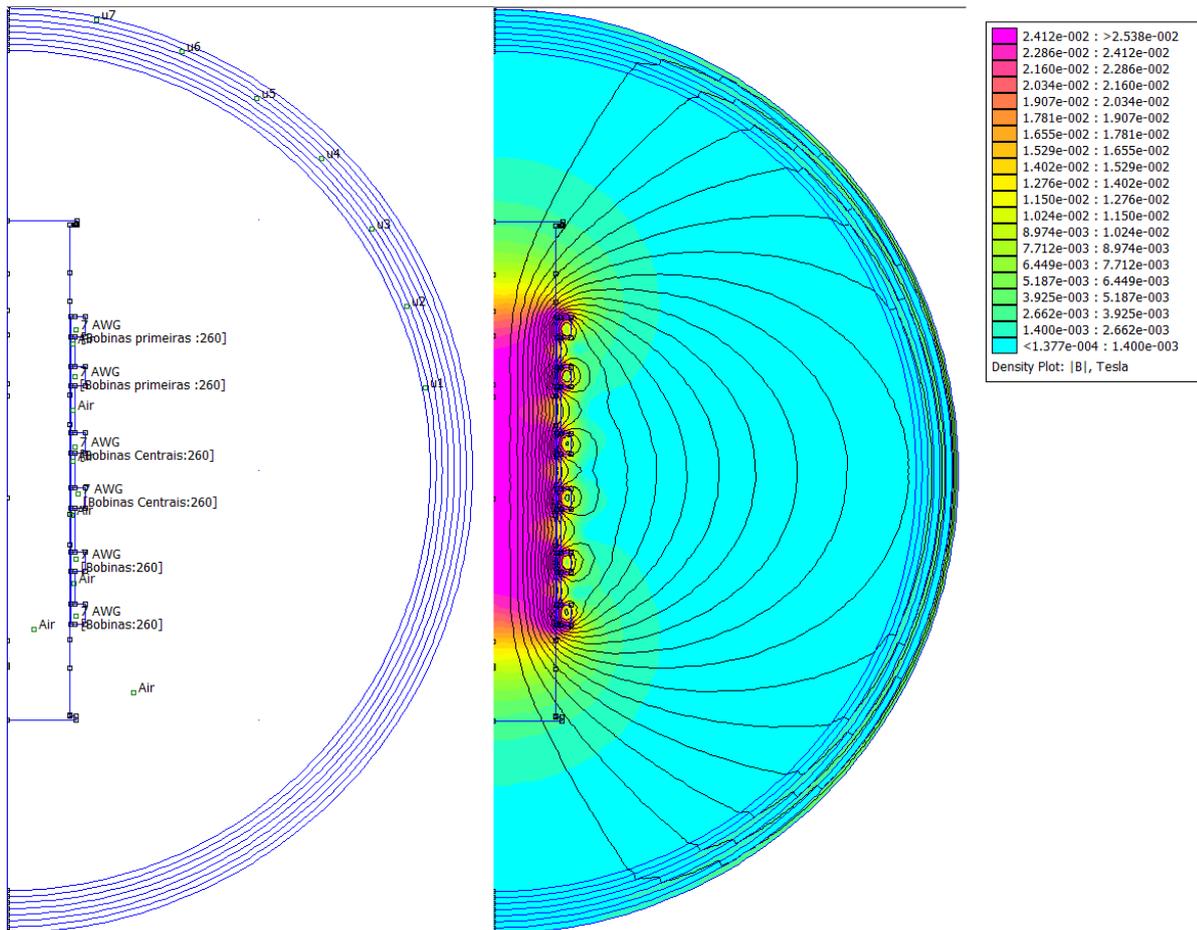
É crucial observar que o gráfico apresenta um pequeno vale após o primeiro e segundo par de bobinas, devido ao desafio mencionado anteriormente relacionado à distância entre as janelas e o cano inferior em formato de "T". A escolha de manter o protótipo alinhado à câmara, sem modificar a estrutura das bombas de vácuo, limitou a possibilidade de ajustar o raio das bobinas para otimizar essa distância. Mesmo diante desse desafio, o resultado gráfico reflete a melhor configuração de posição, número de voltas, comprimento e corrente para cada par de bobinas: o primeiro par com aproximadamente 21.8 A, o segundo par com cerca de 20 A e o último par com aproximadamente 22.4 A. Esses valores foram determinados considerando a complexidade da geometria da câmara e os requisitos específicos do projeto.

O desenvolvimento do Modelo (iii) representa um avanço significativo no projeto Clima Espacial, visando simular o ambiente espacial próximo à Terra. Este modelo, concebido para superar desafios estruturais na câmara de vácuo, destaca-se pela adaptabilidade às condições específicas do ambiente experimental. O cuidadoso processo de construção, a escolha apropriada do fio de cobre AWG 7 e a análise detalhada das limitações físicas da câmara resultaram em bobinas idênticas, cada uma com 26 voltas distribuídas em 10 camadas.

A eficiente utilização dos carretéis de fio, com uma extensão total de 481,95 m, assegurou recursos mais do que suficientes para a construção das seis bobinas planejadas. A validação do modelo (iii) por meio de simulações no FEMM demonstrou um campo magnético otimizado, apesar de pequenas variações devido às restrições geométricas.

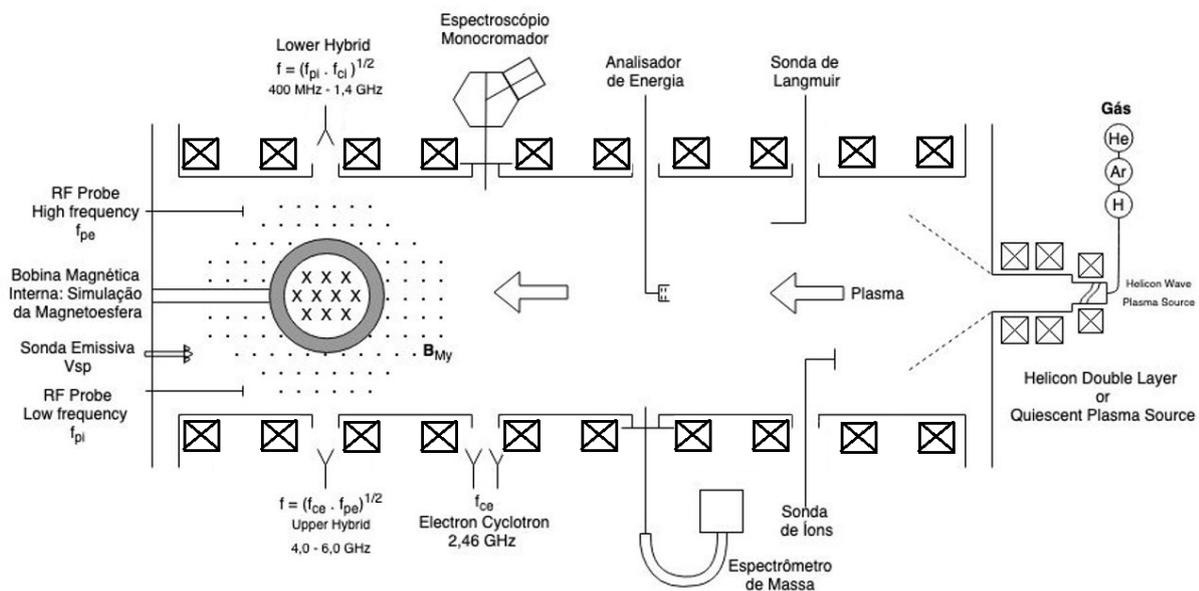
A representação visual do resultado final, incorporando sete carretéis na câmara de vácuo, esboça uma integração harmoniosa do modelo (iii) no contexto do projeto Clima Espacial na Figura [35]. Esta implementação prepara o terreno para pesquisas mais realistas sobre ondas, turbulências e fenômenos do plasma na magnetosfera terrestre. O projeto, agora equipado com o Modelo (iii), está bem posicionado para desempenhar um papel crucial no avanço do entendimento dos complexos fenômenos espaciais visualizado nas Figuras [34] e [35].

Figura 32 – Simulação no FEMM do Modelo (iii).



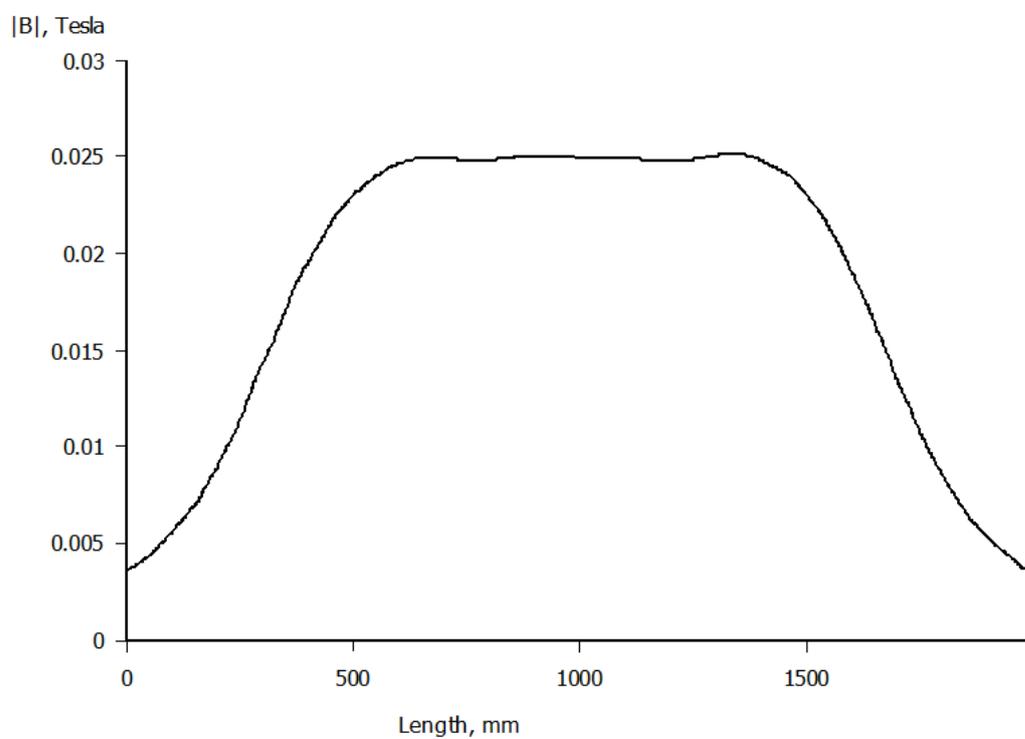
Fonte: O autor

Figura 34 – Esboço projeto Clima Espacial após inserção do modelo (iii). Com 2 pares de bobina externas extras.



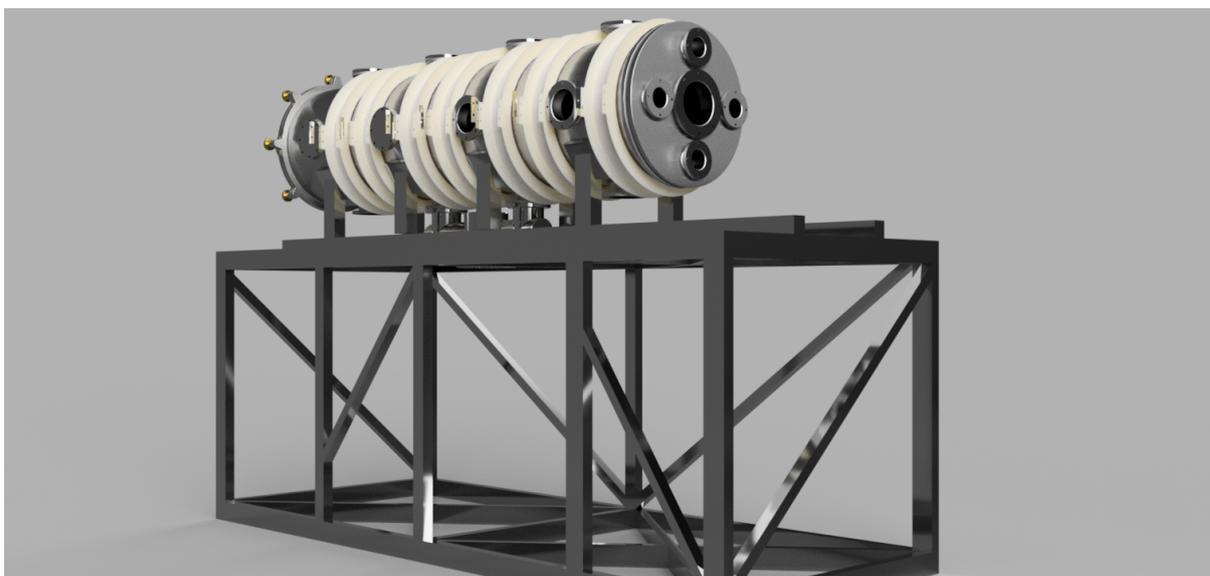
Fonte: O autor

Figura 33 – Resultado gráfico do campo magnético de um eixo que passa ao centro de todo o comprimento da câmara. Modelo (iii)



Fonte: O autor

Figura 35 – Projeção para 7 carretéis na câmara Hall realizado no Fusion 360.



Fonte: O autor

5 Comentários finais e Projeções futuras

Em conclusão, o trabalho realizado concentrou-se principalmente no planejamento e desenvolvimento de um sistema de bobinas para gerar um campo magnético para o principal aparato do projeto Clima Espacial. O objetivo foi o de estudar os plasmas presentes na atmosfera, especialmente o plasma gerado pelo campo magnético da Terra e os fenômenos interplanetários que o afetam. A realização do teste prático, que consistiu na simulação e construção de um aparato de confinamento magnético em menor escala no tubo de Crookes, proporcionou uma preparação prévia para o desenvolvimento do mecanismo na câmara de vácuo.

Olhando para o futuro, a perspectiva de criar um mecanismo de confinamento magnético com não apenas 6, mas 8 bobinas e um campo uniforme ao longo de todo o comprimento da câmara é promissora. No entanto, é importante destacar que o desenvolvimento desse aparato é um desafio complexo que requer mais pesquisa e desenvolvimento.

Recomenda-se continuar com estudos aprofundados e realizar experimentos adicionais para aprimorar o projeto do aparato. A exploração de diferentes configurações de bobinas e a adoção de técnicas avançadas de controle e simulação podem contribuir para alcançar um campo magnético mais uniforme e estável.

As projeções futuras também podem incluir a análise de outras fontes de plasma, como o plasma gerado por descargas elétricas ou plasma ionizado em diferentes condições de pressão e temperatura. Isso ampliaria a compreensão dos efeitos do campo magnético em diferentes contextos e abriria novas oportunidades para aplicações tecnológicas.

Em resumo, o trabalho realizado até agora representa um passo significativo em direção à criação de um aparato com um campo magnético axial uniforme ao longo de toda a câmara. Com a continuação de pesquisas adicionais, torna-se possível realizar essas projeções futuras, contribuindo para avanços no laboratório de física de plasmas da UNB.

Referências

- ABBO, L.; OFMAN, L. Slow solar wind : Observations and modeling. *Space Science Reviews*, v. 201, n. 55, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0264-1>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- BALTZIS, K. The finite element method magnetics (femm) freeware package: May it serve as an educational tool in teaching electromagnetics? *Education and Information Technologies*, v. 15, p. 19–36, 03 2010. Citado na página 32.
- BAUM, P. J.; BRATENAHN, A. The laboratory magnetosphere. *Geophysical Research Letters*, v. 9, n. 4, p. 435–438, 1982. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GL009i004p00435>>. Citado na página 42.
- BEHLING, R. X-ray tubes development. *Medical Physics International - Special issue - History of Medical Physics*, p. 8–25, 05 2018. Citado na página 33.
- CHEN, F. F. Single-particle motions. In: _____. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 19–49. ISBN 978-3-319-22309-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22309-4_2>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 28.
- ELFIMOV, A. G. et al. Modification of alfvén wave dispersion and alfvén wave heating in multiple ion species tokamak plasmas. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, v. 39, n. 10, p. 1551, oct 1997. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/39/10/005>>. Citado na página 20.
- FU, W. et al. Interplanetary magnetic field (imf) control over the global structures of laboratory magnetosphere. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 31, n. 1, p. 49–60, 2020. ISSN 1017-0839. Publisher Copyright: © 2020 Chinese Geoscience Union. All rights reserved. Citado na página 43.
- JORGENSEN, A.; PATAMIA, S.; GASSEND, B. Passive radiation shielding considerations for the proposed space elevator. *Acta Astronautica*, v. 60, n. 3, p. 198–209, 2007. ISSN 0094-5765. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576506002840>>. Citado na página 18.
- JR, E. et al. Solar wind and geomagnetic activity. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 4301–4301, 12 2011. Citado na página 17.
- KONAN, O.; MISHRA, A.; LOTZ, S. Machine learning techniques to detect and characterise whistler radio waves. p. 2, 02 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.01244>>. Citado na página 21.
- MEYERS, R. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Academic Press, 2002. (Encyclopedia of Physical Science and Technology, v. 12). ISBN 9780122274220. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4x-jtAEACAAJ>>. Citado na página 33.

- MINAMI, S.; TAKEYA, Y. Flow of artificial plasma in a simulated magnetosphere: Evidence of direct interplanetary magnetic field control of the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 90, n. A10, p. 9503–9518, 1985. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA090iA10p09503>>. Citado na página 42.
- MOZER, F. S.; PRITCHETT, P. L. Magnetic field reconnection: A first-principles perspective. *Physics Today*, v. 63, n. 6, p. 34–39, 06 2010. ISSN 0031-9228. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.3455250>>. Citado na página 20.
- NEUGEBAUER, M.; SNYDER, C. W. Solar plasma experiment. *Science*, v. 138, n. 3545, p. 1095–1097, 1962. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.138.3545.1095.b>>. Citado na página 17.
- PODGORNY, I. M.; DUBININ, E. M.; POTANIN, Y. N. The magnetic field on the magnetospheric boundary from laboratory simulation data. *Geophysical Research Letters*, v. 5, n. 3, p. 207–210, 1978. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GL005i003p00207>>. Citado na página 42.
- RAOUAFI, N. et al. Solar physics and solar wind (geophysical monograph series). *New York: Wiley) Roberts M*, 2021. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/787/2/118>>. Citado na página 17.
- REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R. *Fundamentos da teoria eletromagnética*. Campus, 1982. ISBN 9788570011039. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=f3NcAAAACAAJ>>. Citado na página 27.
- REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R. Fundamentos da teoria eletromagnética. 3ª edição. *Editora Campus Ltda*, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- SHAIKHISLAMOV, I. F. et al. Laboratory model of magnetosphere created by strong plasma perturbation with frozen-in magnetic field. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, IOP Publishing, v. 56, n. 12, p. 125007, oct 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/56/12/125007>>. Citado na página 42.
- SHEIKHOLESAMI, M.; GANJI, D. D. Chapter 1 - magnetohydrodynamic and ferrohydrodynamic. In: SHEIKHOLESAMI, M.; GANJI, D. D. (Ed.). *External Magnetic Field Effects on Hydrothermal Treatment of Nanofluid*. William Andrew Publishing, 2016. p. 1–47. ISBN 978-0-323-43138-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032343138500001X>>. Citado na página 27.
- WIKIPÉDIA. *Kristian Birkeland* — *Wikipédia, a enciclopédia livre*. 2021. [Online; accessed 11-agosto-2021]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Kristian_Birkeland&oldid=61817786>. Citado na página 42.
- WONG, A.; CALIFORNIA, L. A. D. o. P. University of. *Introduction to Experimental Plasma Physics: Physics 180E, Plasma Physics Laboratory*. Physics Department, University of California at Los Angeles, 1977. (Introduction to Experimental Plasma Physics: Physics 180E, Plasma Physics Laboratory). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ERblGwAACAAJ>>. Citado na página 40.

YUR, G. et al. Magnetotail structures in a laboratory magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 104, p. 14517–14528, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

Yur, G. et al. Laboratory facility for magnetospheric simulation. , v. 100, n. A12, p. 23727–23736, dez. 1995. Citado na página 41.

ZONG, Q. Magnetospheric response to solar wind forcing: ultra-low-frequency wave–particle interaction perspective. *Annales Geophysicae*, v. 40, n. 1, p. 121–150, 2022. Disponível em: <<https://angeo.copernicus.org/articles/40/121/2022/>>. Citado na página 18.