

Universidade de Brasília (UnB)
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE)
Engenharia Aeroespacial

**Desenvolvimento Tecnológico do Cátodo de
Radiofrequência em Propulsores Elétricos Hall
como uma Fonte de Elétrons: Uma Análise
Prática para a Propulsão Espacial**

Autor: Jhonatha Willian dos Santos de Paula

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda

Coorientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Brasília - DF

2025



Jhonatha Willian dos Santos de Paula

Desenvolvimento Tecnológico do Cátodo de Radiofrequência em Propulsores Elétricos Hall como uma Fonte de Elétrons: Uma Análise Prática para a Propulsão Espacial

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

Universidade de Brasília (UnB)

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE)

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda

Coorientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Brasília - DF

2025

Jhonatha Willian dos Santos de Paula

Desenvolvimento Tecnológico do Cátodo de Radiofrequência em Propulsores Elétricos Hall como uma Fonte de Elétrons: Uma Análise Prática para a Propulsão Espacial/ Jhonatha Willian dos Santos de Paula. – Brasília - DF, 2025-
142 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda

Coorientador: Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília (UnB)
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) , 2025.

1. Cátodo de Radiofrequência. 2. Propulsor Hall. I. Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento Tecnológico do Cátodo de Radiofrequência em Propulsores Elétricos Hall como uma Fonte de Elétrons: Uma Análise Prática para a Propulsão Espacial

CDU 02:141:005.6

Jhonatha Willian dos Santos de Paula

Desenvolvimento Tecnológico do Cátodo de Radiofrequência em Propulsores Elétricos Hall como uma Fonte de Elétrons: Uma Análise Prática para a Propulsão Espacial

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

Trabalho aprovado. Brasília - DF, 19 de fevereiro de 2025 – Data da aprovação do trabalho:

**Prof. Dr. Rodrigo Andrés Miranda
Cerdeira**

Orientador: FCTE - UnB

Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

Coorientador: IF - UnB

Prof. Dr. Paolo Gessini

Convidado I: FCTE - UnB

Prof. Dr. Marcus Vinicius Batistuta

Convidado II: FCTE - UnB

Brasília - DF

2025

“Devoto esta obra aos meus pais, professores, e todas as pessoas que acreditaram em mim. Em especial, à minha mãe, pelo apoio incondicional durante toda minha trajetória de estudos. Espero fortemente que este trabalho retribua e honre todo o suporte que recebi.”

Agradecimentos

Este trabalho de conclusão de curso é o resultado de uma jornada de aprendizado, crescimento pessoal e acadêmico, durante a qual muitas pessoas e instituições contribuíram significativamente para sua realização.

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Rodrigo Andrés Miranda Cerda e ao meu Coorientador, Professor Dr. José Leonardo Ferreira, pela orientação incansável, pela paciência e pela sabedoria compartilhada ao longo deste processo; muito obrigado por ter aberto as portas de seu laboratório para um humilde graduando da Engenharia Aeroespacial. Vossa dedicação e apoio foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios encontrados e para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à todos os professores, cujas aulas e conselhos foram essenciais para minha formação acadêmica e para a elaboração deste TCC. Sua paixão pelo ensino e seu compromisso com a educação inspiraram-me a buscar a excelência.

À minha família, meu eterno agradecimento pelo amor, compreensão e apoio incondicional. Em especial, à Valderes Santos Silva (mãe), José Ednaldo Felix dos Santos (Pai) e Jennifer Lorrany Felix dos Santos (Irmã), por acreditar em mim e por me incentivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sua presença e encorajamento foram cruciais para a conclusão desta etapa da minha vida.

Minha gratidão estende-se também aos colegas de laboratório que contribuíram com este projeto, mesmo que indiretamente. Em especial, Dr. Alexandre Tiago Baptista de Alves Martins e mestre Helbert de Oliveira Coelho Júnior. Agradeço também ao mestrando Hudson Marques Costa por ter contribuído com as simulações térmicas e o CAD do dispositivo desenvolvido nesta obra.

Aos meus amigos e colegas de curso, minha sincera gratidão pela amizade, pela colaboração e pelos momentos de descontração que tornaram esta jornada mais leve e prazerosa. Em especial, agradeço a Lucas de Moraes Vilhena e a Silas Machado Viana Almeida dos Santos pelo suporte constante e pelas trocas de ideias que enriqueceram meu trabalho.

Reconheço e agradeço à Universidade de Brasília (UnB) por ter me aceitado como aluno do curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, pela infraestrutura, pelo acesso às bibliotecas e laboratórios, e pelo ambiente acadêmico estimulante. Aos funcionários administrativos e ao pessoal de apoio, agradeço pela disponibilidade e prontidão em auxiliar sempre que necessário.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro através da bolsa de Iniciação Tecnológica e Industrial (ITI-A) e pelas oportunidades de desenvolvimento que foram essenciais para a realização deste trabalho. Sua contribuição foi vital para a condução das minhas pesquisas. Reconheço também o apoio da Agência Espacial Brasileira (AEB) ao apoiar o projeto PHall como um todo ao longo dos anos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC, deixo aqui meu mais sincero agradecimento. Este trabalho é, de certa forma, um reflexo do apoio e do incentivo que recebi ao longo desta jornada acadêmica.

*“If I have seen further than others,
it is by standing on the shoulders of giants.”*

(Isaac Newton, 1675)

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento tecnológico do cátodo de radiofrequência (RF) em propulsores elétricos Hall para sondas, satélites e *CubeSats* como uma fonte de elétrons, sendo o primeiro do tipo desenvolvido e testado na América Central, Latina e do Sul, incluindo o Brasil. O objetivo foi criar uma tecnologia alternativa de menor custo em comparação aos cátodos ocos convencionais, sem comprometer a eficiência na extração de corrente. Foram abordados aspectos fundamentais da física de plasmas, técnicas construtivas e métodos experimentais, resultando na validação funcional do dispositivo. O custo estimado de produção foi de aproximadamente R\$ 2.000,00 em 2024, valor significativamente inferior ao dos cátodos ocos tradicionais, cuja vida útil geralmente não ultrapassa 1.000 horas para aplicações laboratoriais. Testes experimentais indicaram que a antena de RF operou com máxima eficiência a 60 W e 13,56 MHz, permitindo a extração de corrente em diferentes fluxos mássicos, atingindo um valor máximo de 0,091 mA para 4 sccm e uma pressão ideal de operação da ordem de 10^{-5} Torr. Simulações computacionais revelaram que o material cerâmico Shapal proporcionou melhor distribuição térmica que o Macor, reduzindo a temperatura máxima do dispositivo. Além disso, análises do plasma demonstraram a influência do tipo de acoplamento na eficiência da ionização, com diferenças significativas entre os regimes indutivo (ICP) e capacitivo (CCP). Os resultados indicam que o cátodo de RF é uma alternativa viável para experimentação em propulsores Hall e que aprimoramentos futuros, como um sistema de acoplamento ICP e uma fonte de tensão superior a 32 V, podem melhorar ainda mais sua eficiência.

Palavras-chave: Antena de RF; Cátodo Oco; Cátodo de Plasma; Cátodo de Radiofrequência; Corrente Extraída do Cátodo; *CubeSats*; Materiais; Pressão; Propulsor Hall; RF; Satélites; Sondas; Temperatura do Cátodo.

Abstract

This work presents the technological development of the radiofrequency (RF) cathode for Hall electric thrusters used in probes, satellites, and *CubeSats* as an electron source, being the first of its kind developed and tested in Central, Latin, and South America, including Brazil. The objective was to create a cost-effective alternative to conventional hollow cathodes without compromising current extraction efficiency. Fundamental aspects of plasma physics, construction techniques, and experimental methods were addressed, resulting in the functional validation of the device. The estimated production cost was approximately \$2,000.00 in 2024, significantly lower than traditional hollow cathodes, which typically have a lifespan of no more than 1,000 hours for laboratory applications. Experimental tests indicated that the RF antenna operated with maximum efficiency at 60 W and 13.56 MHz, enabling current extraction at different mass flow rates, reaching a maximum value of 0.091 mA at 4 sccm and an optimal operating pressure on the order of 10^{-5} Torr. Computational simulations revealed that Shapal ceramic provided better thermal distribution than Macor, reducing the device's maximum temperature. Additionally, plasma analyses demonstrated the influence of coupling type on ionization efficiency, with significant differences between inductive (ICP) and capacitive (CCP) regimes. The results indicate that the RF cathode is a viable alternative for experimentation in Hall thrusters and that future improvements, such as an ICP coupling system and a voltage source higher than 32 V, may further enhance its efficiency.

Key-words: Cathode current extraction; CubeSats; Hollow cathode; Materials; Plasma cathode; Pressure; Propulsion Hall thruster; RF; RF antenna; Satellites; Temperature cathode.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Vista Isométrica do Cátodo em CAD	47
Figura 2 – Vista Superior do Cátodo Experimental	48
Figura 3 – Corte Longitudinal do Cátodo em CAD	49
Figura 4 – Vista Isométrica do Cátodo Experimental	55
Figura 5 – Vista Isométrica Diagonal do Cátodo Experimental	55
Figura 6 – Vista Frontal do Cátodo Experimental	56
Figura 7 – Sistema de Vácuo do Cátodo (Campânula)	59
Figura 8 – Sistema de Vácuo do Cátodo (Charuto)	60
Figura 9 – Gerador de Radiofrequência da RFPP	62
Figura 10 – Gerador de Radiofrequência da Plasource	63
Figura 11 – Esquemático do Sistema de Conexões	67
Figura 12 – Esquemático do Cátodo de RF em 2D	68
Figura 13 – Sistema Operacional de Conexões do Cátodo de RF	69
Figura 14 – Esquemático do Cátodo de RF como Ilustração	70
Figura 15 – Circuito da Sonda de Langmuir do Cátodo de RF	71
Figura 16 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 30 Watts (Macor)	77
Figura 17 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 60 Watts (Macor)	78
Figura 18 – Gráfico ($T \times t$) do Perfil Temperatura ao longo do Tempo	79
Figura 19 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 30 Watts (Shapal)	79
Figura 20 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 60 Watts (Shapal)	80
Figura 21 – Densidade de Elétrons do Cátodo de RF	85
Figura 22 – Potencial Elétrico do Cátodo de RF	86
Figura 23 – Fluxo Magnético do Cátodo de RF	86
Figura 24 – Antena Física de Radiofrequência	91
Figura 25 – Antena de RF do Cátodo em Vácuo (Campânula)	92
Figura 26 – Antena de RF em Vácuo de 10 Watts (<i>CubeSats</i>)	93
Figura 27 – Antena de RF em Vácuo de 30 Watts	93
Figura 28 – Antena de RF em Vácuo de 60 Watts	94
Figura 29 – Antena Física de Radiofrequência Adaptada	94
Figura 30 – Antena de RF Adaptada em Testes	95
Figura 31 – Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (A)	96
Figura 32 – Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (B)	96
Figura 33 – Cátodo Experimental em Sistema de Teste Aberto	97
Figura 34 – Cátodo Experimental em Sistema de Testes Fechado	97
Figura 35 – Cátodo Experimental em Testes	98
Figura 36 – Formação de Plasma em Torno da Câmara e no Interior	99

Figura 37 – Primeiro Teste do Cátodo de RF em Vácuo	100
Figura 38 – Cátodo de RF em Pleno Funcionamento	100
Figura 39 – Cátodo em Testes com Variações na Luminosidade do Ambiente	101
Figura 40 – Brilho Emitido pelo Fluxo de Elétrons em 1, 2 e 3 sccm	102
Figura 41 – Brilho Emitido pelo Fluxo de Elétrons em 4, 5 e 6 sccm	102
Figura 42 – Sonda de Langmuir para o Cátodo de RF	105
Figura 43 – Localização Axial da Sonda de Langmuir no Cátodo de RF	106
Figura 44 – Gráfico da Curva Característica para CCP ($V \times I$) - Contínuo	107
Figura 45 – Gráfico da Curva Característica para CCP ($V \times I$) - Discreto	107
Figura 46 – Cátodo de RF em Operação com a Sonda de Langmuir	108
Figura 47 – Gráfico ($I \times \dot{m}$) para Seis Taxas de \dot{m}	111
Figura 48 – Gráfico ($C \times U$) para Seis Taxas de \dot{m}	112
Figura 49 – Câmara de Plasma [mm]	125
Figura 50 – Base da Câmara de Plasma [mm]	126
Figura 51 – Anel Frontal [mm]	126
Figura 52 – Flange Inferior [mm]	127
Figura 53 – Cátodo de RF com PHall II-C na Câmara de Vácuo	130
Figura 54 – Propriedades Térmicas do Macor	139
Figura 55 – Propriedades Mecânicas do Macor	139
Figura 56 – Propriedades Elétricas do Macor	140
Figura 57 – Propriedades Químicas do Macor	140
Figura 58 – Tabela de Dimensões da União Bulkhead [in] & [mm]	141
Figura 59 – Tabela de Dimensões dos Ferrules (Anéis de Vedação) [in] & [mm]	142

Lista de tabelas

Tabela 1 – Detalhes Técnicos da Antena de Radiofrequência	48
Tabela 2 – Detalhes Técnicos do Passador de Fluido (União)	52
Tabela 3 – Detalhes Técnicos do Conector de Radiofrequência	52
Tabela 4 – Detalhes Técnicos dos Anéis de Vedação (Ferrules)	52
Tabela 5 – Detalhes Técnicos dos O-rings	53
Tabela 6 – Configurações do Gerador de RF da RFPP	62
Tabela 7 – Configurações do Gerador de RF da Plasource	63
Tabela 8 – Componentes do Esquemático do Sistema de Conexões	68
Tabela 9 – Propriedade dos Materiais Utilizados nas Simulações	76
Tabela 10 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo (Macor vs Shapal)	80
Tabela 11 – Diferença na Temperatura do Cátodo (Macor vs Shapal)	81
Tabela 12 – Entradas Setadas para o Sistema de Testes em Vácuo	98
Tabela 13 – Corrente Extraída para Fluxos Distintos	103
Tabela 14 – Sonda de Langmuir: Parâmetros de Entrada	106
Tabela 15 – Sonda de Langmuir: Parâmetros do Plasma (CCP)	108
Tabela 16 – Comparação dos Parâmetros de Performance do Cátodo de Plasma	113
Tabela 17 – Comparação dos Parâmetros de Performance de 5 Tipos de Cátodos	114
Tabela 18 – Performance do Cátodo de RF com Diferentes Fluxos de Massa (\dot{m})	115

Lista de abreviaturas e siglas

UnB	Universidade de Brasília
FGA	Faculdade do Gama
FCTE	Faculdade de Tecnologias e Ciências em Engenharia
LaSE	Laboratório de Sistemas Espaciais
IF	Instituto de Física
LFP	Laboratório de Física dos Plasmas
AEB	Agência Espacial Brasileira
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FAPDF	Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FINATEC	Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos
EUA	Estados Unidos da América
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
AeroAstro	Aeronautics & Astronautics
SPT	Stationary Plasma Thruster
RF	Radio Frequency
sccm	Standard Cubic Centimeters per Minute
Vpp	Valor pico-a-pico
MMN	Manual Matching Network

SMA	SubMiniature version A
CERN	European Organization for Nuclear Research
JPL	Jet Propulsion Laboratory
XIPS	Xenon Ion Propulsion System
ESA	European Space Agency
CDT	Closed Drift Thruster
GRC	Glenn Research Center
ICP	Inductively Coupled Plasma
CCP	Capacitively Coupled Plasma
SW	Software
PHALL	Permanent Magnet Hall Thrusters
SNECMA	Société Nationale d'Étude et de Construction de Moteurs d'Aviation

Lista de símbolos

e^-	Elétron
I^+	Íon
Ar	Argônio
Xe	Xenônio
F	Vetor Força de Lorentz
q	Carga da Partícula
E	Vetor Campo Elétrico
v	Velocidade da Partícula
B	Vetor Campo Magnético
ρ	Densidade do Gás
t	Tempo
g	Vetor Aceleração Gravitacional
∇p	Gradiente de Pressão
μ	Viscosidade Dinâmica
$\nabla^2 \mathbf{V}$	Laplaciano de Velocidade do Gás
C	Custo de Extração de Elétrons
V	Tensão Alvo
P	Pressão
I	Corrente de Elétrons Extraída do Extrator de Elétrons (Alvo)
U	Fator de Utilização do Gás
Cte	Constante
k	Constante de Equivalência de 1 sccm de Ar em Corrente Elétrica
\dot{m}	Taxa de Fluxo de Massa

\dot{Q}_C	Taxa de Transferência de Calor por Condução
k_C	Condutividade Térmica do Material
A_S	Superfície do Material / Superfície Irradiada
$\frac{dT}{dx}$	Taxa de Variação da Temperatura em Relação à Distância
\dot{Q}_R	Taxa de Transferência de Calor por Radiação
ε	Emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
T_S	Temperatura da Superfície Irradiada
T_M	Temperatura do Meio
P_1	Potência Não-refletida
P_2	Potência Refletida
P_R	Potência Real Transferida para a Antena de RF
V	Volume
n	Número de mols do Gás
R	Constante Universal dos Gases
n_e	Densidade de Elétrons
u_e	Velocidade do Fluido Neutro
S_e	Perda / Ganho de Energia pelos Elétrons Devido a Colisões Inelásticas
m_e	Massa do Elétron
e	Carga do Elétron
$\bar{\nu}_m$	Frequência Média de Colisões
E	Campo Elétrico
K_B	Constante de Boltzmann
T_e	Temperatura dos Elétrons
V	Potencial Elétrico
ε	Emissividade térmica

κ	Condutividade Térmica Isentrópica
c_p	Calor Específico a Pressão Constante
ρ	Densidade dos Materiais
r	Raio
h	Comprimento / Altura
T_e	Temperatura dos Elétron
e	Carga do Elétron
ϕ_e	Potencial Elétrico
ϕ_f	Potencial Flutuante
ϕ_p	Potencial do Plasma
k_b	Constante de Boltzmann
I_{is}	Corrente de Saturação dos Íons
I_{es}	Corrente de Saturação dos Elétron
V_{th}	Velocidade Térmica dos Elétron
N_e	Densidade de Elétron
N	Densidade de Referência dos Elétron
R	Resistência

Sumário

	Motivação	29
	Introdução	31
	Objetivo	35
	Objetivos Gerais	35
	Objetivos Específicos	36
	Justificativa	39
	Referencial Teórico	41
I	CÁTODO DE RADIOFREQUÊNCIA (RF)	45
1	FÍSICA DO CÁTODO DE RADIOFREQUÊNCIA	47
1.1	Antena de Radiofrequência	47
1.1.1	Especificações da Antena	48
1.2	Anel Superior	48
1.3	Câmara de Geração de Plasma	49
1.3.1	Equação de Navier-Stokes	49
1.3.2	Equação da Força de Lorentz	50
1.4	Conectores Herméticos	51
1.4.1	Especificações dos Conectores	52
1.5	Extrator de Elétrons	53
1.6	Extrator de Íons	53
1.7	Flange Inferior	54
1.8	Modelo 3D Experimental do Cátodo	54
II	SISTEMA DE TESTES EM VÁCUO DO CÁTODO	57
2	CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA DE TESTES	59
2.1	Sistema de Vácuo (Campânula)	59
2.2	Sistema de Vácuo (Charuto)	60
2.2.1	Equação da Pressão	61
2.2.2	Lei dos Gases Ideais	61
2.3	Características dos Geradores de RF	62

2.3.1	Especificações Básicas do Geradores	62
III	SISTEMA DE CONEXÕES DO CÁTODO	65
3	SISTEMA IMPLANTADO DA REFERÊNCIA	67
3.1	Conexões do Sistema de Testes	67
3.1.1	Detalhes dos Componentes do Sistema	68
3.2	Esquemático do Cátodo	68
3.2.1	Conexões do Sistema de Testes do Protótipo do Cátodo de RF	69
3.2.2	Esquemático do Protótipo do Cátodo de RF	69
3.2.3	Esquemático do Circuito da Sonda de Langmuir	70
3.2.4	Equação da Lei de Ohm	71
IV	SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA (SW ANSYS)	73
4	ANÁLISE TÉRMICA DO CÁTODO	75
4.1	Análise Térmica por Condução & Radiação	75
4.1.1	Lei de Fourier (Condução)	75
4.1.2	Lei de Stefan-Boltzmann (Radiação)	75
4.2	Modelo 3D do Cátodo de 30 Watts (Simulação)	77
4.3	Modelo 3D do Cátodo de 60 Watts (Simulação & Teste)	78
V	SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA (SW COMSOL)	83
5	ELÉTRONS, POTENCIAL ELÉTRICO E FLUXO MAGNÉTICO	85
5.1	Distribuição da Densidade de Elétrons	85
5.2	Distribuição do Potencial Elétrico	86
5.3	Distribuição da Densidade do Fluxo Magnético	86
5.3.1	Equação da Continuidade para os Elétrons	87
5.3.2	Equação de Balanço de Momento para Elétrons	87
5.3.3	Definição de Campo Elétrico	87
VI	TESTE DO CÁTODO NA CÂMARA DE VÁCUO	89
6	PERFORMANCE DO CÁTODO EM VÁCUO	91
6.1	Montagem da Antena de RF em Vácuo	91
6.2	Antena de Radiofrequência em Vácuo	92
6.2.1	Antena de RF Adaptada para o Sistema Disponível	94
6.3	Montagem do Cátodo Dentro da Câmara de Vácuo	95

6.4	Cátodo de RF em Testes Dentro da Campânula	98
6.5	Equações de Performance do Cátodo	103
6.5.1	Equação do Custo de Extração dos Elétrons	104
6.5.2	Equação do Fator de Utilização do Gás	104
6.6	Curva Característica de Langmuir do Cátodo de RF (CCP)	105
6.6.1	Equação da Superfície do Cilindro (Face Única)	105
6.6.2	Equação da Temperatura dos Elétrons	109
6.6.3	Equação da Velocidade Térmica dos Elétrons	109
6.6.4	Equação da Densidade de Elétrons	109
6.7	Parâmetros de Performance do Cátodo (Gráficos)	111
6.8	Parâmetros de Performance do Cátodo (Tabelas)	112
	Conclusão	117
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICES	123
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO (DIMENSÕES)	125
	Desenho 2D da Câmara de Plasma	125
	Desenho 2D da Câmara de Plasma	126
	Desenho 2D do Anel Frontal	126
	Desenho 2D da Flange Inferior	127
	APÊNDICE B – PROPULSOR PHALL E CÁTODO DE RF	129
	APÊNDICE C – CURVA DE LANGMUIR: CÓDIGO EM PYTHON	131
	APÊNDICE D – CURVAS DE LANGMUIR DO CÁTODO DE RF	135
	ANEXOS	137
	ANEXO A – PROPRIEDADES DO MACOR	139
	Propriedades Térmicas do Macor	139
	Propriedades Mecânicas do Macor	139
	Propriedades Elétricas do Macor	140
	Propriedades Químicas do Macor	140
	ANEXO B – DIMENSÕES DOS CONECTORES HERMÉTICOS	141
	Dimensões da União Bulkhead	141

Dimensões dos Ferrules (Anéis de Vedação)	142
---	-----

Motivação

A crescente demanda por missões espaciais de longa duração, tanto em órbita da Terra quanto em missões de exploração do espaço profundo, impulsionou a busca por soluções de propulsão mais eficientes, duradouras e sustentáveis. Nesse cenário, a propulsão elétrica, especialmente os propulsores Hall, destaca-se como uma alternativa viável e vantajosa em relação à propulsão química tradicional. Ao longo das últimas décadas, a propulsão elétrica mostrou-se capaz de reduzir significativamente a massa de propelente e aumentar a vida útil de satélites e espaçonaves, tornando-se a tecnologia de escolha para diversas aplicações, como manutenção de posição, inserção orbital e até propulsão primária em missões científicas.

No entanto, para que os propulsores Hall operem de maneira eficiente, um componente crítico deve funcionar de forma confiável e durável: o cátodo emissor de elétrons. Tradicionalmente, os cátodos ocos têm sido amplamente utilizados, mas eles apresentam desafios em termos de operação e vida útil, fatores que limitam sua aplicação em missões mais ambiciosas e de longa duração. O cátodo de radiofrequência (RF), por sua vez, surge como uma alternativa promissora, oferecendo maior durabilidade e eficiência, além de eliminar componentes que tradicionalmente limitam a vida útil dos cátodos ocos, como filamentos.

A motivação para este trabalho está diretamente relacionada à necessidade de avanços tecnológicos que possam aprimorar ainda mais o desempenho dos sistemas de propulsão elétrica. O desenvolvimento de cátodos de RF tem o potencial de revolucionar o uso de propulsores Hall em futuras missões espaciais, permitindo que espaçonaves operem por períodos mais longos e com menos intervenções de manutenção, ao mesmo tempo em que aumentam a eficiência e reduzem os custos operacionais. Além disso, à medida que o interesse por missões interplanetárias e de exploração do espaço profundo cresce, a confiabilidade e a eficiência dos cátodos se tornam aspectos centrais para o sucesso dessas missões.

Ao explorar e analisar o desenvolvimento tecnológico dos cátodos de RF para propulsores elétricos Hall, este trabalho visa contribuir para o avanço dessa tecnologia crucial. Ao proporcionar uma melhor compreensão dos benefícios e desafios associados à implementação de cátodos de RF, espera-se que este estudo ajude a pavimentar o caminho para sua adoção em larga escala, permitindo uma nova era de exploração espacial mais eficiente e acessível.

Introdução

Muito se tem discutido, recentemente, acerca da exploração espacial, seja para fins científicos e tecnológicos, como, por exemplo, expandir o conhecimento humano e melhorar a qualidade de vida das pessoas, ou para fins empresariais, como, por exemplo, a mineração de matérias-primas através de empresas privadas.

Segundo [Goebel e Katz \(2008\)](#) a propulsão elétrica, um dos avanços mais significativos no campo da engenharia aeroespacial, teve sua origem no início do século XX. O conceito foi inicialmente concebido por Robert Goddard em 1906 e, de maneira independente, descrito pelo cientista russo Konstantin Tsiolkovskiy em 1911. Ambos os pioneiros previram que, além da propulsão química, a utilização de campos elétricos para acelerar partículas poderia ser uma maneira eficiente de mover espaçonaves no vácuo do espaço. Essa visão revolucionária marcaria o início de uma nova era para a exploração espacial.

Nas décadas seguintes, o interesse pela propulsão elétrica cresceu, com vários conceitos sendo propostos. Em 1929, o cientista alemão Hermann Oberth explorou o uso da propulsão elétrica em aplicações espaciais, e em 1949, Shepherd e Cleaver, no Reino Unido, também contribuíram com estudos teóricos para essa área. Contudo, foi apenas na década de 1960 que o desenvolvimento dessa tecnologia começou a ganhar tração, com o estabelecimento de programas de pesquisa voltados para o estudo sistemático dos propulsores elétricos. Ernst Stuhlinger, por exemplo, realizou a primeira análise abrangente dos sistemas de propulsão iônica em 1964, enquanto Robert Jahn, em 1968, publicou a primeira descrição completa da física por trás dos propulsores elétricos.

A partir da década de 1960, tanto os Estados Unidos da América (E.U.A.) quanto a União das Repúblicas Soviéticas (U.R.S.S.), atual Rússia, investiram fortemente no desenvolvimento da propulsão elétrica. A *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, por meio de seu *Glenn Research Center (GRC)* e do *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*, começou a investigar tecnologias de propulsão elétrica, enquanto, na Rússia, o foco estava no desenvolvimento dos propulsores Hall. Esses dispositivos, que utilizam campos magnéticos e elétricos para acelerar íons a altas velocidades, mostraram-se promissores, especialmente para a manutenção de posição (*station-keeping*) de satélites.

Os primeiros testes em órbita de propulsores iônicos e Hall ocorreram ainda na década de 1960, com o uso de propelentes como césio e mercúrio. Durante os anos 1970 e 1980, os soviéticos lançaram uma série de satélites utilizando propulsores Hall para comunicação, consolidando a posição dessa tecnologia como um componente essencial de sistemas de manutenção orbital. O primeiro lançamento significativo ocorreu em 1971, quando dois propulsores SPT-60, *Stationary Plasma Thruster (SPT)*, foram enviados

ao espaço a bordo do satélite Meteor. Desde então, a Rússia tornou-se líder no uso de propulsores Hall, com mais de 238 dispositivos operando em 48 espaçonaves.

Enquanto isso, outros países também começaram a adotar a tecnologia de propulsão elétrica. O Japão, por exemplo, utilizou propulsores iônicos em seu *Engineering Test Satellite VI (ETS-VI)* em 1995. Nos Estados Unidos, o primeiro uso comercial de propulsores iônicos ocorreu em 1997, com o lançamento do sistema *Xenon Ion Propulsion System (XIPS)*, da Hughes. A NASA, por sua vez, integrou a tecnologia de propulsão elétrica em sua missão *Deep Space 1* em 1998, utilizando o propulsor NSTAR para realizar a primeira missão de exploração espacial profunda alimentada por propulsão elétrica.

Durante a primeira década do século XXI, a utilização de propulsores Hall e iônicos expandiu-se significativamente. A *European Space Agency (ESA)* fez uso do propulsor Hall PPS-1350-G da Snecma em sua missão SMART-1 à Lua, enquanto a missão japonesa Hayabusa utilizou propulsores iônicos para realizar o primeiro retorno de amostras de um asteroide. Essas missões não apenas demonstraram a viabilidade dos sistemas de propulsão elétrica para exploração espacial, mas também solidificaram sua importância para missões futuras.

Nas últimas duas décadas, o uso da propulsão elétrica cresceu exponencialmente, especialmente em satélites de comunicação em órbita geoestacionária, onde os propulsores elétricos se tornaram uma alternativa atraente aos sistemas químicos tradicionais. Além da eficiência em termos de consumo de propelente, esses sistemas permitem uma redução significativa da massa total da espaçonave, o que representa economia de combustível e aumento da vida útil dos satélites. Nos últimos 10 anos, propulsores iônicos e Hall têm sido amplamente utilizados para manutenção de posição e inserção orbital, com tanto os Estados Unidos quanto a Rússia já tendo lançado centenas de propulsores em satélites de comunicação.

Paralelamente ao desenvolvimento desses sistemas de propulsão, um componente vital para o funcionamento dos propulsores Hall tem recebido grande atenção: o cátodo emissor de elétrons. Tradicionalmente, os propulsores Hall utilizam cátodos ociosos para fornecer os elétrons necessários para realizar a neutralização, mas essa tecnologia apresenta desafios de durabilidade e eficiência. Recentemente, o cátodo de radiofrequência (RF) surgiu como uma alternativa promissora, oferecendo vantagens em termos de vida útil e menor manutenção.

O cátodo de RF utiliza campos de radiofrequência para gerar uma nuvem de plasma que fornece os elétrons necessários para a operação do propulsor, eliminando a necessidade de filamentos e outros componentes que limitam a vida útil dos cátodos tradicionais. Essa inovação tecnológica não apenas melhora a eficiência dos sistemas de propulsão elétrica, mas também oferece novas oportunidades para missões de longa duração no espaço profundo, onde a confiabilidade e a durabilidade são essenciais.

Dado o papel central dos cátodos no desempenho e funcionamento dos propulsores do tipo Hall, este trabalho visa explorar o desenvolvimento tecnológico dos cátodos de radiofrequência como uma fonte alternativa de elétrons. A análise é fortemente embasada em pesquisas realizadas ao longo dos anos desses tipos de dispositivos. Pesquisadores como [Hatakeyama et al. \(2007\)](#), [Jahanbakhsh e Celik \(2014\)](#), [Celik e Kurt \(2018a\)](#) e [Smirnov et al. \(2019\)](#), foram de fundamental importância para o desenvolvimento do protótipo desenvolvido no Laboratório de Física dos Plasmas (LFP) da Universidade Brasília (UnB).

Objetivo

Objetivos Gerais

I. Desenvolvimento de um Cátodo de Radiofrequência Acessível e Eficiente:

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um novo cátodo de radiofrequência para ser implementado em propulsores, como o propulsor Hall, no setor espacial. Este cátodo busca oferecer uma alternativa mais acessível e eficiente em comparação com os cátodos convencionais, como o cátodo oco, que são extremamente caros e importados.

II. Aprimoramento da Vida Útil e Adaptação a Ambientes Terrestres e Espaciais:

O novo cátodo de radiofrequência visa superar as limitações dos cátodos convencionais, especialmente em relação à sua vida útil quando expostos à atmosfera terrestre. Ao resistir às condições ambientais adversas, como oxidação, diferença de pressão e impurezas, o cátodo de radiofrequência se tornará mais adequado para testes experimentais em laboratórios, permitindo uma maior eficácia e confiabilidade em ambientes de pesquisa.

III. Geração de Fluxo de Elétrons para Acionar Propulsores:

Assim como seu antecessor, o cátodo de radiofrequência tem como finalidade gerar um fluxo de elétrons para acionar o propulsor Hall. No entanto, ele traz consigo a possibilidade de uma extração maior de corrente, dependendo de sua configuração, geometria e dos equipamentos utilizados para o acionamento, conforme evidenciado por estudos anteriores citados nas principais referências bibliográficas, cujo o trabalho foi embasado.

IV. Preparação para Futuras Implementações e Colaborações:

Além do desenvolvimento do cátodo em si, este trabalho também visa preparar o terreno para futuras implementações e colaborações, especialmente com a Universidade de Brasília (UnB) e a Agência Espacial Brasileira (AEB). A intenção é incorporar o novo cátodo junto com o propulsor Hall desenvolvido pela UnB no Laboratório de Física dos Plasmas (LFP) em futuros trabalhos, com potenciais aplicações em *CubeSats* (nano e microsatélites).

Objetivos Específicos

I. Levantamento Bibliográfico:

Pesquisar as mais diversas referências nessa área de radiofrequência voltada a física de plasmas através de uma revisão bibliográfica.

II. Seleção das Melhores Referências:

Com base no levantamento bibliográfico, escolher as melhores pesquisas para que o TCC seja embasado nos mesmos.

III. Implementação do Cátodo:

Etapa de muita discussão juntamente dos colegas de laboratório para decidir as melhores configurações e adaptações para iniciar o desenvolvimento do dispositivo.

IV. Desenvolvimento do Cátodo:

Tomar os dados das pesquisas de referência e iniciar os processos para construção do cátodo no Laboratório de Física dos Plasmas na UnB.

V. Desenho Técnico do Cátodo no Software *SolidWorks*:

Desenvolver o cátodo em 2D com as dimensões requeridas e também trazer um modelo gráfico 3D em CAD para se ter um ideia do modelo utilizando o software *SolidWorks*.

VI. Simulação de Temperatura do Cátodo no *Ansys*:

Utilizar os desenhos gráficos já desenvolvidos para simular a temperatura do cátodo em regiões específicas, onde utilizá-se peças específicas e evitar o vazamento de fluido (gases).

VII. Desenvolvimento de um Modelo 3D do Cátodo:

Etapa de usinagem e montagem do dispositivo, e também de comparação com os dispositivos da referência de embasamento.

VIII. Testes Experimentais do Cátodo na Câmara de Vácuo (Campânula):

- i. **Corrente:** Corrente extraída do cátodo;
- ii. **Modelo 3D:** Imagens do Modelo 3D experimental do cátodo;
- iii. **Pressão:** Medir a pressão interna da câmara;
- iv. **Fluxo-Corrente:** Extrair dados da relação fluxo-corrente;
- v. **Temperatura:** Verificar a temperatura do cátodo nos testes.

IX. Extração de Dados:

Extração de todos os dados possíveis e de interesse da pesquisa com os medidores que estão presentes no laboratório.

X. Comparação de Dados com as Referências:

Verificar, em meio ao trabalho, se os dados são compatíveis e quais são as discrepâncias, principalmente o enfoque dos dados extraídos, a corrente do cátodo.

Justificativa

Cátodos para propulsores como o Hall são extremamente caros devido aos materiais utilizados, processos de fabricação e demanda. O mais comum que é utilizado para acionar esse tipo de motor é denominado cátodo oco, cujo seu preço inicia-se em torno de US\$: 6.000,00 (USD). Considerando o dólar comercial no ano de 2024, tem-se que US\$: 1,00 é igual a R\$: 5,00 (aproximadamente), o que resulta num cátodo oco custando R\$: 30.000,00 (sem contar os impostos e outras taxas). Além disso, ele não é produzido no Brasil, o mesmo, normalmente, é importado dos EUA.

Tendo em vista todos os fatores já citados à respeito do cátodo oco, tem-se ainda que falar de sua vida útil. Ao implementar o mesmo em um satélite e lançá-lo ao espaço sideral, ele se mostra eficiente. Todavia, para testes experimentais terrestres, como os que são realizados em laboratórios ao redor do globo, ele não se mostra eficiente. Sua vida útil é drasticamente reduzida quando exposto a atmosfera terrestre devido a diversos fatores, como, por exemplo, oxidação, diferença de pressão, impurezas e gases específicos. Essa “contaminação” ocorre devido a sua exposição ao abrir a câmara de vácuo para algum fim. Logo, percebe-se que o dispositivo não é ideal para um ambiente laboratorial (ambiente de pesquisa).

Vislumbrando esses problemas, faz-se necessário o desenvolvimento de um novo dispositivo que resistirá as condições que atmosfera terrestre propicia e a diferença de pressão ao tirá-lo da câmara de vácuo. Portanto, o novo cátodo, aqui proposto e desenvolvido, é denominado cátodo de radiofrequência, onde seu princípio de funcionamento é diferente do anterior, assim como demonstrado nos artigos das principais referências de embasamento, (CELIK; KURT, 2018a) e (SMIRNOV et al., 2019).

No entanto, a finalidade advém de ser a mesma do antecessor, ou seja, a geração de um fluxo de elétrons que acionará o propulsor Hall. Esse dispositivo trás ainda a possibilidade de uma extração maior de corrente a depender de sua configuração, geometria e dos equipamentos que permitem o seu acionamento, como é mostrado através do artigo (CELIK; KURT, 2018a), expondo diversas possibilidades (inclusive a possibilidade de gases nobres) numa tabela de comparação.

Referencial Teórico

Revisão de Literatura e Fundamentação

A exploração espacial tem sido um tema de grande relevância nas últimas décadas, destacando-se por seus avanços científicos e tecnológicos que têm o potencial de expandir o conhecimento humano e melhorar a qualidade de vida das pessoas. Esses avanços não se limitam apenas ao campo científico, mas também abrangem interesses empresariais, como a mineração de matérias-primas através de empresas privadas, refletindo a importância multifacetada do espaço para a humanidade. Desde a sua concepção no início do século XX por visionários como Robert Goddard e Konstantin Tsiolkovskiy, a propulsão espacial tem evoluído constantemente, culminando em tecnologias avançadas como os propulsores de íons e os propulsores Hall.

Corrida Espacial e Avanços Tecnológicos

Os séculos XX e XXI testemunharam avanços significativos em várias áreas da ciência e tecnologia, com a corrida espacial emergindo como um marco importante do século passado. Este período foi caracterizado pela rivalidade entre duas superpotências, a URSS e os EUA, que desempenharam papéis fundamentais no desenvolvimento de tecnologias que moldaram o mundo moderno. A corrida espacial impulsionou notavelmente o setor aeroespacial, abrangendo tanto a aeronáutica quanto a astronáutica, resultando em inovações que continuam a influenciar o campo até hoje.

A corrida espacial começou formalmente com o lançamento do satélite Sputnik pela URSS em 1957, seguido pelo lançamento do Explorer 1 pelos EUA em 1958. Este período foi marcado por diversas missões históricas, como o voo orbital de Yuri Gagarin em 1961 e a missão Apollo 11, que levou o homem à Lua em 1969. Esses eventos não apenas demonstraram a capacidade tecnológica dos países envolvidos, mas também estimularam o desenvolvimento de novas tecnologias, muitas das quais têm aplicações práticas em nossa vida cotidiana. A partir dessa fase de rivalidade, tanto o desenvolvimento de sistemas de propulsão quanto o aprimoramento das missões científicas começaram a tomar forma, estabelecendo as bases para inovações futuras em propulsão elétrica, um campo fundamental para a exploração espacial atual.

Propulsão Espacial: Desenvolvimentos e Inovações

No contexto da propulsão espacial, tanto a URSS quanto os EUA emergiram como líderes, introduzindo propulsores elétricos de alta performance essenciais para o desloca-

mento de dispositivos no espaço, especialmente no espaço profundo (*Deep Space*). Entre as inovações destacadas, estão os propulsores de íons e os propulsores Hall, ambos amplamente reconhecidos por sua eficiência e importância na propulsão elétrica.

Os propulsores de íons utilizam a ionização de um propelente, geralmente gás xenônio, que é então acelerado por um campo elétrico para gerar empuxo. Esses propulsores são conhecidos por sua alta eficiência específica, permitindo missões de longa duração com menor consumo de combustível (GOEBEL; KATZ, 2008). A NASA foi pioneira no desenvolvimento desse tipo de propulsor, que se tornou um concorrente direto do propulsor Hall.

Os propulsores Hall, que tomavam o nome de *Closed Drift Thruster (CDT)*, por sua vez, foram desenvolvidos pela URSS e utilizam um campo magnético e elétrico para ionizar e acelerar as partículas. Esse tipo de propulsor é amplamente utilizado em satélites de comunicação e missões de exploração espacial devido à sua confiabilidade e eficiência. O Instituto Kurchatov em Moscou foi um dos principais centros de desenvolvimento desses propulsores, contribuindo significativamente para a sua evolução (SMIRNOV et al., 2019). Desde então, os propulsores Hall têm sido amplamente empregados em missões como a SMART-1 da Agência Espacial Europeia e o retorno de amostras do asteroide Hayabusa pela JAXA, consolidando-se como uma das opções mais eficientes para propulsão de satélites e exploração espacial.

Desenvolvimento e Desafios dos Cátodos

Os cátodos são componentes críticos nos propulsores elétricos, especialmente nos propulsores Hall. O tipo mais comum de cátodo utilizado é o cátodo oco, que é essencial para a ionização do gás propelente. No entanto, esses dispositivos são caros e sua vida útil é significativamente reduzida quando operados em condições atmosféricas terrestres, fora do vácuo do espaço (CELIK; KURT, 2018a). A exposição contínua desses cátodos à atmosfera durante os testes em laboratório resulta em oxidação e desgaste acelerado, o que compromete seu desempenho e eleva os custos experimentais.

Devido ao ciclo de testes que ocorre em laboratórios, onde é necessário expor os cátodos à atmosfera para manutenção ou ajustes, a durabilidade desses componentes é comprometida. Este é um desafio significativo, pois aumenta os custos de experimentação e dificulta a viabilidade econômica de testes extensivos (CHEN, 2015).

Com o objetivo de mitigar esses desafios, estudos recentes focam no desenvolvimento de cátodos alternativos, mais duráveis e eficientes. O cátodo de radiofrequência (RF) surge como uma dessas inovações, eliminando a necessidade de filamentos e prometendo maior durabilidade em comparação aos cátodos ocos convencionais. Além disso, o cátodo de RF oferece a vantagem de um processo de operação mais estável e controlado,

representando um avanço significativo no campo da propulsão elétrica. Este trabalho se propõe a explorar o desenvolvimento tecnológico desse novo tipo de cátodo, oferecendo uma alternativa mais econômica e confiável para testes laboratoriais e futuras missões espaciais.

Revisão de Literatura e Fundamentação

Este trabalho se baseia em diversas referências importantes para seu desenvolvimento. Estudos como os de [Celik e Kurt \(2018a\)](#), que contribuíram para aspectos geométricos do cátodo, [Smirnov et al. \(2019\)](#), que forneceram noções básicas para ajustes de equipamentos, [Chen \(2015\)](#), que detalha os princípios físicos dos fenômenos na física de plasmas, e [Goebel e Katz \(2008\)](#), que explora os fundamentos dos propulsores elétricos, incluindo propulsores Hall e de íons, foram essenciais para a construção teórica deste trabalho.

A revisão da literatura fornece um embasamento sólido para o desenvolvimento do novo cátodo de radiofrequência, apresentando uma alternativa inovadora e potencialmente mais econômica para o setor de propulsão espacial. Este estudo visa não apenas desenvolver um protótipo da tecnologia existente, mas também contribuir para a redução dos custos e aumento da eficiência dos experimentos e missões espaciais.

Considerações Finais

A importância do desenvolvimento de novas tecnologias no campo da propulsão espacial não pode ser subestimada. A criação de um cátodo de radiofrequência representa um passo significativo na busca por soluções mais eficientes e econômicas para os desafios enfrentados na exploração espacial. Este trabalho, fundamentado em extensa pesquisa e revisão da literatura, busca trazer contribuições relevantes para o campo da propulsão espacial, promovendo avanços científicos e tecnológicos que beneficiarão tanto as missões espaciais quanto os experimentos laboratoriais na Terra.

Parte I

Cátodo de Radiofrequência (RF)

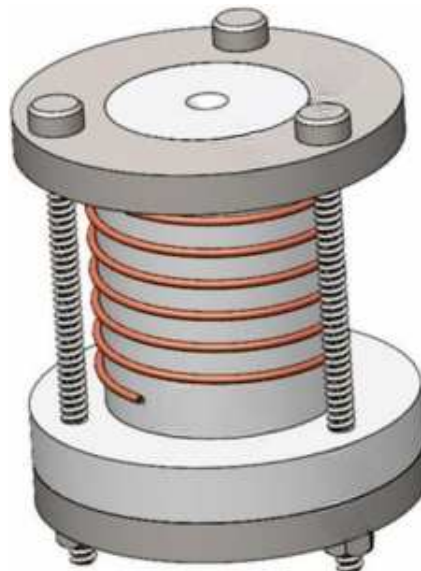
1 Física do Cátodo de Radiofrequência

O cátodo de radiofrequência, ou cátodo de RF, é composto por sete componentes principais: a antena de RF, o anel superior, a câmara de geração de plasma, os conectores herméticos, o extrator de elétrons (eletrodo com potencial positivo), o extrator de íons (eletrodo com potencial negativo) e a flange inferior. Neste capítulo, serão descritos cada um desses componentes com embasamento físico e de desenvolvimento. Cada item do dispositivo desenvolvido terá uma subseção dedicada.

1.1 Antena de Radiofrequência

Considerado como o componente mais importante do cátodo de radiofrequência, a antena de radiofrequência é enrolada em torno da câmara de geração de plasma em um formato helicoidal, assim como visto nas Figuras 1 (vista isométrica do cátodo em CAD) (SYSTÈMES, 2023), 4 (vista isométrica do cátodo experimental) e 24 (Antena de Radiofrequência Física) para gerar campos eletromagnéticos de alta frequência. A antena é conectada a um gerador de radiofrequência (gerador de RF), cujo o mesmo fornecerá energia o suficiente para gerar o campo elétrico em torno da câmara de geração de plasma.

Figura 1 – Vista Isométrica do Cátodo em CAD



A antena permite também o controle do plasma no interior da câmara de geração de plasma. O plasma gerado pode ser controlado variando-se a potência e a frequência do campo elétrico gerado pelo gerador de RF através da antena, tal frequência de 13,56 MHz tem comprimento de aproximadamente 22,10 m. Isso permite ajustar a propriedades do plasma de acordo com as necessidades do cátodo.

As especificações da antena de radiofrequência moldada em torno da câmara de geração de plasmas possui as características indicadas na Tabela 1, as quais são semelhantes com as do artigo [Celik e Kurt \(2018a\)](#):

1.1.1 Especificações da Antena

Tabela 1 – Detalhes Técnicos da Antena de Radiofrequência

Especificações	Tipo
Marca	Fabricação Própria
Comprimento	1 [m]
Diâmetro	1 [mm] ou 18 [AWG]
Material	Cobre (Fio Esmaltado)
Nº de Voltas	6 (Ajustáveis)

1.2 Anel Superior

Esse componente denominado anel superior de suporte ,ou ânodo, possui multipla função. Sua função básica traz a funcionalidade de manter a câmara de plasma celada juntamente com a flange inferior através de três parafusos de aço inoxidável (M3). No entanto, ele também empenhará dois papéis fundamentais. Sendo sua composição de aço inoxidável, ele está em um potencial positivo (carregado positivamente) para ajudar os elétrons (e^-) a saírem da câmara de plasma através de um orifício na parte superior da mesma de 1 mm de diâmetro, como desmostrados nas Figuras 2 (vista superior do cátodo experimental) e 51 (anel frontal).

Figura 2 – Vista Superior do Cátodo Experimental



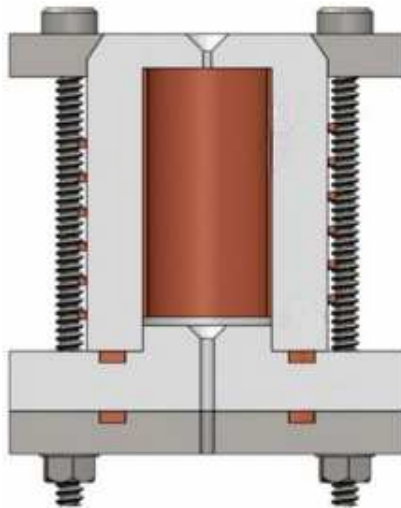
Note que o anel superior já possui um formato anelar, o que é muito semelhante ao ânodo do propulsor Hall. A intenção é futuramente implementar esse cátodo de RF no centro do propulsor hall desenvolvido pela UnB de modo a substituir o cátodo oco

que o propulsor possui e ao mesmo tempo melhorar sua distribuição geométrica estando localizado no meio do propulsor. No entanto, serão necessárias adaptações para que o dispositivo seja implementado dessa forma.

1.3 Câmara de Geração de Plasma

A câmara de geração de plasma é responsável por todo o processo físico de ionização do fluido circundante, especificamente em seu interior. As Figuras 1 (vista isométrica do cátodo em CAD), 3 (Corte Longitudinal do Cátodo em CAD) e 4 (Vista Isométrica do Cátodo Experimental) ilustram bem essa câmara tanto pelo exterior quanto pelo interior.

Figura 3 – Corte Longitudinal do Cátodo em CAD



Pelo canal inferior do cátodo, através de um conector hermético, entrará um fluxo de gás medido em *Standard cubic centimeters per minute (sccm)*. O gás nobre aplicado é o argônio (Ar), no entanto a utilização de outros gases como o xenônio (Xe) é aceitável. Vale ressaltar que o argônio é um gás barato e fácil de encontrar. O gás que entra na câmara de plasma através do conector hermético pode ser descrito através da equação de Navier-Stokes (WHITE, 2021).

1.3.1 Equação de Navier-Stokes

A Equação de Navier-Stokes citada é dada por:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1.1)$$

Os termos encontrados na equação de Navier-Stokes, considerando a incompressibilidade ($\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$), são determinados da seguinte maneira:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho : & \text{Densidade do gás;} \\ \mathbf{V} : & \text{Vetor velocidade do gás;} \\ t : & \text{Tempo;} \\ \mathbf{g} : & \text{Vetor aceleração gravitacional;} \\ \nabla p : & \text{Gradiente de pressão;} \\ \mu : & \text{Viscosidade dinâmica;} \\ \nabla^2 \mathbf{V} : & \text{Laplaciano de velocidade do gás.} \end{array} \right.$$

1.3.2 Equação da Força de Lorentz

Após a inserção do gás na câmara, ele se distribuirá e o campo elétrico gerado pela antena criará oscilações nos elétrons do gás. Essas oscilações serão intensas o suficiente de modo a arrancar elétrons (e^-) do argônio, desse processo físico surgirão íons positivos (I^+) e elétrons livres. Com o processo de ionização dos átomos de argônio, um estado altamente energético conhecido como plasma é formado. Com o plasma na presença de um campo elétrico e magnético surge a força de Lorentz em seu formato geral, dada pela seguinte equação do livro base (JAHN, 1968):

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.2)$$

As variáveis da equação (1.2) são identificadas por:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{F} : & \text{Força de Lorentz;} \\ q : & \text{Carga da Partícula;} \\ \mathbf{E} : & \text{Campo Elétrico;} \\ \mathbf{v} : & \text{Velocidade da Partícula;} \\ \mathbf{B} : & \text{Campo Magnético.} \end{array} \right.$$

Considerando o caso em que só há a presença do campo magnético (externo) gerado pela antena de radiofrequência agindo sobre o plasma como:

$$\left\{ \begin{array}{ll} q = cte & \text{(Carga constante)} \\ \mathbf{E} = 0 & \text{(Campo elétrico nulo)} \\ \mathbf{v} \neq 0 & \text{(Velocidade não-nula)} \\ \mathbf{B} \neq 0 & \text{(Campo magnético não-nulo)} \end{array} \right.$$

Obtém-se a força de Lorentz no seguinte formato:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.3)$$

Considerando o caso em que o só há a presença de um campo elétrico (externo) gerado agindo sobre o plasma, tal que:

$$\begin{cases} q = cte & \text{(Carga constante)} \\ \mathbf{E} \neq 0 & \text{(Campo elétrico não-nulo)} \\ \mathbf{v} \neq 0 & \text{(Velocidade não-nula)} \\ \mathbf{B} = 0 & \text{(Campo magnético não-nulo)} \end{cases}$$

Tem-se a seguinte expressão para a força de Lorentz:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} \quad (1.4)$$

Vale salientar que o plasma consiste de íons positivos e elétrons livres formando um estado quase-neutro, onde o número íons positivos e elétrons livres são quase iguais. A bibliografia de embasamento deste TCC descreve o plasma como:

Um plasma é um gás quase-neutro de partículas carregadas e neutras que exibe comportamento coletivo. (CHEN, 2015) ¹

As propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e químicas do material cerâmico Macor, utilizado na câmara de geração de plasma, são descritas no Apêndice A (Propriedades do Macor). Esse material foi escolhido por sua alta resistividade dielétrica e tolerância a temperaturas de até 800°C (com carga) e 1000°C (sem carga), garantindo desempenho diante do plasma, que possui alta condutividade térmica. Estudos indicam que câmaras revestidas com materiais de baixa função trabalho, como bário (Ba) e hexaboreto de lantânio (LaB6), aumentam a emissão de elétrons.

1.4 Conectores Herméticos

Os conectores herméticos são componentes essenciais em sistemas que requerem vedação total para evitar a fuga de gases ou líquidos, veja a geometria no Anexo B. Eles são projetados para proporcionar uma barreira hermética, garantindo que não haja vazamentos que possam comprometer a eficiência ou a segurança do sistema. No contexto do cátodo de radiofrequência, os conectores herméticos são fundamentais para manter a integridade da câmara de geração de plasma, impedindo qualquer escape de gás que possa interferir no processo.

¹ “A plasma is a quasineutral gas of charged and neutral particles which exhibits collective behavior.”

Esses conectores são geralmente fabricados com materiais robustos e resistentes à corrosão, como aço inoxidável ou ligas especiais, para suportar condições extremas de pressão e temperatura. A instalação correta desses conectores é vital, pois qualquer falha na vedação pode levar a vazamentos que comprometem a operação do sistema e podem causar falhas ou riscos de segurança.

Em resumo, os conectores herméticos desempenham um papel crucial na manutenção da integridade e eficiência dos sistemas de cátodo de radiofrequência, garantindo que os gases, como, por exemplo, o argônio permaneçam contidos e que o dispositivo funcione de maneira confiável e segura.

1.4.1 Especificações dos Conectores

As tabelas 2, 3, 4 e 5 logo abaixo trazem informações relevantes acerca do desenvolvimento do cátodo. Vale ressaltar que as informações contidas nelas são referentes somente ao dispositivo desenvolvido. Alguns componentes são padrão para qualquer dispositivo que trabalha com radiofrequência.

Tabela 2 – Detalhes Técnicos do Passador de Fluido (União)

Especificações	Tipo
Marca	Swagelok
Tipo	União Bulkhead
Comprimento	31/25 [in]
Diâmetro Interno (DI)	1/20 [in]
Diâmetro Externo (DE)	1/16 [in]
Roscas	3/16 x 32 FPP Unf
Material	Aço Inoxidável.

Tabela 3 – Detalhes Técnicos do Conector de Radiofrequência

Especificações	Tipo
Tipo	SMA
Modelo	Padrão

Tabela 4 – Detalhes Técnicos dos Anéis de Vedação (Ferrules)

Especificações	Tipo
Marca	Swagelok
Tipo	Ferrules - Front & Back
Dimensões	Para União de 1/16 [in] (Padrão)
Material	Aço Inoxidável

Tabela 5 – Detalhes Técnicos dos O-rings

Especificações	Tipo
Marca	Produção Própria
Espessura	1,50 [mm]
Diâmetro Interno	24 [mm]
Diâmetro Externo	27 [mm]
Material	Cobre

As especificações citadas são extremamente necessárias para que a montagem e acionamento do cátodo sejam executadas. Mais detalhes no que tange o passador de fluido (União) e Ferrules (anéis de vedação) estão disponíveis em duas tabelas disponíveis no Anexo B (Dimensões dos Conectores Herméticos).

1.5 Extrator de Elétrons

Logitudinalmente alinhado com a parte superior do cátodo e deslocado de uma distância de 50 mm (SMIRNOV et al., 2019), o extrator de elétrons (alvo), como o próprio nome diz, tem a funcionalidade de extrair os elétrons gerados dentro da câmara de geração de plasma através de um orifício de 1 mm localizado na parte superior da câmara, veja a Figura 14. Esse dispositivo está em um potencial positivo (positivamente carregado), assim como o anel superior. Ele ajuda os elétrons a se deslocarem pela saída superior.

Essa peça pode ser constituída de diversos metais, no entanto, o aço inoxidável foi escolhido por suas propriedades condutivas e também por ser o melhor material disponível para testar o cátodo no momento. Planeja-se, futuramente, utilizar outros metais para testes. O teste do componente composto por outros materiais será interessante para verificar se o fluxo de elétrons na saída do orifício aumenta ou diminui ao acertar o alvo.

1.6 Extrator de Íons

Localizado no interior da câmara de geração de plasma muito próximo da região de eventos, como visto na Figura 3, o extrator de íons (coletor de íons) é um componente extremamente importante para diferir um dispositivo gerador de plasmas qualquer de um cátodo. O mesmo está em um potencial negativo (negativamente carregado) para atrair as partículas de íons provenientes da ionização e geração do plasma. O objetivo é confinar os elétrons na parte central da câmara, deixando-os livres, e o mínimo de íons para compensar a descarga na região.

A peça possui cerca de 29 mm de altura, 45 mm de comprimento e 0,03 mm de espessura e é composta de cobre. Porém, em testes futuros, pretende-se utilizar outros

materiais, como, por exemplo, molibidênio, aço inoxidável e tântalo, assim como mostrado no artigo [Smirnov et al. \(2019\)](#) para motivos de comparação.

A conexão desse componente é feita por meio de um fio fino que sai pela lateral cilíndrica da câmara de plasma e é conectado externamente ao circuito. O furo feito na lateral do cilindro possui um diâmetro de 1 mm, essa dimensão advém de ser a mesma que está localizada na saída de elétrons da câmara.

1.7 Flange Inferior

A flange inferior juntamente com a base inferior da câmara tem o objetivo de selar o cátodo como um todo através de três furos de 3 mm por onde passam os parafusos de aço inoxidável do tipo M3. Essas figuras com suas respectivas dimensões foram citadas no Apêndice A (Desenho Técnico - Dimensões). O dispositivo inteiro, após a montagem, pode ser visto na Seção 1.8 deste capítulo.

Assim como diversas das peças do cátodo, a flange também foi construída a partir de aço inoxidável e suas dimensões são relativamente semelhantes às dimensões do anel superior e da base de apoio da câmara de plasma, como no desenho técnico 52. O anel superior que também faz parte do conjunto possui furos de diâmetros iguais por onde os mesmos parafusos passam. Esse conjunto formado pelas três peças mantém o cátodo firme e isolado de qualquer vazamento.

Essa peça possui ainda a função de segurar ou manter conectores herméticos conectados a ela. Um desses conectores é o passador de fluxo (União Bulkhead) mencionado anteriormente na Seção 1.4. Além disso, a flange ainda tem o papel de ser um ponto de apoio para posicionar o cátodo.

1.8 Modelo 3D Experimental do Cátodo

Após um processo intenso de muita pesquisa e desenvolvimento chegou-se ao modelo final do cátodo de radiofrequência desenvolvido. A Figura 4 (Vista Isométrica do Cátodo Experimental) mostra o modelo do produto final. Nessa imagem tem-se todas as peças que compõem o cátodo de plasma desenvolvido nesse TCC, inclusive as conexões e os dispositivos necessários para realizar o experimento no interior da câmara de vácuo (Campânula).

Figura 4 – Vista Isométrica do Cátodo Experimental



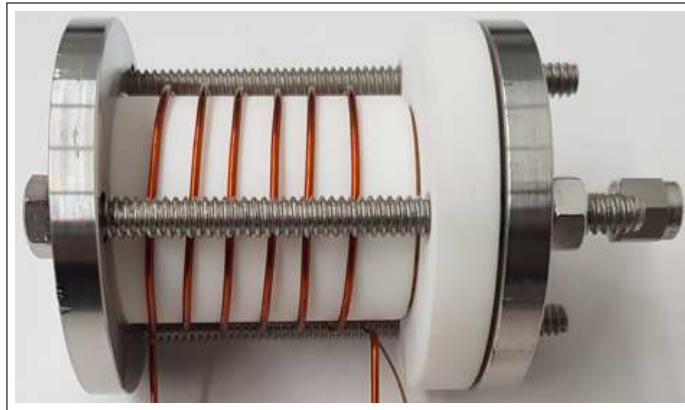
A seguinte imagem, Figura 5 (Vista Isométrica Diagonal do Cátodo Experimental), traz mais detalhes no que disrespeita as conexões. Na flange inferior do dispositivo tem-se o conector hermético do tipo Bulkhead, e na extremidade da antena de RF observa-se um conector do tipo SMA.

Figura 5 – Vista Isométrica Diagonal do Cátodo Experimental



A próxima Figura 6 (Vista Frontal do Cátodo Experimental) traz um ângulo melhor da lateral do dispositivo. A antena fica bem destacada nessa imagem, assim como outras peças que complementam o cátodo. Vale salientar que a Figura 2 do anel superior, vista anteriormente na Seção 1.2 (Vista Superior do Cátodo Experimental) faz parte desse conjunto.

Figura 6 – Vista Frontal do Cátodo Experimental



Parte II

Sistema de Testes em Vácuo do Cátodo

2 Configurações do Sistema de Testes

2.1 Sistema de Vácuo (Campânula)

O processo de lançamento de qualquer objeto ao espaço é extremamente complexo. Antes da missão, os dispositivos que serão lançados, na forma de *Payload* (Carga útil) passam por rigorosos testes de baixa pressão. Essas experimentações são conduzidas dentro de um aparelho que simula o quase-vácuo do espaço; o mesmo é denominado de câmara de vácuo. Neste aparelho mostrado na Figura 7 (Sistema de Vácuo do Cátodo) é possível variar as pressões as quais os dispositivos serão submetidos.

Figura 7 – Sistema de Vácuo do Cátodo (Campânula)



O vácuo pode ser definido de formas distintas por cada autor, no entanto concisas. Segundo a *European Organization for Nuclear Research (CERN)*, vácuo é definido pela seguinte frase citada no artigo:

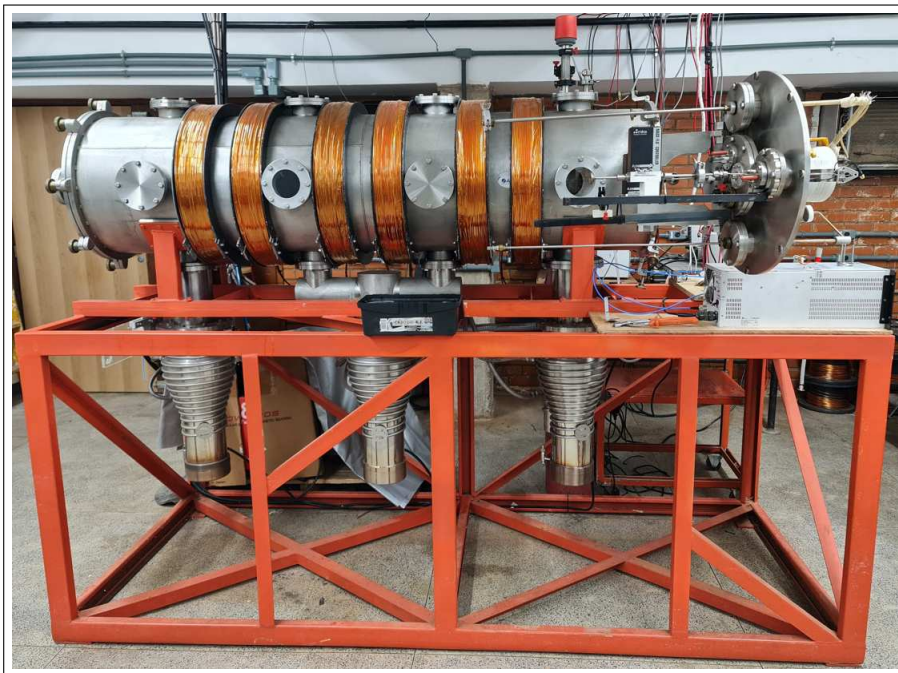
Vácuo significa qualquer volume que contenha menos partículas de gás, átomos e moléculas (uma densidade de partículas e pressão de gás mais baixas) do que há na atmosfera externa circundante. Portanto, vácuo é o ambiente gasoso em pressões abaixo da atmosfera. (CERN, 1999) ¹

¹ “Vacuum means any volume containing less gas particles, atoms and molecules (a lower particle density and gas pressure), than there are in the surrounding outside atmosphere. Accordingly, vacuum is the gaseous environment at pressures below atmosphere.”

2.2 Sistema de Vácuo (Charuto)

Após a realização dos testes iniciais do cátodo de plasma na câmara de vácuo (Campânula), foi necessária a troca para uma câmara com volume maior, a fim de possibilitar testes de performance mais representativos. Dessa forma, os experimentos foram transferidos para a câmara de vácuo (Charuto), que apresenta um ambiente mais adequado para avaliar o desempenho do cátodo em condições mais próximas às reais aplicações em propulsão espacial. A configuração do sistema de vácuo com a câmara charuto pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Sistema de Vácuo do Cátodo (Charuto)



A nova câmara de vácuo possui um volume interno de aproximadamente $0,38 m^3$ (380 litros), proporcionando um ambiente mais adequado para testes de desempenho do cátodo de radiofrequência. Na extremidade direita da câmara, encontra-se o cátodo de radiofrequência instalado ao lado do propulsor de efeito Hall (PHall II-C), desenvolvido pelo LFP. Essa disposição foi intencional, visando futuros experimentos para avaliar a operação conjunta do cátodo com o propulsor, possibilitando investigações sobre a compatibilidade, estabilidade e eficiência do sistema.

Além disso, essa câmara de vácuo possui um sistema de bombeamento capaz de atingir uma pressão de fundo da ordem de $10^{-7} Torr$, o que permite simular adequadamente o ambiente espacial ao minimizar a influência de colisões com partículas residuais. Essa baixa pressão é essencial para testes de propulsão elétrica, garantindo que o desempenho do cátodo e do propulsor seja avaliado em condições próximas às encontradas no espaço.

A Figura 7 expõe o sistema de vácuo cujo qual o cátodo será testado. Esse sistema, em particular recebe o nome de Campânula. A câmara de vácuo é capaz de chegar a pressões da ordem de 10^{-7} Torr. Além disso, esse sistema respeita a definição de pressão. Essa equação é definida da seguinte forma:

2.2.1 Equação da Pressão

$$P = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (2.1)$$

Os termos descritos na Equação (2.1) são definidos como:

$$\begin{cases} P : & \text{Pressão;} \\ F_{\perp} : & \text{Força perpendicular a área;} \\ A : & \text{Área de aplicação da força.} \end{cases}$$

A equação anteriormente apresentada define formalmente a pressão, expressa em unidades de $[N/m^2] \equiv [1Pascal]$. No contexto da termodinâmica, para os gases confinados dentro de um sistema, consideramos a Equação de Estado dos Gases Ideais, que é uma relação fundamental na descrição do comportamento dos gases. Esta equação é frequentemente representada como:

2.2.2 Lei dos Gases Ideais

$$PV = nRT \quad (2.2)$$

Cuja qual seus termos são descritos como:

$$\begin{cases} P : & \text{Pressão;} \\ V : & \text{Volume;} \\ n : & \text{Número de mols do gás;} \\ R : & \text{Constante universal dos gases;} \\ T : & \text{Temperatura.} \end{cases}$$

Essa relação, conforme discutido por [Halliday, Resnick e Walker \(2013\)](#), permite não apenas a descrição das propriedades dos gases em diversas condições, mas também é essencial para a compreensão de processos termodinâmicos que envolvem transformações

de energia. Essa equação é fundamental para o estudo de sistemas em equilíbrio térmico e dinâmico.

Adicionalmente, é importante mencionar que essa equação, embora simplificada, se aplica a muitos gases sob condições de baixa pressão e alta temperatura, onde o comportamento real dos gases se aproxima do ideal. Para gases em condições extremas ou sob pressões elevadas, são necessárias correções, como as descritas nas equações de estado de Van der Waals, que levam em conta o volume ocupado pelas moléculas de gás e as interações intermoleculares.

2.3 Características dos Geradores de RF

Este equipamento da Figura 9 (Gerador de Radiofrequência - RF) foi visto na Seção 2.1 deste Capítulo como parte do sistema de vácuo. Esse gerador é responsável por gerar um campo elétrico na câmara de geração de plasma vista no Capítulo 1 Seção 1.3 através da antena de RF.

Figura 9 – Gerador de Radiofrequência da RFPP



2.3.1 Especificações Básicas do Geradores

Tabela 6 – Configurações do Gerador de RF da RFPP

Especificações	Tipo
Modelo	ICP20P RF Power
1ª Harmônica	13,56 MHz
2ª Harmônica	27,12 MHz
Potência Máxima	2000 Watts

Outro gerador de radiofrequência utilizado foi o da Plasource, caracterizado por operar em uma frequência fixa. Esse tipo de gerador é amplamente utilizado em experimentos de plasma devido à sua estabilidade e confiabilidade. No entanto, em comparação com o gerador anteriormente empregado, sua potência é reduzida pela metade. A Figura 10 ilustra o equipamento que foi utilizado.

Figura 10 – Gerador de Radiofrequência da Plasource



Tabela 7 – Configurações do Gerador de RF da Plasource

Especificações	Tipo
Modelo	i-GEN 1310 (13.56 MHz / 1 kW)
1ª Harmônica	13,56 MHz
Potência Máxima	1000 Watts

Parte III

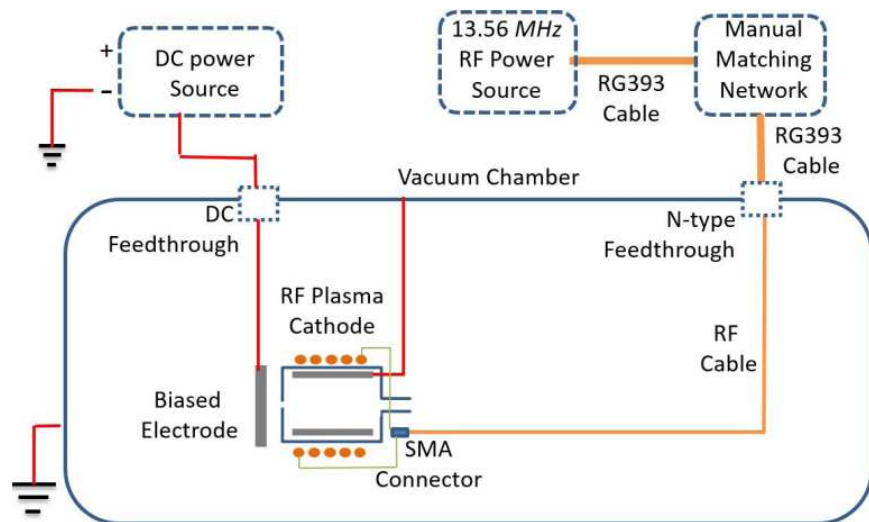
Sistema de Conexões do Cátodo

3 Sistema Implantado da Referência

3.1 Conexões do Sistema de Testes

Para que o cátodo de radiofrequência seja testado é necessário um sistema de conexões. Esse sistema deve prover tudo que é requerido pelo dispositivo para ser acionado. O conjunto de conexões implementado para o cátodo desenvolvido é o mesmo que foi utilizado no artigo ([JAHANBAKHS; CELIK, 2014](#)), onde os autores trazem um modelo do sistema que é fácil de ser replicado num laboratório que já faz pesquisas nesse campo de radiofrequência e com vácuo, como o Laboratório de Física dos Plasmas (LFP) da UnB. Abaixo encontra-se um modelo simples do sistema proposto pelos autores do artigo mencionado:

Figura 11 – Esquemático do Sistema de Conexões



Fonte: [Jahanbakhsh e Celik \(2014\)](#)

Os componentes que compõem o conjunto na imagem já foram descritos anteriormente em outros capítulos. No entanto, eles serão listados a seguir de modo a evidenciá-los. Vale frisar que algumas alterações simples serão feitas no sistema, como, por exemplo, a frequência aplicada devido ao requerimento do cátodo de 60 Watts desenvolvido neste trabalho e alguns componentes que são equivalentes aos demais:

3.1.1 Detalhes dos Componentes do Sistema

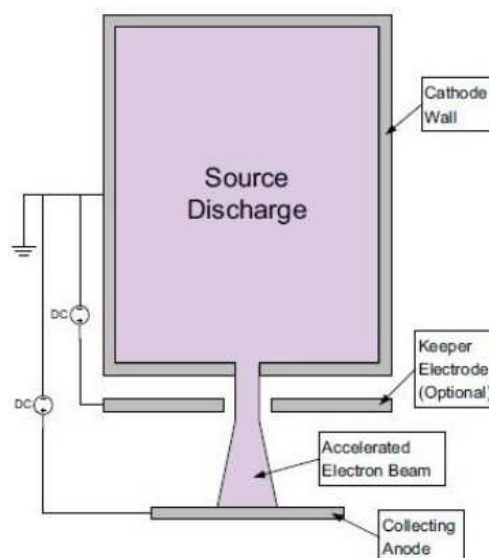
Tabela 8 – Componentes do Esquemático do Sistema de Conexões

Nº de Comp.	Tipo	Finalidade
1	Fonte DC	Para o Extrator de Elétrons
1	Fonte de RF	Para a Antena de RF
1	MMN	Para o Casamento de Impedâncias
1	Câmara de Vácuo (Campânula)	Experimentação
1	DC Feedthrough	Para Fazer a Conexão Entre a Fonte DC e o Extrator de Elétrons
1	N-type Feedthrough	Para Conectar a Antena ao MMN ou Equivalente
1	Conector SMA	Para a Antena
2	Cabos do tipo RG939 ou equivalente	Para conexões
1	Cabo de RF	Para conexões

3.2 Esquemático do Cátodo

Advindo de obter diversas configurações, o cátodo de radiofrequência (cátodo de plasma) possui uma geometria extremamente simples. Outras configurações também são estudadas em outros artigos. O artigo ([JAHANBAKSH; CELIK, 2014](#)) demonstra um esquemático realmente simplificado do cátodo desenvolvido. Na figura a seguir vislumbra-se um pouco de cada uma das peças do dispositivo em um esquemático bidimensional ilustrativo:

Figura 12 – Esquemático do Cátodo de RF em 2D



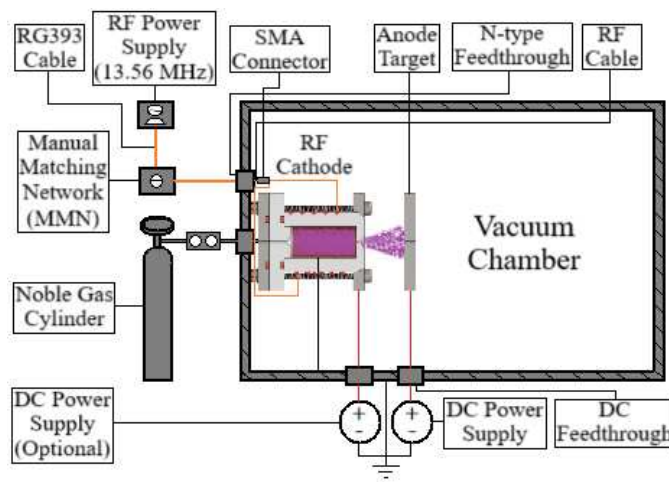
Fonte: [Jahanbakhsh e Celik \(2014\)](#)

Esse esquemático criado pelos autores do artigo demonstra simplificada como é a estruturação do cátodo de plasma. Ainda na Figura 12 (Esquemático do Cátodo de RF em 2D) percebe-se que a peça *keeper electrode* ou anel superior, como a nomenclatura desse TCC o chama, é opcional. Porém, a mesma pode ser utilizada para os fins abordados no Capítulo 1 Seção 1.2.

3.2.1 Conexões do Sistema de Testes do Protótipo do Cátodo de RF

As conexões primárias, como mostra a Figura 14, fornecem uma representação detalhada da configuração fundamental do cátodo de RF. Essas conexões destacam os componentes centrais e suas funções dentro do sistema do cátodo (CELIK; KURT, 2018a). Em contraste, as conexões secundárias ampliam a visão do sistema como um todo, oferecendo uma visão mais ampla através de um diagrama de circuito simplificado de toda a configuração de teste. A Figura 13 ilustra ainda o arranjo dessas conexões, com uma descrição detalhada da função e inter-relação de cada componente, excluindo a sonda de Langmuir que possui um sistema com outra configuração mostrado posteriormente.

Figura 13 – Sistema Operacional de Conexões do Cátodo de RF



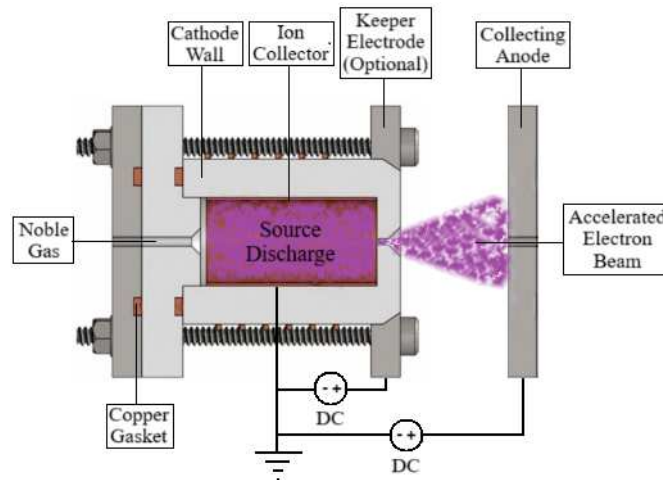
É importante enfatizar que a fonte de alimentação DC opcional opera de forma dependente do eletrodo keeper, conforme indicado no esquema do cátodo de plasma. Embora instrumentação adicional seja necessária para diagnósticos abrangentes do sistema e medição de parâmetros, tais equipamentos estão prontamente disponíveis na maioria dos laboratórios especializados em pesquisa de plasma. Esses dispositivos garantem o monitoramento preciso de parâmetros-chave como corrente, voltagem e pressão, facilitando o controle necessário para otimizar o desempenho do cátodo de RF.

3.2.2 Esquemático do Protótipo do Cátodo de RF

Para proporcionar uma compreensão mais clara da configuração do cátodo de RF, um esquema simplificado foi criado para ilustrar as conexões entre os componentes do

dispositivo e rotular cada parte, Figura 14. Além disso, o esquema destaca o arranjo do feixe de elétrons acelerados. É importante notar que essa configuração se assemelha muito àquelas encontradas em vários tipos de cátodos de plasma (JAHANBAKHS; CELIK, 2014). O cátodo representado foi ajustado de acordo com o sistema fornecido para os testes operacionais dentro da câmara de vácuo.

Figura 14 – Esquemático do Cátodo de RF como Ilustração



Vale destacar que o ânodo coletor opera de forma semelhante ao ânodo usado em propulsores Hall. Os testes iniciais do cátodo foram realizados sem o uso do *keeper*; no entanto, o cátodo está equipado com um *keeper* para as fases de teste futuras. No caso dos cátodos ocos, o *keeper* desempenha um papel crucial na manutenção da temperatura do cátodo e na garantia de que a descarga permaneça estável, o que não é completamente verdadeiro para os cátodos de RF. Ao permitir uma pequena corrente entre o cátodo e o *keeper*, o sistema impede que o cátodo resfrie excessivamente quando a descarga principal entre o cátodo e o ânodo é desligada. Esse recurso permite uma re-ignição rápida da descarga principal, sem os atrasos associados a um cátodo resfriado, o que é particularmente útil para manter a eficiência e a responsividade do sistema.

3.2.3 Esquemático do Circuito da Sonda de Langmuir

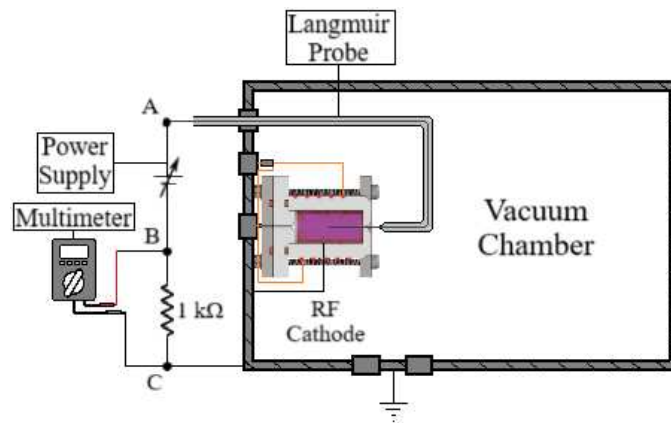
Para caracterizar a qualidade do plasma gerado, utiliza-se uma **sonda de Langmuir**, que permite a medição de suas principais propriedades. A Figura 15 apresenta o circuito desenvolvido especificamente para o cátodo de plasma. Esse circuito é composto por três elementos principais:

- I. **Sonda de Langmuir:** projetada para operar no ambiente do cátodo de plasma e coletar dados sobre a interação do plasma com superfícies sólidas;

- II. **Fonte de tensão:** responsável por realizar a varredura da diferença de potencial na sonda, variando de -100 V a 100 V , permitindo a obtenção da curva característica do plasma;
- III. **Multímetro digital:** utilizado para medir a queda de tensão sobre um **resistor de Shunt de $1\text{ k}\Omega$** , a partir da qual a corrente do plasma é determinada com alta precisão.

A análise dos dados obtidos por meio desse circuito possibilita a extração direta da curva de parâmetros fundamentais, como o **potencial de plasma** (V_p), o **potencial flutuante** (V_f), a **corrente de saturação de elétrons** (I_{es}) e a **corrente de saturação de íons** (I_{is}). Esses parâmetros são essenciais para a caracterização detalhada do comportamento do plasma no cátodo de RF.

Figura 15 – Circuito da Sonda de Langmuir do Cátodo de RF



Note que um potencial positivo é aplicado no nó A e um potencial negativo no nó B. Como a queda de tensão é medida no resistor de Shunt, o sinal da tensão exibido no multímetro será negativo ($-$), indicando que a sonda está extraindo elétrons do plasma.

Ao inverter a polaridade da fonte nos nós A e B, a sonda passa a estar sob um potencial negativo, atraindo íons, enquanto o potencial positivo será aplicado sobre o resistor. Como a queda de tensão continua sendo medida no resistor de Shunt, o sinal da tensão no multímetro será positivo ($+$).

A tensão para plotar o gráfico da curva no Capítulo 6 é a tensão aplicada. Para calcular a corrente do gráfico é necessário utilizar a Equação 3.1 da Lei de Ohm:

3.2.4 Equação da Lei de Ohm

$$V = RI \quad (3.1)$$

Seus termos são descritos e definidos como:

$$\begin{cases} V : & \text{Tensão medida [V];} \\ R : & \text{Resistência conhecida [\Omega];} \\ I : & \text{Corrente calculada [A].} \end{cases}$$

Os parâmetros plasmáticos determinados a partir das medições com a sonda de Langmuir estão detalhados no Capítulo 6, sendo apresentados de forma consolidada na Tabela 15.

Parte IV

Simulação de Temperatura (SW ANSYS)

4 Análise Térmica do Cátodo

A temperatura é algo crucial no planejamento de qualquer projeto, pois os materiais a serem escolhidos devem atender as especificações do projeto e ainda suportar diferentes picos de temperaturas sem danificar o material. Como mencionado no Capítulo 1, o material escolhido para o desenvolvimento de cada peça foi feito com base em dados das referências e com base na presente simulação.

4.1 Análise Térmica por Condução & Radiação

A geração de calor devido a condução e a radiação é fundamental para o estudo do experimento. As leis básicas relacionadas a temperatura são aplicáveis no dispositivo. As equações a seguir são equações básicas que o software utiliza como referência, levando em conta as considerações para motivos de simplificação dos cálculos numéricos de temperatura realizados pelo mesmo.

4.1.1 Lei de Fourier (Condução)

A Lei de Fourier traz informações quanto a transferência de calor devido a condução. Essa equação demonstra a transferência em todo o material em contato com a fonte de geração de calor, o plasma. Essa fonte se encontra dentro da câmara de geração de plasma. A equação, segundo Cengel (2002), é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{Condução}} = -k_C A_S \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Os termos dessa equação são definidos como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_C : \text{ Taxa de transferência de calor por condução;} \\ k_C : \text{ Constante de condutividade térmica do material;} \\ A_S : \text{ Superfície do material;} \\ \frac{dT}{dx} : \text{ Taxa de variação da temperatura em relação à distância.} \end{array} \right.$$

4.1.2 Lei de Stefan-Boltzmann (Radiação)

Essa equação de transferência de calor devido a radiação traz informações quanto o calor gerado pela radiação no interior da câmara de plasma. Essa equação demonstra como o calor gerado pela radiação afeta diretamente o calor gerado pela condução ao

longo do dispositivo e dos componentes conectados a ele. Segundo Cengel (2002), essa equação é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{Radiação}} = \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{\text{Meio}}^4) \quad (4.2)$$

Os termos dessa equação são determinados como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_R : \text{Taxa de transferência de calor por radiação;} \\ \varepsilon : \text{Emissividade;} \\ \sigma : \text{Constante de Stefan-Boltzmann } (5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]); \\ A_S : \text{Superfície irradiada;} \\ T_S : \text{Temperatura da superfície irradiada;} \\ T_M : \text{Temperatura do meio.} \end{array} \right.$$

Para a realização da simulação numérica do cátodo de RF, foi imprescindível a obtenção das propriedades térmicas e físicas dos materiais empregados em sua construção. Essas propriedades desempenham um papel crucial na modelagem do comportamento térmico e na previsão do desempenho do sistema. Dentre as propriedades consideradas, destacam-se a emissividade térmica (ε), a condutividade térmica isentrópica (κ), o calor específico a pressão constante (c_P) e a densidade dos materiais (ρ).

A correta determinação dessas propriedades é fundamental para garantir a precisão dos resultados da simulação, uma vez que elas influenciam diretamente o transporte de calor e a distribuição de temperatura no sistema como um todo. A Tabela 9 apresenta os valores das propriedades de cada material utilizado tanto na simulação quanto no desenvolvimento do protótipo, assegurando uma base sólida para as análises subsequentes realizadas neste trabalho.

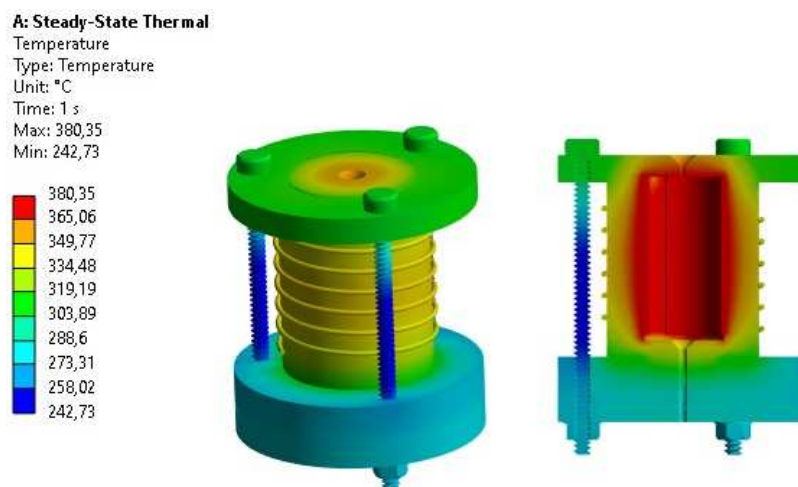
Tabela 9 – Propriedade dos Materiais Utilizados nas Simulações

Material	Emissividade	Condutividade	Calor Específico à	Densidade
	Térmica	Térmica Isentrópica	Pressão Constante	
	[-]	[W/m°C]	[J/kg°C]	[kg/m³]
Macor	0,62	1,56	805,00	2550,00
Shapal	0,93	55	780	2880
Cobre	0,03	400,00	385,00	8933,00
Aço Inoxidável 316 L	0,30	13,80	480,00	8055,00

4.2 Modelo 3D do Cátodo de 30 Watts (Simulação)

Utilizando o software *Ansys* (ANSYS, 2023), tomou-se o cátodo de radiofrequência desenvolvido dentro do software *SolidWorks* (SYSTÈMES, 2023) e realizou-se um simulação de temperatura para um cátodo de 30 Watts. Dado que a temperatura gerada dentro da câmara de geração de plasma é elevada, assim como no cátodo oco, tomou-se uma precaução no que despreza os materiais das peças utilizadas. A Figura 16 abaixo mostra um espectro colorido e quantificado com as variações de temperatura, cuja mínima está em cerca de 242 °C e a máxima em torno dos 380 °C.

Figura 16 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 30 Watts (Macor)



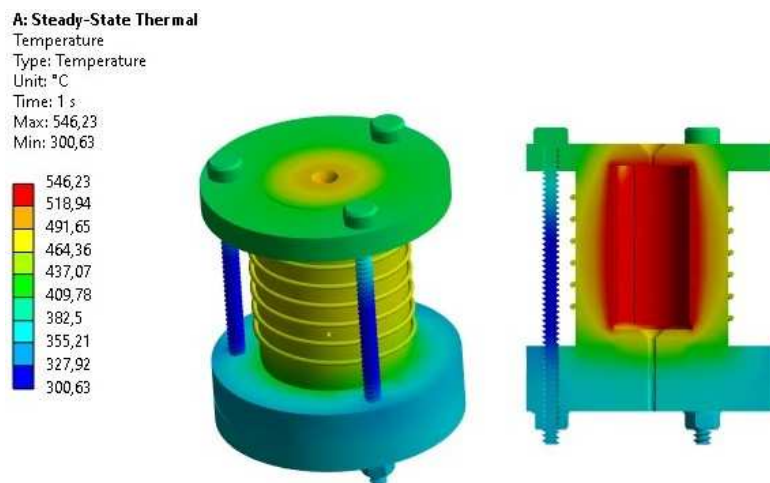
A checagem da temperatura é de fundamental importância também para definir os o-rings de vedação a serem utilizados. Assim como citado no Capítulo 1, os o-rings são constituídos de cobre, esse material foi escolhido devido as temperaturas observadas na simulação. Logo abaixo da câmara de plasma, na base da câmara e flange inferior possui regiões em formatos retangulares (quatro retângulos pequenos), onde o o-rings são encaixados para selar o dispositivo de qualquer vazamento, veja o Apêndice A (Desenho Técnico - Dimensões) para uma melhor visualização e compreensão.

Percebe-se que nessas regiões a temperatura está variando dentro de uma faixa relativamente codizente com as características do dispositivo. Como o-rings são componentes, geralmente, constituídos de borracha ou silicone, optou-se por utilizar o cobre que tem um ponto de fusão relativamente alto, na casa dos 1000°C. Vislumbra-se ainda que o pico de temperatura é atingido dentro da câmara e não fora dela, como almejado.

4.3 Modelo 3D do Cátodo de 60 Watts (Simulação & Teste)

Com o intuito de implementar o cátodo de plasma em propulsores do tipo Hall para grandes satélites, simulou-se também um cátodo de 60 Watts. O dispositivo enfrentou um pico de temperatura mais elevado do que o anterior de 30 Watts. A temperatura máxima em torno de 546 °C, novamente, foi atingida dentro da câmara de plasma, onde o gás nobre é ionizado gerando o plasma. Veja mais detalhes na Figura 17 (Simulação de Temperatura do Cátodo de 60 Watts) a seguir:

Figura 17 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 60 Watts (Macor)



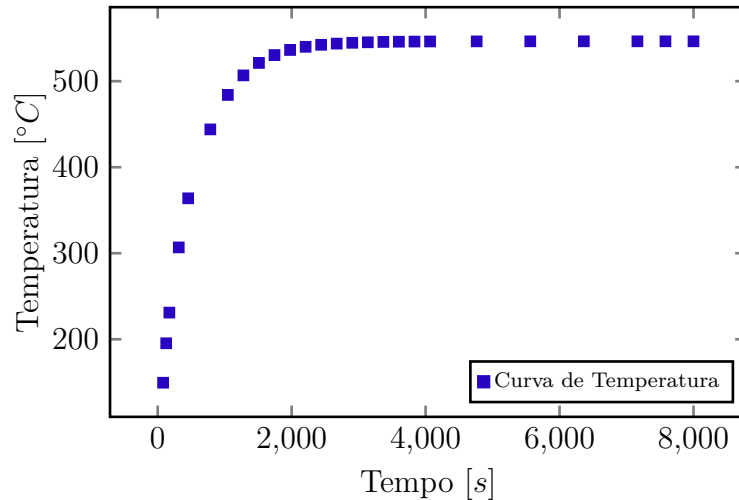
A potência do primeiro cátodo de 30 Watts em relação ao segundo cátodo de 60 Watts dobrou. Fortunadamente, esse aumento na potência não causou um impacto grande na temperatura, cujo a elevação, referente ao primeiro cátodo, foi baixa. Nota-se que a diferença de temperatura máxima dentro da câmara de plasma de um cátodo para outro foi de aproximadamente 166 °C. A diferença entre temperaturas mínimas está em cerca de 58 °C.

Os materiais utilizados na construção do cátodo foram pensados para resistir altas temperaturas, isso no que tange um cátodo. A partir da simulação tridimensional do cátodo de 60 Watts, vislumbra-se que os materiais são suficientes para implementar o cátodo em propulsores do tipo Hall maiores. Futuramente, almeja-se simular um cátodo de 100 Watts para fins de pesquisa.

Após realizar simulações numéricas para avaliar o perfil de temperatura e as temperaturas máxima (crítica) e mínima dentro do cátodo de RF, uma análise térmica transitória foi executada utilizando o ANSYS para determinar o tempo necessário para o sistema atingir o estado estacionário. A Figura 18 ilustra o perfil de temperatura, medido em graus Celsius, em função do tempo, apresentado em segundos. Os resultados indicam que o cátodo de RF necessita de aproximadamente 2000 segundos, ou cerca de 33 minutos, para alcançar o equilíbrio térmico. Esse achado destaca a importância de com-

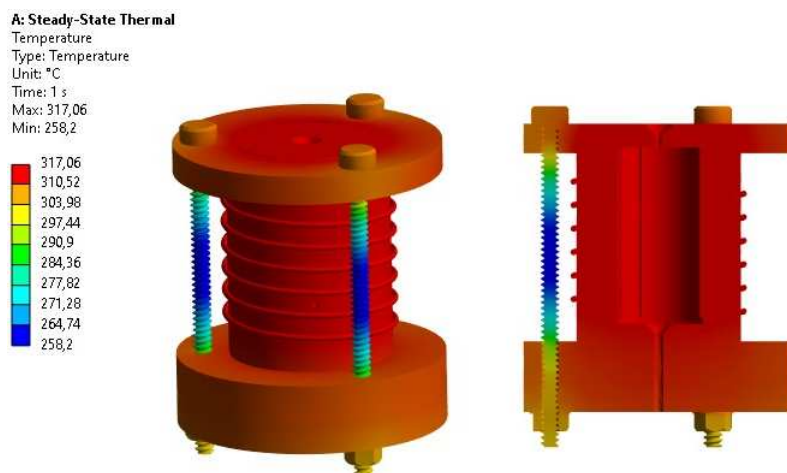
preender a dinâmica térmica do cátodo de RF, fundamental para otimizar o desempenho em aplicações práticas.

Figura 18 – Gráfico ($T \times t$) do Perfil Temperatura ao longo do Tempo



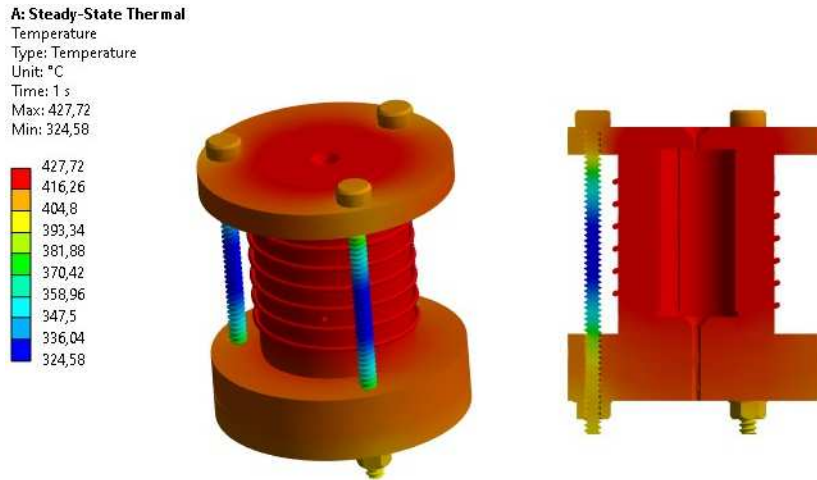
Ao fazer uma simulação de temperatura com um material cerâmico diferente, Figura 19, o material denominado Shapal mostrou-se mais edequado para a construção do cátodo. No entanto, o material tem um custo 10 vezes maior frente ao Macor. Logo, optou-se por não utilizá-lo para testes. Veja que a distribuição de temperatura é mais visível ao longo do corpo do cátodo, quando comparado a cátodo de Macor, Figura 16. Observe que a temperatura mínima é mais elevada, mas a máxima é menor em relação ao cátodo de Macor de 30 Watts.

Figura 19 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 30 Watts (Shapal)



Para o cátodo de 60 Watts, Figura 20, as mesmas ocorrências são perceptíveis, quando comparado ao cátodo de Macor visto na Figura 17. Veja que a alta temperatura não está mais concentrada na região da câmara de ionização, o que poderia começar a afetar os materiais em torno desta região, como, por exemplo, a antena de RF que possui uma fina camada de esmalte sobre a bobina de cobre.

Figura 20 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo de 60 Watts (Shapal)



Nota-se que a tonalidade mais avermelhada apresentou uma distribuição mais uniforme sobre o dispositivo, indicando uma maior homogeneidade térmica. Esse comportamento é atribuído à elevada condutividade térmica do material Shapal utilizado, que é de $55 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Essa condutividade térmica é aproximadamente 35 vezes superior à do material Macor, que possui uma condutividade térmica significativamente menor de $1,56 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Essa diferença de propriedades térmicas destaca a eficiência do Shapal na dissipação de calor, contribuindo para uma distribuição mais uniforme da temperatura ao longo da estrutura. Essa característica é particularmente relevante em aplicações que demandam alta estabilidade térmica, reduzindo gradientes térmicos que poderiam comprometer o desempenho do dispositivo.

Com o objetivo de comparar as temperaturas mínimas e máximas de ambos os materiais, foi elaborada a Tabela 10. Essa tabela apresenta dados numéricos que permitem uma análise mais detalhada e comparativa das simulações térmicas do Shapal e do Macor. Através destes dados, pode-se analisar as informações obtidas e fazer um comparativo dos materiais de forma clara, facilitando a avaliação de uma futura implementação para um novo protótipo.

Tabela 10 – Simulação 3D de Temperatura do Cátodo (Macor vs Shapal)

Material	Potência [W]	Mínima [°C]	Máxima [°C]
Macor	30	242,73	380,35
Macor	60	300,63	546,23
Shapal	30	258,20	317,06
Shapal	60	324,58	427,72

A Tabela 11 ilustra a diferença entre as temperaturas mínimas e máximas dos materiais Macor e Shapal para o cátodo operando a 30 e 60 Watts. Em particular, observa-se uma discrepância significativa na temperatura máxima dos materiais a 60 Watts, com uma diferença impressionante de aproximadamente $118,51 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 11 – Diferença na Temperatura do Cátodo (Macor vs Shapal)

Potência [W]	Diferença Mínima [°C]	Diferença Máxima [°C]
30	15,47	63,29
60	23,95	118,51

O estudo de simulação térmica do novo material revela parâmetros críticos que são essenciais para sua implementação em um novo protótipo. Como discutido anteriormente, ao operar em potências elevadas, a temperatura se torna um fator determinante na construção do cátodo. Portanto, é fundamental considerar as características térmicas do material analisado ao desenvolver um novo protótipo. A inclusão desses dados permite uma avaliação precisa do comportamento do material sob condições extremas, garantindo um desempenho otimizado e aumentando a confiabilidade do cátodo em aplicações de alta potência.

Parte V

Simulação Eletromagnética (SW COMSOL)

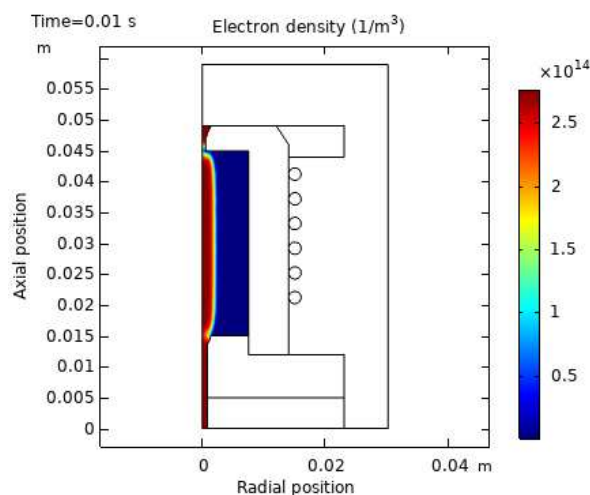
5 Elétrons, Potencial Elétrico e Fluxo Magnético

Para sistemas de cátodos de plasma, diversas técnicas de geração de plasma podem ser empregadas, como plasma de radiofrequência acoplado capacitivo (CCP) (WEIS *et al.*, 2005), plasma acoplado indutivamente (ICP) (HATAKEYAMA *et al.*, 2007), micro-ondas (FOSTER; WILLIAMS; PATTERSON, 2007; WEATHERFORD; FOSTER; KAMHAWI, 2011) e ondas helicon (LONGMIER; HERSHKOWITZ, 2005). Esse sistema utiliza um plasma acoplado indutivamente (ICP) e opera com base em dois mecanismos principais: a produção de plasma e a extração de elétrons pelo eletrodo frontal (CELIK; KURT, 2018b; JAHANBAKHSI; CELIK, 2015). Uma vantagem dos cátodos de plasma é sua capacidade de ativação muito mais rápida em comparação aos cátodos ocos, que necessitam do pré-aquecimento do material emissor termiônico a altas temperaturas (WEATHERFORD, 2011). Nos sistemas de cátodo de plasma, o gás propelente é ionizado dentro de uma pequena câmara, e os elétrons são extraídos através de uma abertura em uma das paredes da câmara (OKS; SCHANIN, 1999).

5.1 Distribuição da Densidade de Elétrons

Conforme ilustrado na Figura 21, que apresenta a densidade de elétrons, observa-se que os elétrons estão concentrados no centro do cátodo. Isso ocorre porque as extremidades do cátodo são carregadas negativamente, confinando os elétrons no centro e facilitando sua liberação. As equações que regem a simulação para a determinação da densidade de elétrons estão apresentadas nas Eqs. 5.1 e 5.2 (JAHANBAKHSI; CELIK, 2014).

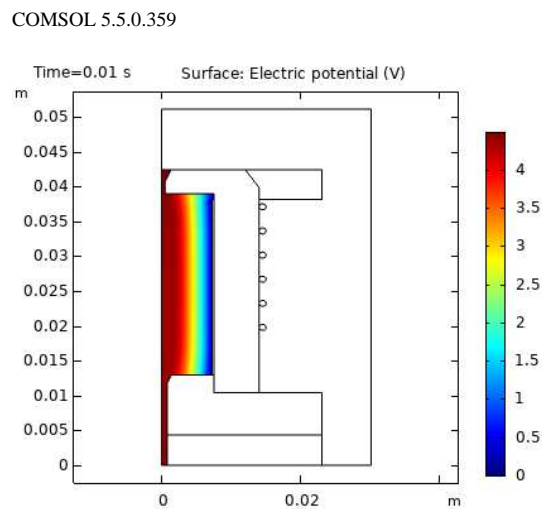
Figura 21 – Densidade de Elétrons do Cátodo de RF



5.2 Distribuição do Potencial Elétrico

A Figura 22 ilustra a distribuição do potencial elétrico. Observa-se um potencial mais elevado no centro do cátodo, o que confirma o confinamento dos elétrons nessa região, enquanto os íons tendem a se concentrar próximos às extremidades do cátodo. A equação que governa a simulação para o cálculo do potencial elétrico está apresentada na Eq. 5.3 (MULTIPHYSICS, 2019).

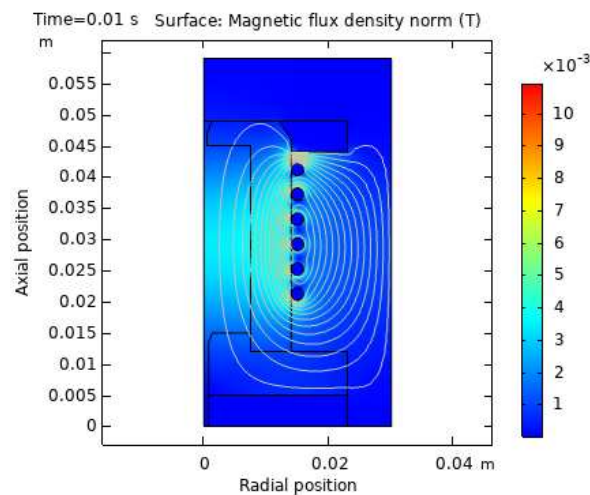
Figura 22 – Potencial Elétrico do Cátodo de RF



5.3 Distribuição da Densidade do Fluxo Magnético

A Figura 23 apresenta a densidade do fluxo magnético. Esse fluxo magnético induz correntes no plasma, o que auxilia na ionização do gás propelente e no confinamento do plasma na região central. A interação entre o campo magnético e o plasma contribui para a estabilidade do processo de extração de elétrons e o desempenho geral do cátodo.

Figura 23 – Fluxo Magnético do Cátodo de RF



As equações citadas anteriormente foram utilizadas para modelar o problema da simulação numérica realizada, as mesma são apresentadas a seguir:

5.3.1 Equação da Continuidade para os Elétrons

Representa a conservação das partículas de elétrons, relacionando a variação da densidade de elétrons com o fluxo de elétrons e os termos de fonte ou perda.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \mathbf{u}_e) = S_e \quad (5.1)$$

5.3.2 Equação de Balanço de Momento para Elétrons

Descreve a velocidade dos elétrons como uma função das forças atuantes, incluindo os efeitos do campo elétrico e a difusão térmica.

$$n_e \mathbf{u}_e = \frac{-en_e}{m_e \bar{\nu}_m} \mathbf{E} - \frac{K_B}{m_e \bar{\nu}_m} \nabla \cdot (n_e \mathbf{T}_e) \quad (5.2)$$

5.3.3 Definição de Campo Elétrico

Relaciona o campo elétrico ao gradiente do potencial elétrico, sendo um princípio fundamental no eletromagnetismo.

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (5.3)$$

Portanto, analisando as Eqs. 5.1, 5.2 e 5.3, tem-se seus termos e suas respectivas unidades descritos como:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_e : \text{Densidade de elétrons [m}^{-3}\text{];} \\ u_e : \text{Velocidade do fluido neutro [m/s];} \\ S_e : \text{Perda ou ganho de energia pelos elétrons} \\ \quad \text{devido a colisões inelásticas [m}^{-3}\text{s}^{-1}\text{];} \\ m_e : \text{Massa do elétron [kg];} \\ e : \text{Carga do elétron [C];} \\ \bar{\nu}_m : \text{Frequência média de colisões [s}^{-1}\text{];} \\ E : \text{Campo elétrico [V/m];} \\ K_B : \text{Constante de Boltzmann [J/K];} \\ T_e : \text{Temperatura dos elétrons [K];} \\ V : \text{Potencial elétrico [V].} \end{array} \right.$$

Assim, essas equações descrevem o comportamento dos elétrons em um plasma, especificamente relacionando a densidade de elétrons, a velocidade do fluido neutro, o campo elétrico e a temperatura dos elétrons. A Eq. 5.1 expressa a conservação das partículas de elétrons no sistema. A variação temporal da densidade de elétrons, n_e , é influenciada pelo fluxo de elétrons, $n_e \mathbf{u}_e$, e por uma fonte ou perda de elétrons, S_e (correspondente a processos como colisões inelásticas, que podem resultar em ganho ou perda de energia).

A Eq. 5.2 descreve a velocidade dos elétrons, u_e , em função das forças atuantes. O primeiro termo representa a contribuição da força elétrica (\mathbf{E}), enquanto o segundo termo descreve o efeito da difusão térmica dos elétrons, ou seja, a influência do gradiente de temperatura dos elétrons, $\nabla \cdot (n_e \mathbf{T}_e)$, sobre sua velocidade.

A Eq. 5.3 é a definição clássica do campo elétrico, \mathbf{E} , como o gradiente do potencial elétrico, V . Em outras palavras, o campo elétrico é gerado por variações espaciais no potencial elétrico.

Essas equações estão relacionadas à dinâmica dos elétrons em um plasma, onde a equação de continuidade mostra como a densidade de elétrons varia no tempo e no espaço, enquanto a segunda equação descreve a velocidade dos elétrons influenciada por forças elétricas e térmicas. O campo elétrico, por sua vez, é dado pelo gradiente do potencial elétrico. Essas equações são típicas de modelos de transporte em plasmas, comumente aplicadas em fenômenos como propulsão elétrica ou descargas em gases.

Com base nos resultados da simulação, foi observado que a densidade de corrente emitida está na ordem de 10^4 A/m². Esse resultado traz informações valiosas quanto a performance do dispositivo nas simulações.

As principais condições para a realização das simulações foram definidas da seguinte forma: elas foram configuradas para gerar um *Inductively Coupled Plasma* (ICP), uma vez que, para a geometria cilíndrica do cátodo, esse tipo de acoplamento se mostra mais eficiente (CHABERT; BRAITHWAITE, 2011). Além disso, foi considerada uma potência de entrada de 30 W. Esses foram alguns dos principais parâmetros adotados para a geração das simulações.

Parte VI

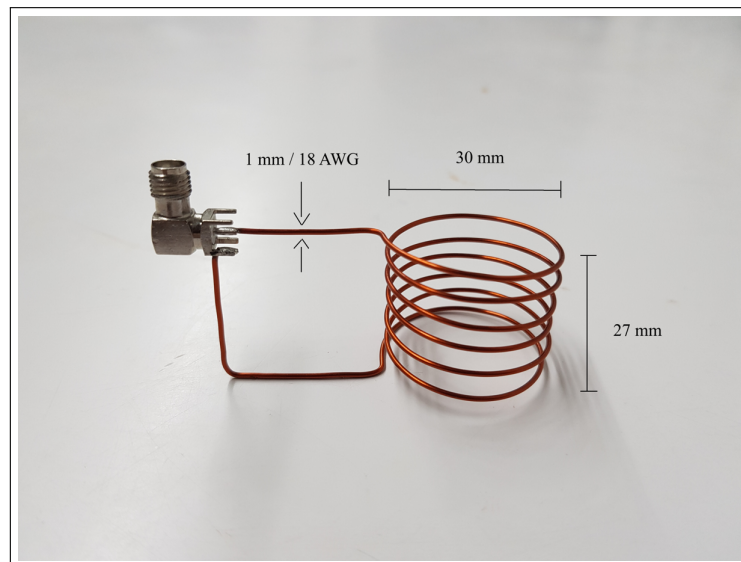
Teste do Cátodo na Câmara de Vácuo

6 Performance do Cátodo em Vácuo

6.1 Montagem da Antena de RF em Vácuo

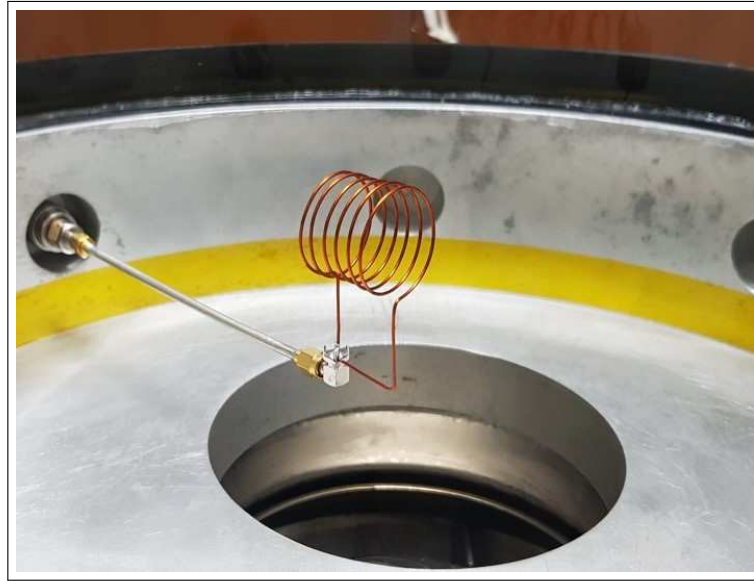
O primeiro teste prático a ser realizado antes de testar o cátodo de radiofrequência como um todo é testar a antena de RF. É importante calibrar a antena para que a mesma seja capaz de ionizar o gás no interior da câmara de geração de plasma corretamente. Fatores determinantes para definir a performance da bobina são determinados através da sua frequência de funcionamento e a potência aplicada a mesma. As dimensões da antena estão disponíveis na Figura 24 (Antena Física de Radiofrequência).

Figura 24 – Antena Física de Radiofrequência



A Figura 25 (Antena de RF do Cátodo em Vácuo - Campânula) expõe a antena experimental desenvolvida para o cátodo. Essa antena está inserida dentro da câmara de vácuo (Campânula) para testes de frequência, potência e resistência. Nas extremidades da bobina observa-se uma conexão feita através de um conector do tipo SMA, específico para trabalhar com radiofrequência em ambientes de baixa pressão.

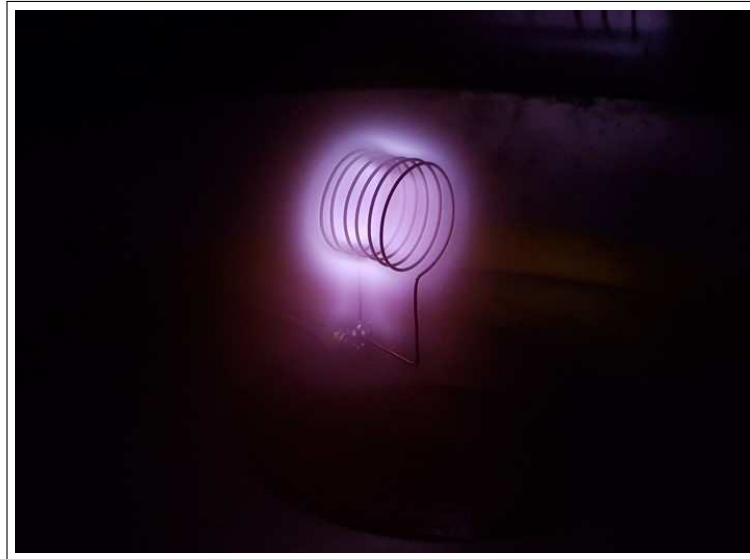
Figura 25 – Antena de RF do Cátodo em Vácuo (Campânula)



6.2 Antena de Radiofrequência em Vácuo

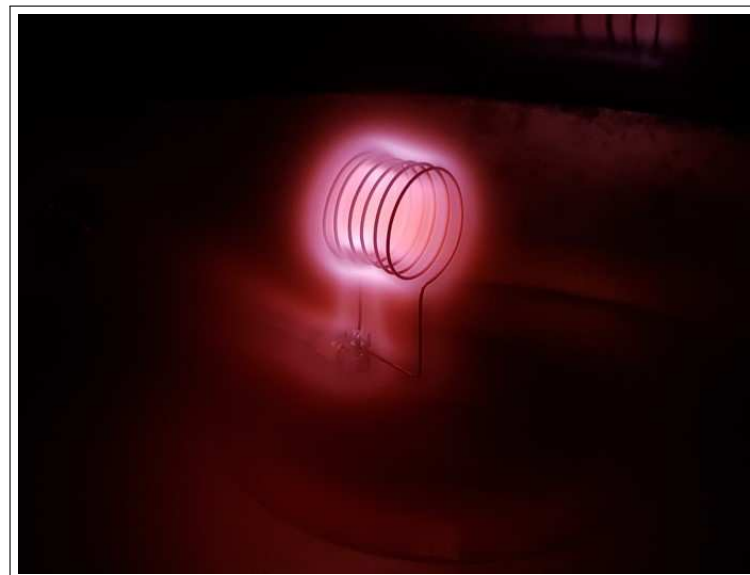
Na Figura 25 é possível vislumbrar que a antena já está posicionada, geometricamente, na posição horizontal, cuja qual será a mesma posição do cátodo de plasma. Essa antena varre frequências, aproximadamente, entre 14,00 e 17,56 MHz. No entanto, seu pico de eficiência gira em torno dos 16,56 MHz. Dado que a antena comportou-se melhor nessa faixa, essa foi a faixa escolhida para testá-la. Vale ressaltar que essa é uma bobina de seis voltas. A potência será explorada posteriormente para demonstrar a performance do sistema em funcionamento como os testes mostrados nas imagens posteriores conduzidos dentro da câmara de vácuo.

Como dito anteriormente, os testes foram realizados aplicando a frequência de pico da antena. O gás que é ionizado em torno da antena é o argônio (Ar), onde tem-se a formação do plasma entorno da mesma. A Figura 26 (Antena de RF em Vácuo de 10 Watts - **CubeSats**) mostra a antena em operação para uma frequência de 16,56 MHz e uma potência de 10 Watts aplicada, convencional para *CubeSats*.

Figura 26 – Antena de RF em Vácuo de 10 Watts (*CubeSats*)

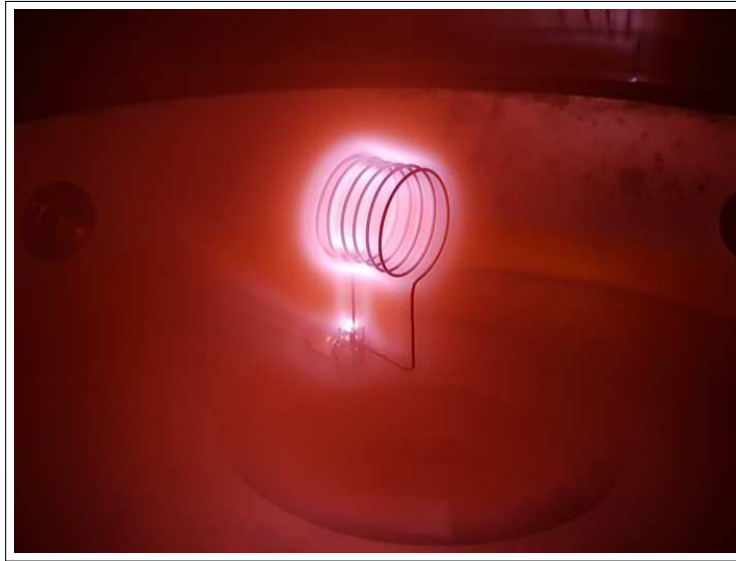
O segundo teste determina se a antena é capaz de acionar um propulsor. Nesse teste contemplá-se um intensidade maior do plasma formado em torno da bobina. Para uma mesma frequência aplicada e uma potência de 30 Watts, ideal para acionar um propulsor do tipo Hall, tem-se que a Figura 27 (Antena de RF em Vácuo de 30 Watts) vislumbra em detalhes os efeitos:

Figura 27 – Antena de RF em Vácuo de 30 Watts



O terceiro e último teste da antena de radiofrequência mantém a frequência aplicada, no entanto dobra-se a potência aplicada em relação ao segundo teste, Figura 27 (Antena de RF em Vácuo de 30 Watts). Nesse teste aplica-se uma potência de 60 Watts. A Figura 28 (Antena de RF em Vácuo de 60 Watts) demonstra a possibilidade se utilizar uma potência aplicada elevada no cátodo de plasma.

Figura 28 – Antena de RF em Vácuo de 60 Watts

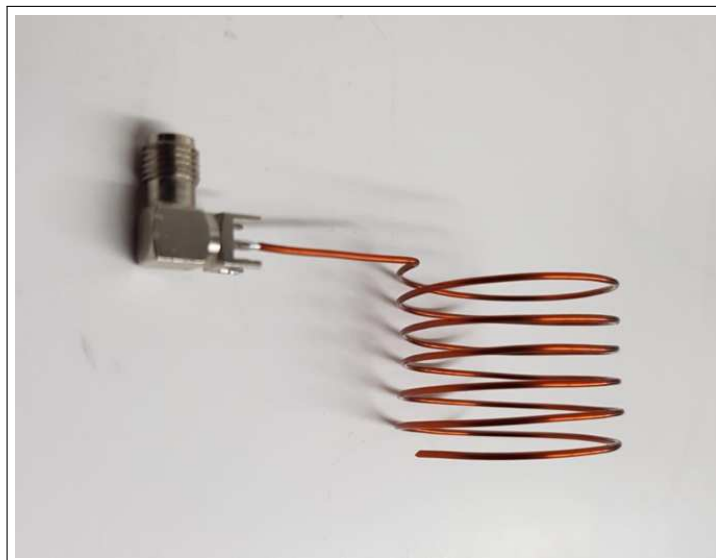


Ainda na Figura 28, vislumbra-se a intensidade do plasma bem concentrada em torno do forma helicoidal da antena. Vale ressaltar que esse último teste traz informações para a possibilidade desse cátodo ser utilizado em satélites de grande porte. Testes complementares serão realizados futuramente.

6.2.1 Antena de RF Adaptada para o Sistema Disponível

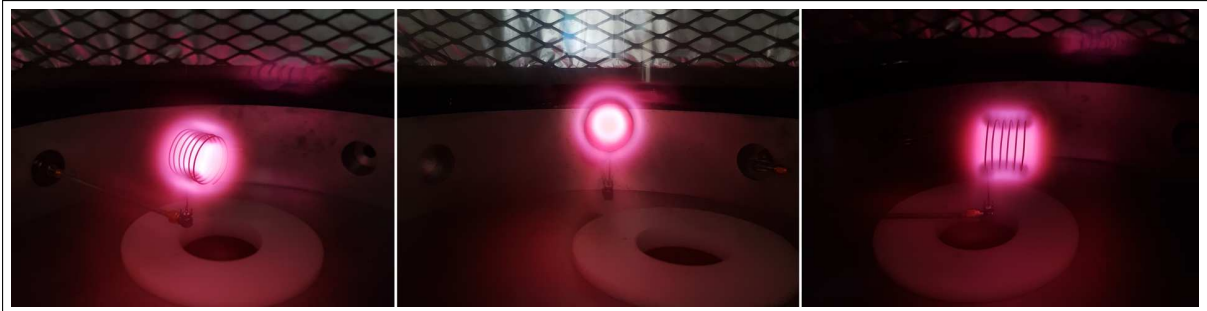
Como objetivo de fazer uma investigação inicial do cátodo de RF, sua antena foi adaptada para se adequar ao sistema disponível. As alterações foram meticulosamente realizados de modo a se adaptar ao casador de impedâncias desenvolvido, provisoriamente, no LFP. Após retirar uma parcela do fio esmaltado e deixar apenas um conexão central entre a antena e seu conector SMA, tem-se a geometria adaptada (Figura 29):

Figura 29 – Antena Física de Radiofrequência Adaptada



A antena adaptada foi testada em baixo vácuo, em torno de 10^{-2} Torr e uma potência real (P_R) de 4 Watts aplicada. Perceba que as três imagens demonstram um densidade intensa do plasma confinado no interior da geometria helicoidal da antena. Este fator deve se ao fator haver um pequeno campo magnético gerado através da antena. A terceira imagem (vista lateral) mostra a formação de um pequena garrafa magnética, como visto na literatura (CHEN, 2015).

Figura 30 – Antena de RF Adaptada em Testes



O teste realizado com a antena foi apenas um ensaio para testar sua capacidade frente ao sistema. Posteriormente, será iniciado os testes com a antena em torno da câmara de plasmas do cátodo. Vale a pena ressaltar que a intensidade do plasma vista nas imagens deve-se ao fato do baixo vácuo, os teste serão realizados em alto vácuo.

6.3 Montagem do Cátodo Dentro da Câmara de Vácuo

Após a montagem do dispositivo (cátodo), ele foi fixado a suporte de alumínio para ser encaixado na câmara de testes. As Figuras 31 (Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (A)) e 32 (Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (B)) expõem a fixação final no suporte de testes para o vácuo.

Figura 31 – Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (A)

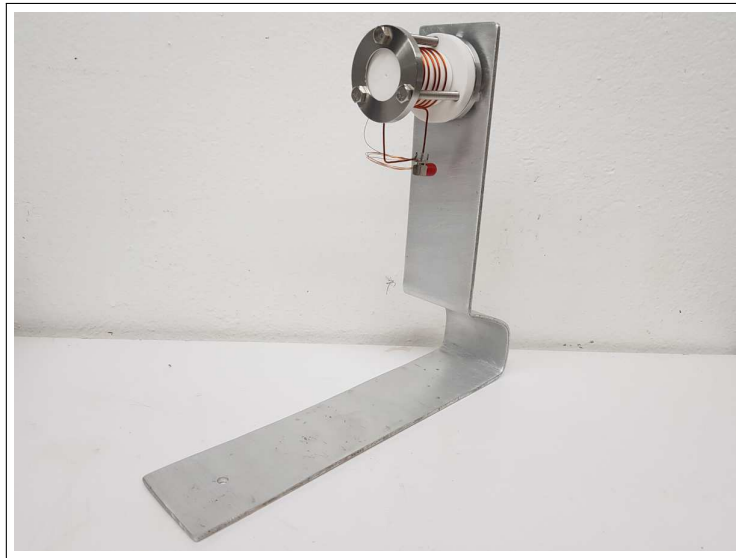
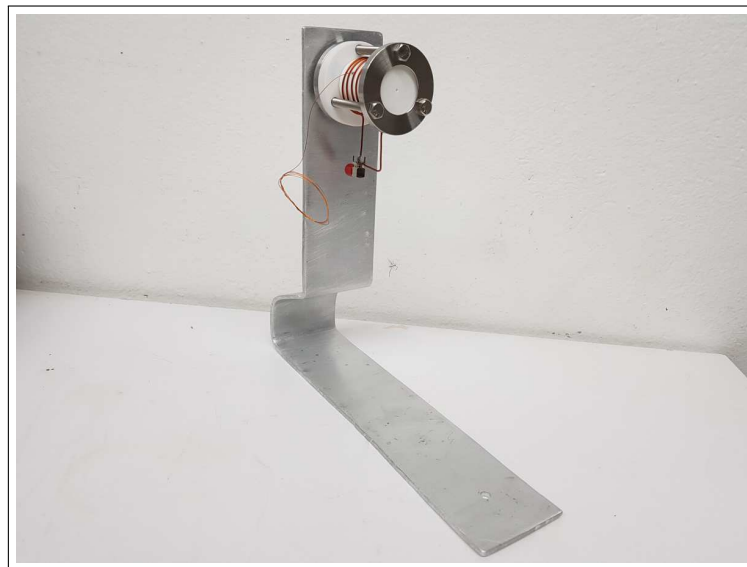
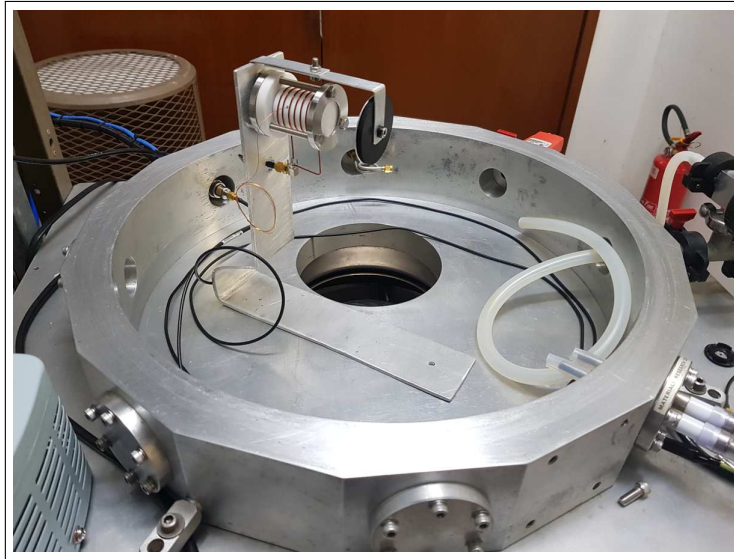


Figura 32 – Cátodo Experimental Fixado no Suporte de Testes (B)



Na figura abaixo, Figura 33, o dispositivo, que foi fixado juntamente com seu suporte, está inserido na base da câmara de vácuo (Campânula). É possível observar que as conexões necessários para o funcionamento do sistema estão parcialmente preparadas e conectadas. Já é possível observar a antena de RF conectada ao sistema através de sua conexão SMA. Também é possível visualizar um “buraco” circular por onde as bombas mecânica e difusora possibilitarão a redução da pressão interna criando um ambiente de baixa pressão muito próximo ao espaço. Atente-se que a câmara ainda não foi selada.

Figura 33 – Cátodo Experimental em Sistema de Teste Aberto



Na Figura 34, o sistema está completamente montado e preparados para os testes. Consegue-se visualizar que além da antena conectada, tem-se o extrator de elétrons (logo a frente do cátodo) e o extrator de íons que já foram conectados ao sistema. É possível visualizar a saída dos mesmos através de uma flange na lateral direita da imagem. A mangueira de silico que fornecerá a passagem para o fluxo de fluido também já está conectada através do conector hermético. Além disso, a tampa para proteger as bombas já foi inserida e a câmara foi completamente selada da atmosfera externa.

Figura 34 – Cátodo Experimental em Sistema de Testes Fechado



6.4 Cátodo de RF em Testes Dentro da Campânula

Na figura a seguir, Figura 35, o circuito do cátodo, dentro do sistema, já está ligado e com dispositivo já em modo de testes. Nessa imagem, os parâmetros estão setados de maneira em que serão apresentados em tabela. A Tabela 12 a seguir, logo antes da imagem citada, mostra os detalhes:

Tabela 12 – Entradas Setadas para o Sistema de Testes em Vácuo

Aparelhos	Parâmetros
Pirani / Penning	$10^{-1} - 10^{-5}$ [Torr]
Fonte de Tensão DC	32 [V]
Fonte de RF (P_1)	60 [W] (Não-refletida)
Fonte de RF (P_2)	0 [W] (Refletida)
Fonte de RF (P_R)	60 [W] (Potência real)
Medidor de Fluxo (Ar)	0,00 - 10,00 [sccm]

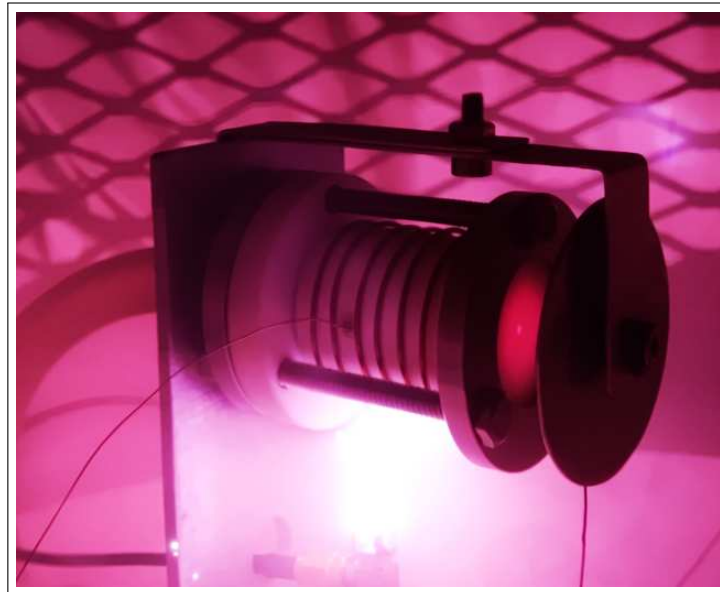
Figura 35 – Cátodo Experimental em Testes



Nessa foto o sistema está preparado para testes. Inicialmente decidiu-se variar os parâmetros setados, como mostrado na Tabela 12 anterior, para testar as capacidades do sistema. Aqui notou-se que o sistema tinha capacidade parcial de testar o protótipo do cátodo. O circuito testado demonstrou-se utilizável para a realização de testes que permitem o cátodo operar em condições mínimas.

Na imagem anterior, Figura 35, já era possível observar a formação do plasma dentro da Campânula, ao redor da câmara de geração de plasma. Na Figura 36, a ionização do argônio em torno da antena e da câmara está mais evidente. Isso se deve à redução da luz ambiente e ao enquadramento mais preciso do cátodo no foco da câmera, resultando em uma visualização mais clara.

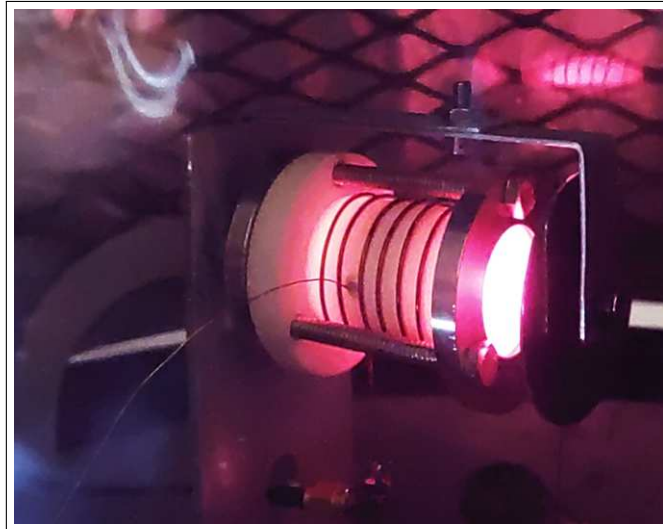
Figura 36 – Formação de Plasma em Torno da Câmara e no Interior



Este efeito ocorre porque há gás dentro da câmara de vácuo que passa pelo interior do cátodo antes do acionamento do gerador de RF. Quando o plasma é gerado no interior da câmara de plasma, ele se ioniza completamente, fazendo com que o efeito visível ao redor da câmara desapareça, uma vez que o gás foi ionizado e o restante foi removido pelas bombas de vácuo.

Na figura 37, logo abaixo, é possível notar que o fenômeno visto anteriormente não está mais presente. Agora, apenas o argônio ionizado dentro da câmara é visto. Veja como o material da câmara, macor, deixa a luz atravessá-lo parcialmente. Note que na parte frontal do cátodo há um brilho intenso cujo qual o fluxo de elétrons é contínuo pelo orifício de 1 mm. O fluxo é causado devido ao eletrodo na parte frontal com potencial positivo aplicado sobre o mesmo de 32 V.

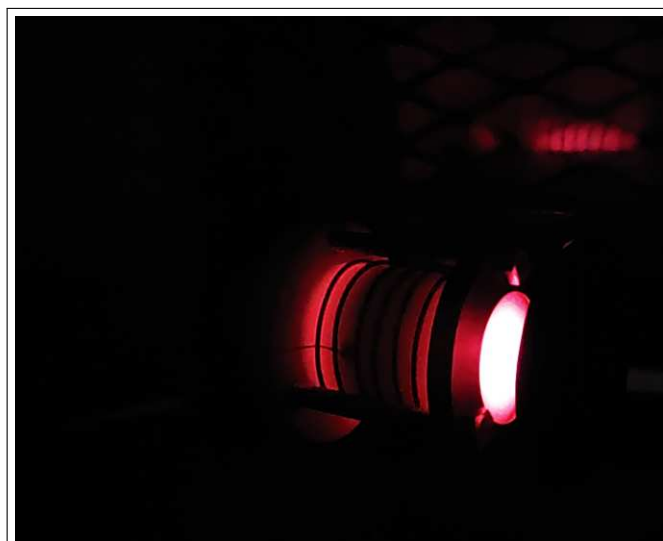
Figura 37 – Primeiro Teste do Cátodo de RF em Vácuo



Ao fundo da imagen também é visto um brilho devido a transparência do macor ao plasma e suas paredes finas de cerca de 6 mm. Na região central da câmara esse brilho não é visto devido ao extrator de íons estar posicionado naquela região (eletrodo de cobre). No entanto, existe uma pequena abertura nesse eletrodo que permite essa passagem da luz, o mesmo é perceptível com o reflexo do vidro da câmara de vácuo, logo ao fundo da imagem.

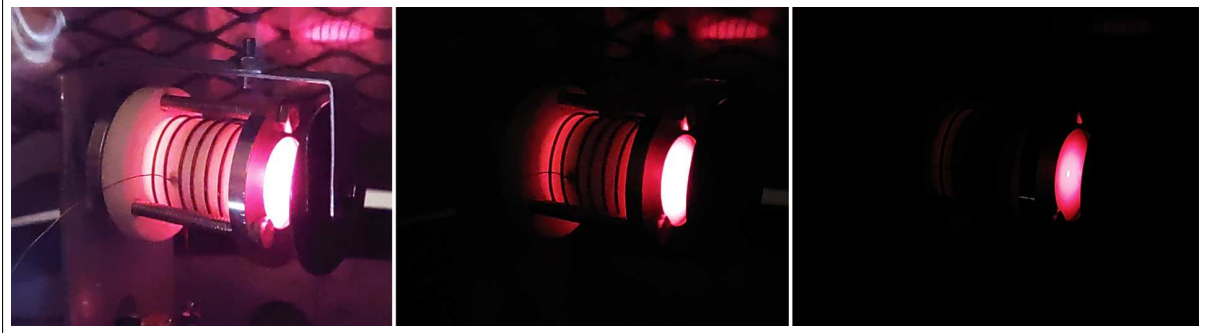
Nesta imagem, Figura 38, o cátodo está completamente setado para medir dados que definirão sua performance. Com esta configuração, foi possível operar o cátodo com seis fluxos de massa alvo. Além disso, o plasma está completamente centrado dentro da câmara de ionização, o que demonstra nenhum vazamento de gás através dos dois o-rings em sua base ou de seu conector hemético.

Figura 38 – Cátodo de RF em Pleno Funcionamento



A Figura 39 é essencial para comparar lado a lado o cátodo em diferentes condições de luminosidade ambiente. Esta variação na luminosidade local, desde a iluminação total até apenas a luminosidade emitida pelo próprio cátodo, oferece uma visualização aprimorada da localização exata dos componentes montados ao redor do dispositivo.

Figura 39 – Cátodo em Testes com Variações na Luminosidade do Ambiente

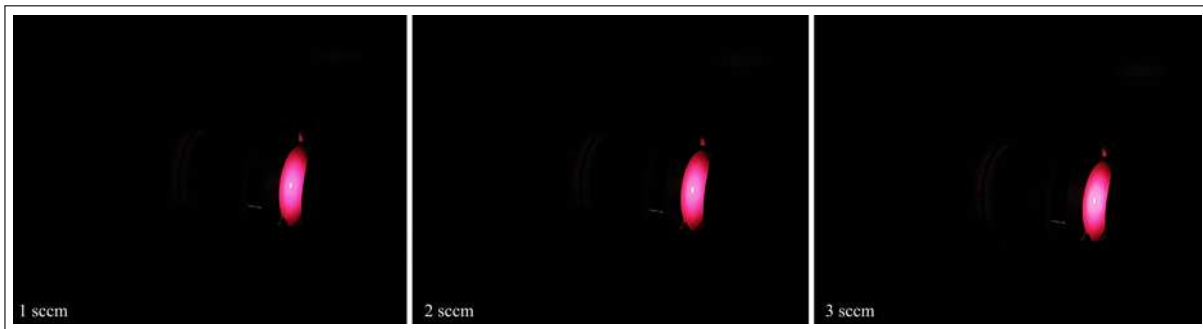


Essa análise visual detalhada permite identificar com precisão a posição dos dispositivos, facilitando a interpretação dos dados coletados e a análise do desempenho do cátodo sob condições variáveis de iluminação. Além disso, compreender como a luminosidade ambiente influencia a visualização dos componentes críticos e a emissão do cátodo pode ser fundamental para futuras otimizações do sistema, visando melhorar a precisão das medições e o desempenho global do dispositivo em diferentes ambientes operacionais.

A figura também serve para ilustrar a robustez do cátodo em manter sua funcionalidade mesmo com mudanças significativas na luminosidade externa, o que é crucial para garantir a consistência dos experimentos e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para fins de comparação entre seis fluxos de massa, mencionados anteriormente, a Figura 40 mostra três imagens, lado a lado, do cátodo de RF com diferentes vazões. Veja que a medida que o fluxo aumenta (1, 2 e 3 sccm) o brilho no orifício do dispositivo aumenta. Este efeito lembra muito o cátodo oco que tem aparência similar a vista nas imagens.

Figura 40 – Brilho Emitido pelo Fluxo de Elétrons em 1, 2 e 3 sccm



Aumentando ainda mais o fluxo de argônio no interior da câmara de ionização (4, 5 e 6 sccm), Figura 41, note que o brilho se torna bastante intenso, a coloração branca quase toma de conta da parte frontal do cátodo. Esta tonalidade esbranquiçada é advinda dos elétrons que estão sendo atraídos do interior da câmara para o eletrodo carregado com 32 V logo à frente. Perceba que a maior tonalidade advém da figura com fluxo mássico igual a 6 sccm.

O efeito visto ao aumentar o fluxo não tem nenhuma relação direta com a corrente medida, mas pode estar ocasionando um outro fenômeno que não foi notado nos experimentos. Pretende-se investigá-lo, futuramente, com equipamentos de medida mais sofisticados.

Figura 41 – Brilho Emitido pelo Fluxo de Elétrons em 4, 5 e 6 sccm



A uma pressão de 10^{-5} Torr e uma potência de 60 W constantes, foi possível extrair alguns dados importantes referentes a performance do cátodo. A Tabela 13 traz uma relação quanto ao fluxo aplicado e a corrente extraída. A corrente extraída foi diretamente medida através do eletrodo frontal com a ajuda de um multímetro. Da teoria de circuitos básicos,

abre-se o circuito para poder medir a corrente que passa pelo mesmo, o multímetro setado para medir em [mA] torna-se parte do sistema em testes.

Tabela 13 – Corrente Extraída para Fluxos Distintos

Fluxo de Massa (\dot{m}) [sccm]	Corrente Extraída [mA]
1,00	0,088
2,00	0,087
3,00	0,087
4,00	0,091
5,00	0,083
6,00	0,085

Observa-se, a partir da tabela anterior, que a corrente máxima extraída foi de 0,091 mA para um fluxo de 4 sccm. Este valor está dentro da faixa típica de operação de um cátodo oco. No entanto, a corrente extraída é significativamente inferior à corrente de 1 A esperada na concepção deste trabalho. Esse desempenho limitado deve-se, em parte, às restrições do casador de impedâncias utilizado, o qual não é otimizado para o cátodo em questão, mas ainda assim possibilitou um teste inicial que valida o embasamento teórico do estudo.

Dado o sucesso preliminar no desenvolvimento do dispositivo, planeja-se seu aperfeiçoamento para futuras experimentações. Um casador de impedâncias ideal está em desenvolvimento, visando otimizar a performance do cátodo de RF. A meta é variar os parâmetros de desempenho e medi-los com precisão aprimorada, o que poderá proporcionar uma análise mais detalhada e confiável do comportamento do dispositivo em condições operacionais variadas.

Adicionalmente, investigações futuras podem explorar a otimização dos materiais do cátodo e melhorias no controle dos equipamentos de medida, com o objetivo de alcançar um desempenho mais próximo do esperado, melhorando assim a eficiência e a aplicação prática do dispositivo.

6.5 Equações de Performance do Cátodo

É imperativo que o cátodo de radiofrequência opere com alta eficiência em termos de consumo de gás e energia, considerando as restrições impostas pela massa do propelente e pela energia elétrica disponível em operações no espaço extraterrestre. Para avaliar adequadamente a eficiência da operação do cátodo, são introduzidos o conceito de fator de utilização do gás e o custo de extração dos elétrons, assim como definido pelos artigos de referência (HATAKEYAMA et al., 2007) e (SMIRNOV et al., 2019).

6.5.1 Equação do Custo de Extração dos Elétrons

O custo de extração de elétrons é conceituado como a quantidade de energia elétrica exigida para a produção e extração do plasma por 1 Ampère de corrente de elétrons, conforme expresso na seguinte equação:

$$C = V + \frac{P}{I} \quad [W/A] \quad (6.1)$$

Os termos da Equação (6.1) e suas respectivas unidades de medida são definidos como:

$$\left\{ \begin{array}{l} C : \text{Custo de Extração de Elétrons;} \\ V : \text{Tensão Alvo [V];} \\ P : \text{Potência de Entrada de RF [W];} \\ I : \text{Corrente de Elétrons Extraída do Extrator de Elétrons - Alvo [A].} \end{array} \right.$$

6.5.2 Equação do Fator de Utilização do Gás

A inserção de 1 sccm de argônio no sistema é equivalente a uma corrente elétrica de 0,088 mA/sccm (por unidade de massa). O fator de utilização do gás é elaborado para quantificar o número médio de vezes que cada átomo de argônio passa pelo processo de ionização e recombinação na superfície do extrator de íons durante sua permanência na câmara de geração de plasma. Essa métrica é definida com a seguinte formulação:

$$U = \frac{I}{k \cdot \dot{m}} \quad [Adimensional] \quad (6.2)$$

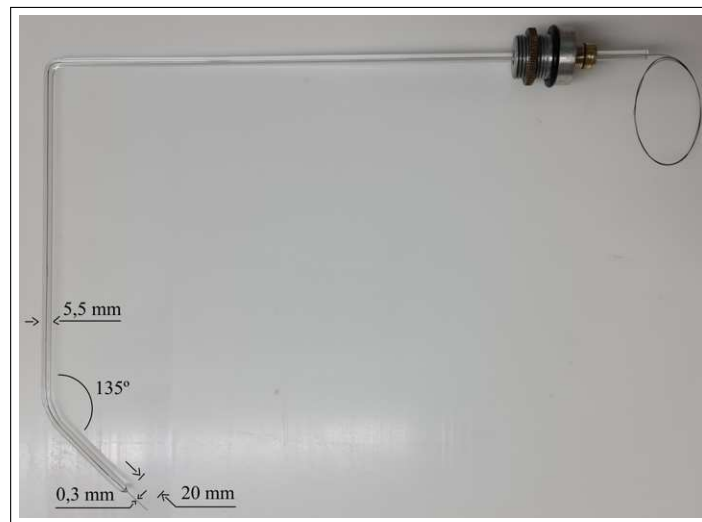
Os termos presentes na Equação (6.2) e suas respectivas unidades de medida são definidos da seguinte maneira:

$$\left\{ \begin{array}{l} U : \text{Fator de Utilização do Gás;} \\ I : \text{Corrente de Elétrons Extraída do Extrator de Elétrons (Alvo) [mA];} \\ k : \text{Equivalência de 1 sccm em corrente elétrica [mA/sccm];} \\ \dot{m} : \text{Taxa de Fluxo de Massa [sccm].} \end{array} \right.$$

6.6 Curva Característica de Langmuir do Cátodo de RF (CCP)

Para analisar os parâmetros do plasma gerado dentro da câmara de ionização na configuração *Capacitively Coupled Plasma* (CCP), utilizou-se uma sonda de Langmuir projetada especificamente para o cátodo de plasma. As dimensões físicas da sonda, bem como sua estrutura, são apresentadas na Figura 42. Essa configuração permite a obtenção da curva característica de Langmuir, possibilitando a extração de parâmetros fundamentais do plasma.

Figura 42 – Sonda de Langmuir para o Cátodo de RF



A área de exposição da ponta da sonda foi determinada a partir da equação da área de um cilindro (A_s), considerando uma única face exposta. O valor calculado para essa área é de aproximadamente $1,89 \cdot 10^{-5} m^2$ dada pela Equação 6.3 a seguir.

6.6.1 Equação da Superfície do Cilindro (Face Única)

$$A_s = 2\pi r h + \pi r^2 \quad (6.3)$$

Cujo os termos são descritos como:

$$\begin{cases} r : & \text{Raio do fio de tungstênio [m];} \\ h : & \text{Comprimento do fio exposto ao plasma [m].} \end{cases}$$

A sonda de Langmuir desenvolvida neste trabalho consiste em uma haste cilíndrica de vidro, cujo interior se encontra um filamento de tungstênio que se estende de ponta a ponta. A haste contendo o filamento foi acoplada a uma flange metálica, permitindo ajustes angulares de 360° em relação ao seu eixo e deslocamento axial dentro da câmara de vácuo. Para garantir a vedação e a estabilidade estrutural da sonda, o conjunto foi

selado e moldado utilizando um maçarico portátil, assegurando a integridade do sistema durante as medições.

As imagens da Figura 43 mostram a sonda de Langmuir posicionada axialmente em relação ao corpo do dispositivo, inserida pelo orifício de saída dos elétrons na parte frontal. Observa-se que o dispositivo já está integrado ao propulsor de efeito Hall (PHall) do LFP, ocupando a mesma posição anteriormente destinada ao cátodo oco.

Figura 43 – Localização Axial da Sonda de Langmuir no Cátodo de RF



Após a construção da sonda, foi montado o sistema de aquisição de dados do plasma, visando garantir medições precisas e confiáveis. Para minimizar a interferência da radiofrequência (RF) na sonda, foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 14. Além disso, utilizou-se um resistor de Shunt de $1\text{ k}\Omega$ para medir a queda de tensão e registrar os dados com maior precisão. Esse resistor permitiu a conversão da corrente detectada em uma diferença de potencial mensurável, contribuindo para a exatidão dos valores obtidos.

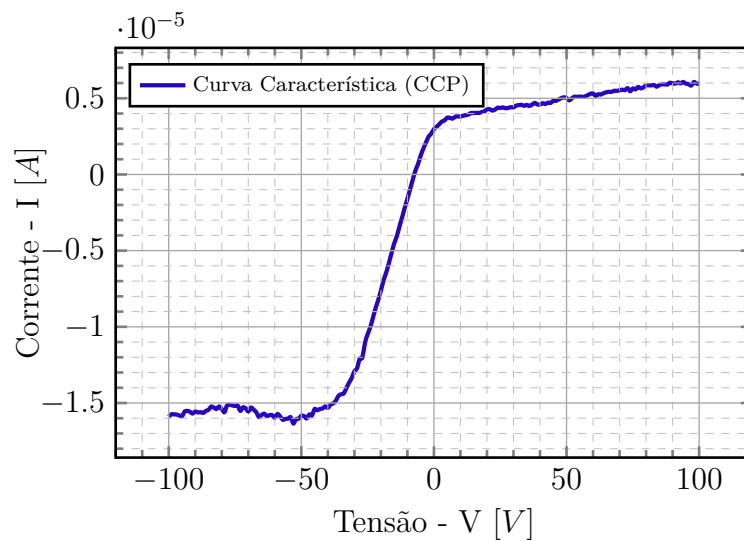
Tabela 14 – Sonda de Langmuir: Parâmetros de Entrada

Parâmetros do Plasma	Resultados	Unidades
Potência Aplicada (P_R)	10	[W]
Fluxo de Massa (\dot{m})	4,00	[sccm]
Pressão de Fundo (P)	10^{-5}	[Torr]
Tensão de Varredura (V)	-100 a 100	[V]

A presença da radiofrequência pode introduzir ruídos parasitas nas medições da sonda de Langmuir, dificultando a interpretação dos dados. Esse efeito ocorre devido à indução eletromagnética no circuito da sonda, que pode gerar oscilações indesejadas na leitura da corrente e da tensão. Para mitigar esses efeitos, além da escolha adequada dos parâmetros operacionais, foram adotadas estratégias como blindagem eletromagnética através da própria câmara de vácuo e um distanciamento entre a sonda e a antena helicoidal geradora de plasma. Essas precauções foram essenciais para garantir que as medições refletissem, de forma fidedigna, as características reais do plasma, sem distorções induzidas pela RF do sistema.

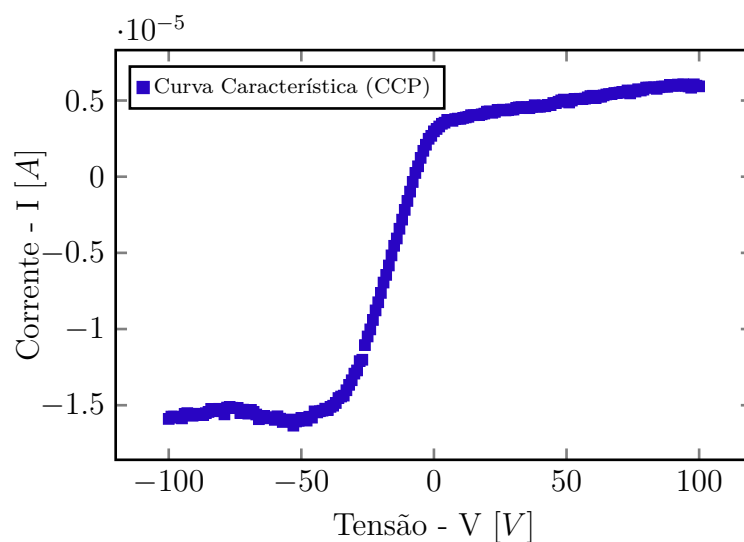
Após a análise dos dados experimentais, foi gerado um gráfico de tensão em função da corrente. Segundo a literatura (CHEN, 2015), esse tipo de gráfico é conhecido como curva característica do plasma ou curva de Langmuir. Esse gráfico desempenha um papel fundamental na identificação do gás ionizado dentro da câmara de plasma, confirmando se o meio analisado é, de fato, um plasma. Além disso, ele fornece informações sobre a qualidade do plasma gerado. A Figura 44 apresenta o gráfico obtido, sendo o primeiro desse tipo para esse dispositivo no Brasil.

Figura 44 – Gráfico da Curva Característica para CCP ($V \times I$) - Contínuo



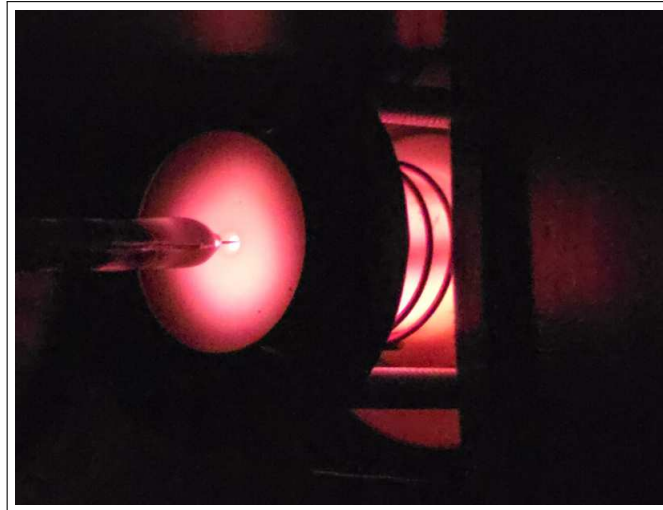
Note que o gráfico da Figura 44 apresenta duas regiões de saturação: à esquerda para os íons e à direita para os elétrons. Normalmente, a obtenção simultânea de ambas é desafiadora. Visualmente, observa-se que o potencial flutuante (ϕ_f) é negativo, enquanto o potencial de plasma (ϕ_p) está próximo de zero. Além disso, a corrente de saturação de íons (I_{is}) é superior à de elétrons (I_{es}). A Figura 45 exibe a curva em formato discreto.

Figura 45 – Gráfico da Curva Característica para CCP ($V \times I$) - Discreto



A Figura 46 apresenta o cátodo de RF em operação com a sonda de Langmuir, destacando o posicionamento axial da ponta da sonda no orifício de saída dos elétrons. A Tabela 14 resume os parâmetros operacionais utilizados para estabelecer as condições observadas na imagem.

Figura 46 – Cátodo de RF em Operação com a Sonda de Langmuir



A partir da análise dos dados e dos gráficos gerados, utilizando modelos e técnicas descritos na literatura, foram calculados parâmetros fundamentais do plasma produzido. Os valores obtidos estão dentro da faixa esperada para esse regime de operação, indicando a coerência dos resultados com as previsões teóricas e experimentais.

A Tabela 15 apresenta os principais parâmetros mensurados, fornecendo informações essenciais para a caracterização do plasma e para futuras otimizações do dispositivo. Esses dados podem contribuir para ajustes no projeto, melhorias na estabilidade da descarga e refinamentos nos métodos de controle e diagnóstico do plasma.

Tabela 15 – Sonda de Langmuir: Parâmetros do Plasma (CCP)

Parâmetros do Plasma	Resultados	Unidades
Corrente de Saturação de Elétrons (I_{es})	$3,80 \cdot 10^{-6}$	[A]
Potencial de Plasma (ϕ_p)	-1,00	[V]
Potencial Flutuante (ϕ_f)	-7,00	[V]
Corrente de Saturação de Íons (I_{is})	$-1,55 \cdot 10^{-5}$	[A]
Temperatura dos Elétrons (T_e)	4,98	[eV]
Velocidade Térmica (V_{th})	$1,49 \cdot 10^6$	[m/s]
Densidade de Elétrons (N_e)	$3,37 \cdot 10^{12}$	[m^{-3}]

Os quatro primeiros parâmetros da Tabela 15 foram extraídos diretamente do gráfico da curva característica, conforme plotado nas Figuras 44 e 45. O primeiro parâmetro da tabela é determinado pela interseção de duas retas na região superior da curva. O ponto de interseção em que traça-se uma reta que cruza o eixo das correntes (I) ou a segunda derivada da curva fornece a corrente de saturação de elétrons (I_{es}). Consequentemente, o

ponto de interseção em que passa-se uma reta que cruza o eixo das tensões (V) define o potencial de plasma (ϕ_p).

O potencial flutuante (ϕ_f) é obtido no ponto em que a curva cruza o eixo das correntes com valor nulo, sendo identificado através de uma reta que cruza o eixo das tensões (V). Já a corrente de saturação dos íons (I_{is}) é determinada traçando-se uma reta horizontal na região linear da parte inferior da curva. A interseção dessa reta com o eixo das correntes (I) fornece seu valor correspondente.

Os três últimos parâmetros da Tabela 15 são calculados a partir dos valores obtidos experimentalmente, utilizando equações presentes na literatura (CHEN, 2015) e (JAHN, 1968). Com base nesses modelos teóricos, são determinadas a temperatura dos elétrons (T_e), a velocidade térmica (V_{th}) e a densidade de elétrons (N_e), permitindo uma caracterização mais completa do plasma gerado.

As Equações 6.4, 6.5 e 6.6 apresentadas a seguir assumem que os elétrons seguem uma distribuição maxwelliana, permitindo a utilização dos modelos clássicos para a temperatura, velocidade térmica e densidade eletrônica do plasma.

6.6.2 Equação da Temperatura dos Elétrons

Representa a relação entre a temperatura dos elétrons, a carga elementar, a constante de Boltzmann e as correntes de saturação.

$$T_e = \frac{e \cdot |\phi_e|}{k_b \cdot (\ln |I_{is}| - \ln |I_{es}|)} \quad (6.4)$$

6.6.3 Equação da Velocidade Térmica dos Elétrons

Relaciona a velocidade térmica dos elétrons à temperatura e à massa do elétron, considerando um fator de ajuste estatístico.

$$V_{th} = \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \quad (6.5)$$

6.6.4 Equação da Densidade de Elétrons

Expressa a densidade de elétrons como uma função do potencial elétrico, da temperatura e da carga elementar.

Os respectivos termos e unidades do conjunto de equações vistas anteriormente são descritos como:

$$N_e = N \cdot e^{\left(\frac{-e \cdot |\phi_e|}{k_b T_e}\right)} \quad (6.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_e : \text{ Temperatura dos elétrons [K];} \\ e : \text{ Carga do elétron [C];} \\ \phi_e : \text{ Potencial elétrico [V];} \\ k_b : \text{ Constante de Boltzmann [J/K];} \\ I_{is} : \text{ Corrente de saturação dos íons [A];} \\ I_{es} : \text{ Corrente de saturação dos elétrons [A];} \\ V_{th} : \text{ Velocidade térmica dos elétrons [m/s];} \\ m_e : \text{ Massa do elétron [kg];} \\ N_e : \text{ Densidade de elétrons [m}^{-3}\text{];} \\ N : \text{ Densidade de referência dos elétrons [m}^{-3}\text{].} \end{array} \right.$$

Note que a densidade de elétrons apresentada na Tabela 15, da ordem de 10^{12} m^{-3} , diverge do valor obtido na simulação realizada no software COMSOL, que é da ordem de 10^{14} m^{-3} . Essa discrepância ocorre porque as condições experimentais permitiram um acoplamento do tipo CCP com uma potência de 10 Watts, enquanto a simulação considerou um acoplamento ICP com uma potência de 30 Watts.

Percebe-se que, ao comparar o potencial elétrico obtido experimentalmente com o da simulação, também há divergências significativas. A simulação indica um potencial elétrico máximo de 4 V no centro do cátodo de RF, enquanto o valor calculado experimentalmente é de -7 V.

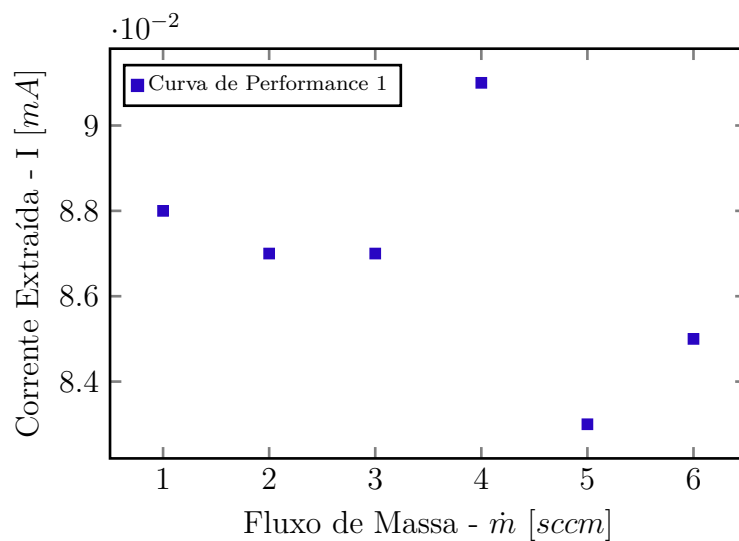
As diferenças observadas entre os resultados experimentais e simulados podem estar associadas a diversos fatores, como variações nas condições de contorno adotadas na simulação, efeitos de contato elétrico no experimento ou discrepâncias no acoplamento de potência entre os casos analisados. No entanto, os valores obtidos nos testes são condizentes com as características esperadas para um plasma como o gerado dentro do dispositivo.

O cátodo de RF, também conhecido como cátodo de plasma, apresenta um grande potencial de desenvolvimento e aprimoramento tecnológico. Estudos futuros do dispositivo incluirão a implementação de um acoplamento indutivo (ICP) do plasma gerado dentro da câmara de plasma. Vale ressaltar que o acoplamento ICP, em comparação com o CCP, apresenta uma eficiência significativamente maior pela literatura [Chabert e Braithwaite \(2011\)](#). Isso significa que, para aumentar a extração de elétrons do dispositivo, é essencial trabalhar com um acoplamento indutivo. Esse aprimoramento já está em andamento e será explorado em estudos futuros sobre o dispositivo no Laboratório de Física dos Plasmas (LFP) do Instituto de Física (IF) e no Laboratório de Sistemas Espaciais (LaSE) pela Faculdade de Tecnologias e Ciências em Engenharia (FCTE), antiga Faculdade do Gama (FGA). Ambos laboratórios pertencem a Universidade de Brasília (UnB).

6.7 Parâmetros de Performance do Cátodo (Gráficos)

A partir das experimentações realizadas com o cátodo de radiofrequência, foram medidos vários parâmetros cruciais para o desempenho do sistema. O estudo focou na relação entre a corrente extraída pelo extrator de elétrons e a quantidade de gás introduzida na câmara de ionização. A corrente extraída foi observada sob diferentes condições de fluxo de gás, fornecendo dados valiosos sobre a eficiência do dispositivo. A Figura 47 apresenta a correlação entre o fluxo de gás e a corrente extraída, com os resultados demonstrando como variações no fluxo do gás impactam diretamente a corrente.

Figura 47 – Gráfico ($I \times \dot{m}$) para Seis Taxas de \dot{m}



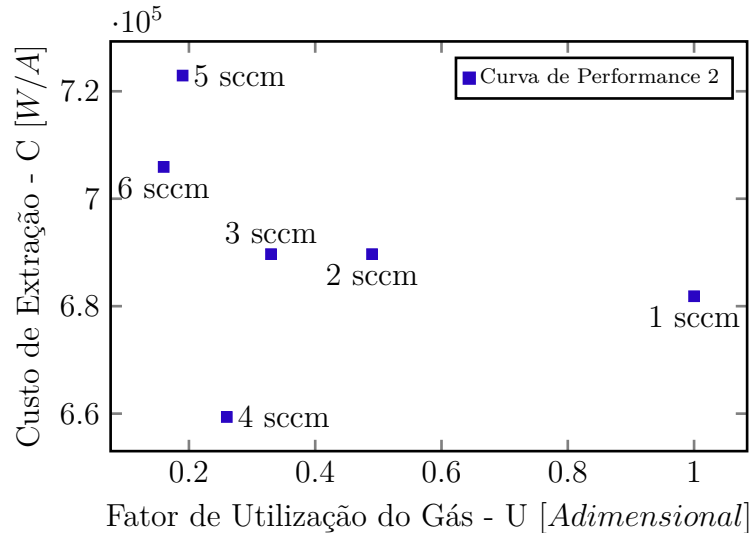
Observou-se que, ao inserir 4 sccm de argônio na câmara, a curva de performance 1 atingiu seu pico máximo de eficiência, evidenciado por um aumento da corrente até 0,091 mA. Este comportamento destaca-se na faixa de fluxo de massa de 4 sccm, comumente observada na operação de cátodos ocos, conforme discutido anteriormente.

É importante notar que a corrente relativamente baixa registrada se deve à limitação da tensão aplicada no eletrodo posicionado em frente ao cátodo, que estava restrita a aproximadamente 32 V. Essa restrição na fonte DC impediu a extração da corrente máxima que o dispositivo poderia fornecer. Como resultado, a eficiência observada não alcançou o potencial máximo esperado para cátodos de radiofrequência, conforme descrito na literatura. Portanto, para explorar plenamente o desempenho do cátodo, seria necessário utilizar uma fonte de alimentação que permita uma maior amplitude de tensão, alinhando-se com as condições ideais descritas em estudos prévios.

Utilizando as equações apresentadas nos artigos de referência e detalhadas neste trabalho, foi possível calcular o custo de extração de elétrons (C) em [W/A] e o fator de utilização do gás de trabalho (U), que é adimensional. A partir dos parâmetros obtidos nos testes experimentais, foram realizados cálculos que permitiram a construção do gráfico

da Figura 48, o qual ilustra a relação entre o custo de extração e o fator de utilização, representada pela curva de performance 2.

Figura 48 – Gráfico ($C \times U$) para Seis Taxas de \dot{m}



Observa-se que o custo de extração dos elétrons está significativamente elevado em comparação com os valores encontrados na literatura. Esta disparidade se deve à baixa corrente extraída, que aparece no denominador da Equação (6.1). A corrente reduzida amplifica o valor da potência na equação, elevando o custo de extração, resultando em um valor de potência por unidade de corrente que é excepcionalmente alto, levando a discrepâncias notáveis em relação aos dados literários.

O ponto máximo da função de custo é atingido com um fluxo de 5 sccm de argônio na câmara, correspondendo a um valor de $C = 689.687,17 \text{ W/A}$. Nesta condição, a corrente extraída era de apenas 0,083 mA, conforme ilustrado no gráfico da Figura 47. Este foi o menor valor de corrente registrado durante o experimento. Este resultado indica que quanto maior a corrente extraída, menor será o custo de extração, evidenciando uma relação inversamente proporcional entre os dois parâmetros. Portanto, a eficiência do sistema pode ser melhorada significativamente ao aumentar a corrente extraída, o que diminuirá o custo de extração de acordo com a relação inversa observada.

6.8 Parâmetros de Performance do Cátodo (Tabelas)

A Tabela 16 apresenta um comparativo detalhado dos cátodos mencionados na literatura Celik e Kurt (2018a). Este comparativo é elaborado com base nos parâmetros de análise adotados, os quais são essenciais para avaliar a eficácia desses dispositivos. Ao longo da tabela, são listados cinco cátodos de radiofrequência (plasma), cada um acompanhado por informações detalhadas de cinco parâmetros fundamentais para determinar suas eficiências.

É importante destacar que, para a realização dos testes laboratoriais e extração dos dados descritos na tabela, foram utilizados apenas dois tipos de gases nobres: hélio (He) e argônio (Ar). O argônio, por ser mais econômico, mostrou-se ideal para os experimentos, garantindo a viabilidade e a precisão dos resultados obtidos.

Esses dados oferecem uma visão abrangente do desempenho e das características dos cátodos analisados, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento no campo da pesquisa em plasma e tecnologias afins.

Tabela 16 – Comparação dos Parâmetros de Performance do Cátodo de Plasma

Nº	Tipos de Cátodos de RF	Gás	Taxa de Fluxo de Massa (\dot{m}) [sccm]	Corrente Extraída (I) [A]	Custo de Extração dos Elétrons (C) [W/A]	Fator de Utilização do Gás (U) [Adimensional]
I.	Cátodo de RF com antena de Volta Única e Núcleo de Ferrite	Ar	9,00	1,42	216,00	2,21
II.	Cátodo de RF com Antena de Cinco Voltas	Ar	4,00	0,78	182,00	2,73
III.	Cátodo de RF da literatura do artigo, Hatekeyama [6]	Xe	2,00	1,50	93,00	10,60
IV.	Cátodo de RF da literatura do artigo, Longmier [10]	Ar	15,00	3,50	186,00	3,80
V.	Cátodo de RF da literatura do artigo, Weis [5]	Xe	1,50	0,10	510,00	0,37

A análise da Tabela 16 revela que o cátodo com o melhor desempenho em termos de corrente de extração (I) é descrito na literatura pelo artigo de Longmier [10], item IV da tabela citada. Este cátodo alcançou uma extração de 3,50 A, uma medida que se aproxima significativamente dos 4,00 A observados para o cátodo oco, conforme detalhado na Tabela 17.

Além disso, na Tabela 16, observa-se que o fluxo de massa (\dot{m}) é substancialmente mais alto em comparação com outros dispositivos, atingindo 15,00 sccm. O custo de extração dos elétrons (C) é consideravelmente competitivo em relação aos demais, aproximadamente 186,00 W/A. Este custo desempenha um papel crucial, especialmente em aplicações espaciais, sendo um fator determinante na escolha dos dispositivos.

Por fim, o fator de utilização do gás (U) é relativamente baixo, em torno de 3,80, destacando a eficiência do cátodo em questão. Essas métricas são essenciais para avaliar o desempenho e a viabilidade de dispositivos para diversas aplicações, especialmente no contexto de tecnologias espaciais.

Na Tabela 17, logo abaixo, estão listados os cinco tipos mais comuns de cátodos

utilizados em pesquisa e na indústria. Os dispositivos mencionados são classificados como cátodo de plasma (RF), cátodo oco, cátodo de filamento, cátodo de emissão de campo e cátodo de micro-ondas. Para uma compreensão mais aprofundada sobre esses tipos de cátodos, o artigo [Hatakeyama et al. \(2007\)](#) fornece informações adicionais. No entanto, a tabela abaixo detalha os dados específicos de cada tipo de dispositivo.

Tabela 17 – Comparação dos Parâmetros de Performance de 5 Tipos de Cátodos

Nº	Tipos de Cátodos	Gás	Taxa de Fluxo de Massa (\dot{m}) [sccm]	Corrente Extraída (I) [A]	Custo de Extração dos Elétrons (C) [W/A]	Fator de Utilização do Gás (U) [Adimensional]
I.	Cátodo de RF (ICP) do artigo	Xe	2,00	1,50	93,00	10,60
II.	Cátodo de RF (ICP) da literatura do artigo, Longmier [2]	Ar	15,00	3,50	186,00	3,80
III.	Cátodo de RF (ICP) da literatura do artigo, Inoue [3]	Xe	1,50	0,70	111,00	7,10
IV.	Cátodo de RF (CCP) da literatura do artigo, Weis [4]	Xe	1,50	0,10	510,00	0,37
V.	Cátodo de Filamento	Xe	3,00	0,30	205,00	1,40
VI.	Cátodo Oco Convencional	Xe	2,00	4,00	33,00	28,00
VII.	Cátodo de Micro-ondas	Xe	1,00	0,50	70,00	11,50
VIII.	Cátodo de Emissão de Campo	-	-	0,003	3910,00	-

Na Tabela 17 apresentada anteriormente, destacam-se os parâmetros do cátodo de plasma, referente ao item II, analisado sob a perspectiva de outro artigo da literatura. Nesse contexto, é possível realizar uma comparação direta com o cátodo oco discutido neste trabalho, correspondente ao item VI.

Inicialmente, vale ressaltar que a comparação entre os itens II e VI da tabela pode ser considerada limitada devido à diferença nos gases utilizados nos experimentos. No entanto, ao examinar os parâmetros de análise, é possível obter uma ideia do desempenho relativo desses cátodos.

Observa-se que o cátodo oco apresenta uma corrente extraída ligeiramente superior, aproximadamente 0,5 A a mais do que o cátodo do item II. Além disso, os parâmetros de fluxo de massa e custo de extração também são menos elevados para o cátodo oco. No entanto, é importante notar que o fator de utilização do gás é consideravelmente mais alto, atingindo cerca de 28,00, aproximadamente 7,37 vezes maior do que o cátodo de plasma.

Essa análise comparativa oferece insights valiosos sobre as características e desempenho desses cátodos, contribuindo para uma compreensão mais abrangente de suas

potenciais aplicações e limitações no contexto da pesquisa em plasma e tecnologias correlatas.

Com o intuito de se analisar a performance do protótipo desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB), decidiu-se comparar o cátodo de Plasma frente a diferentes taxas de fluxo de massa (\dot{m}). A Tabela 18 demonstra essa comparação com seis fluxos de massa distintos. Além disso, a mesma tabela expõe outros parâmetros de performance do dispositivo.

Tabela 18 – Performance do Cátodo de RF com Diferentes Fluxos de Massa (\dot{m})

Nº	Protótipo do Cátodo de RF	Gás	Taxa de Fluxo de Massa (\dot{m}) [sccm]	Corrente Extraída (I) [mA]	Custo de Extração dos Elétrons (C) [W/A]	Fator de Utilização do Gás (U) [Adimensional]
I.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	1,00	0,088	681.850,18	1,00
II.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	2,00	0,087	689.687,17	0,49
III.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	3,00	0,087	689.687,17	0,33
IV.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	4,00	0,091	659.372,66	0,26
V.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	5,00	0,083	722.923,57	0,19
VI.	Cátodo de RF Desenvolvido na UnB	Ar	6,00	0,085	705.914,35	0,16

Note que a máxima corrente extraída é de aproximadamente 0,091 mA a 4 sccm (fluxo de massa), cujo qual é o mesmo fluxo de operação, normalmente, para se operar o cátodo oco com performance aceitável.

Conclusão

Neste trabalho, foi realizado o desenvolvimento tecnológico do cátodo de radio-frequência (RF) para propulsores elétricos Hall como uma fonte de elétrons, sendo este o primeiro cátodo de RF desenvolvido e testado em toda a América Latina. O principal objetivo foi a construção de uma tecnologia alternativa de menor custo em comparação aos cátodos ociosos convencionais, sem comprometer a eficiência do sistema de extração de corrente. Para isso, foram abordados aspectos fundamentais da física de plasmas, técnicas de construção e métodos experimentais para obtenção de dados, resultando em um estudo abrangente sobre o desempenho do novo dispositivo.

O custo de produção do cátodo foi estimado em aproximadamente R\$ 2.000,00 no ano de 2024, representando uma alternativa economicamente viável em comparação ao cátodo ocioso tradicional, cujo valor de mercado é significativamente superior. Além disso, a tecnologia proposta supera a limitação de vida útil dos cátodos ociosos, que geralmente não ultrapassam 1.000 horas de operação para dispositivos do tipo mais baratos para serem testados em um ambiente de laboratório. Estudos preliminares indicam que o custo pode ser reduzido ainda mais com a substituição de alguns materiais por alternativas de menor custo, sem comprometer o desempenho do dispositivo.

A eficiência da antena de RF foi avaliada experimentalmente, sendo testada para potências de 10 W, 30 W e 60 W, inicialmente com uma frequência ideal de 16,56 MHz e posteriormente ajustada para 13,56 MHz, compatível com o gerador de RF disponível. A máxima eficiência foi alcançada após a adaptação ao sistema de testes, incluindo o casamento de impedância por meio de um *Manual Matching Network* (MMN). Durante os testes, a antena operou a 60 W, permitindo a geração de plasma e a extração de corrente do cátodo.

As simulações computacionais realizadas no software ANSYS permitiram uma análise detalhada da distribuição térmica do dispositivo, considerando a transferência de calor por condução e radiação. Os resultados indicaram que o material cerâmico Shapal, devido à sua alta condutividade térmica de 55 W/(m·K), proporcionou uma distribuição mais homogênea de temperatura, variando entre 324,58 °C e 427,72 °C. Em contraste, o material Macor, cuja condutividade térmica é de apenas 1,56 W/(m·K), apresentou temperaturas mais elevadas, atingindo até 546,23 °C, concentradas principalmente no centro da câmara de ionização.

Os experimentos demonstraram a funcionalidade do cátodo de RF, com uma corrente máxima extraída de 0,091 mA para uma taxa de fluxo mássico de 4 sccm. O dispositivo foi testado em faixas de fluxo entre 1 e 6 sccm, obtendo valores de corrente entre

0,083 mA e 0,091 mA. A pressão ideal de operação foi estabelecida em torno de 10^{-5} Torr, com suporte de uma bomba difusora e monitoramento por um medidor de vácuo tipo Penning. O gerador de RF forneceu uma potência constante de 60 W, enquanto a fonte de tensão DC operou com um limite máximo de 32 V.

O gráfico da relação entre o custo de extração de elétrons e o fator de utilização do gás indicou que, para um fluxo de 4 sccm, o custo mínimo de extração foi de aproximadamente 659.372,66 W/A. Isso corrobora a relação teórica entre a corrente extraída e a potência aplicada, onde maiores correntes implicam menores custos de extração, reforçando a viabilidade do dispositivo como uma fonte eficiente de elétrons para propulsores elétricos Hall.

A simulação realizada no software COMSOL forneceu parâmetros fundamentais para o estudo do plasma, incluindo o potencial elétrico (ϕ_e), a densidade de elétrons (N_e), a temperatura dos elétrons (T_e), o potencial flutuante (ϕ_f), o potencial do plasma (ϕ_p) e as correntes de saturação de elétrons (I_{se}) e de íons (I_{si}). O modelo computacional considerou um plasma gerado por acoplamento indutivo (ICP), enquanto o experimento, devido a limitações técnicas, operou sob acoplamento capacitivo (CCP). A densidade de elétrons simulada foi da ordem de 10^{14} m^{-3} , enquanto o valor obtido experimentalmente por meio de uma sonda de Langmuir foi de aproximadamente 10^{12} m^{-3} . O potencial elétrico na simulação foi de 4 V, enquanto no experimento foi medido em -7 V, divergência atribuída à diferença de potência aplicada: 30 W na simulação e 10 W no experimento, devido à interferência do RF na sonda de Langmuir em potências mais elevadas.

Além disso, foram calculadas outras grandezas relevantes para a caracterização do plasma, incluindo a velocidade térmica dos elétrons (V_{th}) ressaltando as equações que consideram uma função de distribuição de Maxwell-Boltzmann, utilizada para estimar a temperatura dos elétrons a partir das medições experimentais. A diferença entre os valores simulados e experimentais reforça a necessidade de futuras investigações para aprimorar a acurácia das medições e refinar os modelos numéricos.

Os testes experimentais de otimização da extração de corrente não resultaram em ganhos significativos, reforçando a importância do tipo de acoplamento na eficiência da ionização do plasma. O acoplamento ICP apresenta desempenho superior ao CCP, o que motivou o desenvolvimento de novas abordagens para um futuro aprimoramento do cátodo. Trabalhos futuros devem focar na implementação de um sistema de acoplamento ICP para maximizar a eficiência da extração de elétrons e melhorar o acoplamento do cátodo com o propulsor.

Em suma, este estudo demonstrou a viabilidade do cátodo de RF como uma alternativa promissora aos cátodos ociosos para, inicialmente, testes experimentais, contribuindo para o avanço da tecnologia de propulsão elétrica. Os resultados obtidos podem servir de base para aprimoramentos futuros, impulsionando a pesquisa e desenvolvimento de

propulsores Hall em nível nacional e internacional. A continuidade deste trabalho permitirá melhorias na eficiência do dispositivo, na precisão das medições experimentais e na redução de custos, consolidando o cátodo de RF como uma opção robusta para aplicações aeroespaciais.

Referências

- ANSYS. *ANSYS Fluent User's Guide 2023*. [S.l.], 2023. ANSYS Fluent 2023 R2 Version. Citado na página 77.
- CELIK, M.; KURT, H. Ferromagnetic enhanced inductively coupled plasma cathode for thruster ion neutralization. 2018. Citado 7 vezes nas páginas 33, 39, 42, 43, 48, 69 e 112.
- CELIK, M.; KURT, H. Ferromagnetic enhanced inductively coupled plasma cathode for thruster ion neutralization. In: AIP PUBLISHING. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2018. v. 2011, n. 1. Citado na página 85.
- CENGEL, Y. A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2nd. ed. USA: McGraw-Hill, 2002. 18, 46 p. ISBN 0-07-245893-3, 978-0-07-245893-0. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.
- CERN. *Introduction to the Principles of Vacuum Physics*. 1999. Accessed on 23 de fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/582156/files/p1.pdf>>. Citado na página 59.
- CHABERT, P.; BRAITHWAITE, N. *Physics of Radio-Frequency Plasmas*. 1st. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 400 p. ISBN 978-0-521-76300-4. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 110.
- CHEN, F. F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 3th. ed. USA: Springer, 2015. 2 p. ISBN 331-9223089, 978-3319223087. Citado 6 vezes nas páginas 42, 43, 51, 95, 107 e 109.
- FOSTER, J. E.; WILLIAMS, G. J.; PATTERSON, M. J. Characterization of an ion thruster neutralizer. *Journal of Propulsion and Power*, v. 23, n. 4, p. 828–835, 2007. Citado na página 85.
- GOEBEL, D. M.; KATZ, I. *Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters*. 1th. ed. USA: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 047-0429275, 978-0470429273, 978-0470436264. Citado 3 vezes nas páginas 31, 42 e 43.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. 10th. ed. USA: John Wiley & Sons, 2013. 553 p. ISBN 978-1-118-23072-5. Citado na página 61.
- HATAKEYAMA, T. et al. Preliminary study on radio frequency neutralizer for ion engine. 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238102258_Preliminary_Study_on_Radio_Frequency_Neutralizer_for_Ion_Engine>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 85, 103 e 114.
- JAHANBAKHS, S.; CELIK, M. Theoretical investigation and modeling of current extraction from a radio-frequency cathode. 2014. Citado 5 vezes nas páginas 33, 67, 68, 70 e 85.
- JAHANBAKHS, S.; CELIK, M. Experimental investigation of operational parameters of a prototype radio frequency plasma cathode. In: IEEE. *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. [S.l.], 2015. Citado na página 85.

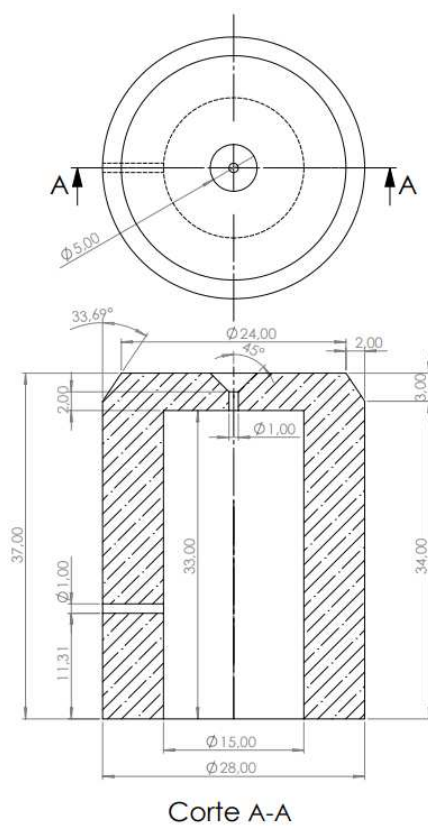
- JAHN, R. G. *Physics of Electric Propulsion*. 1th. ed. USA: McGraw-Hill, 1968. 25 p. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 109.
- LONGMIER, B.; HERSHKOWITZ, N. “electrodeless” plasma cathode for neutralization of ion thrusters. In: *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 85.
- MULTIPHYSICS, C. *Plasma Module User’s Guide 2019*. [S.l.], 2019. COMSOL Multiphysics 5.5 Version Package. Citado na página 86.
- OKS, E. M.; SCHANIN, P. M. Development of plasma cathode electron guns. *Physics of Plasmas*, v. 6, n. 5, p. 1649–1654, 1999. Citado na página 85.
- SMIRNOV, P. et al. Research and development of radio-frequency cathodeneutralizer. 2019. Disponível em: <<https://electricrocket.org/2019/840.pdf>>. Citado 7 vezes nas páginas 33, 39, 42, 43, 53, 54 e 103.
- SYSTEMES, D. *SolidWorks User’s Guide 2023*. [S.l.], 2023. SolidWorks 2023 SP0 Version. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 77.
- WEATHERFORD, B. R. *Development and study of an electron cyclotron resonance waveguide plasma cathode for electric propulsion applications*. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 2011. Citado na página 85.
- WEATHERFORD, B. R.; FOSTER, J. E.; KAMHAWI, H. Electron current extraction from a permanent magnet waveguide plasma cathode. *Review of Scientific Instruments*, v. 82, n. 9, 2011. Citado na página 85.
- WEIS, S. et al. Development of a capacitively coupled insert-free rf-neutralizer. In: *29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, NJ, USA*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 85.
- WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. 9th. ed. USA: McGraw-Hill, 2021. 252 p. ISBN 978-1-260-57554-5. Citado na página 49.

Apêndices

APÊNDICE A – Desenho Técnico (Dimensões)

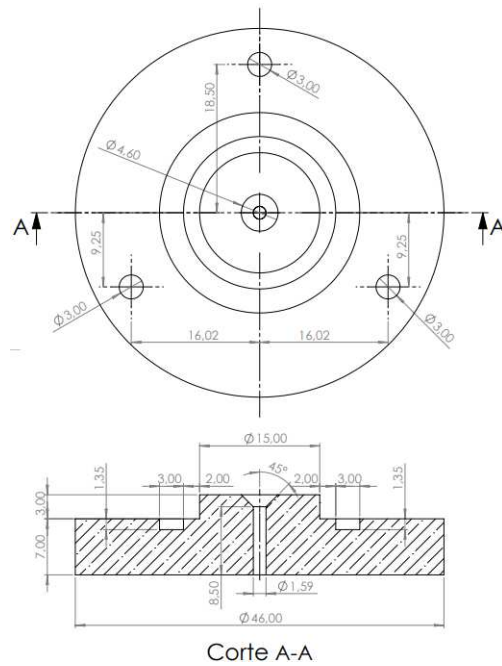
Desenho 2D da Câmara de Geração de Plasma

Figura 49 – Câmara de Plasma [mm]



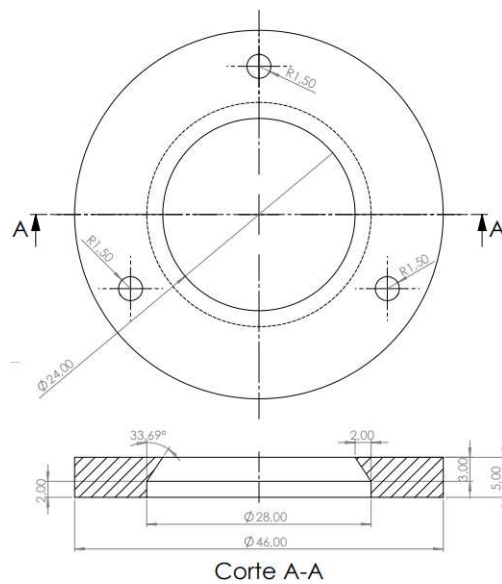
Desenho 2D da Base da Câmara de Plasma

Figura 50 – Base da Câmara de Plasma [mm]



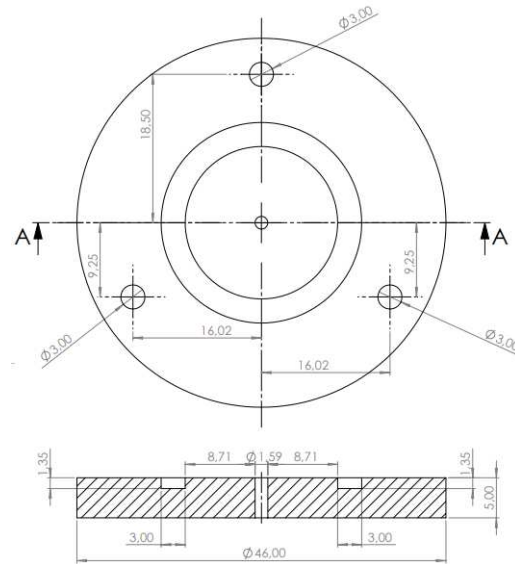
Desenho 2D do Anel Frontal

Figura 51 – Anel Frontal [mm]



Desenho 2D da Flange Inferior

Figura 52 – Flange Inferior [mm]



Corte A-A

APÊNDICE B – Propulsor PHall e Cátodo de RF

Desde 2002, o Laboratório de Física de Plasmas (LFP) do Instituto de Física da UnB tem se dedicado ao desenvolvimento de propulsores elétricos do tipo HALL (PHALL), com substancial apoio de diversas agências de fomento, incluindo o programa UNIES-PAÇO da AEB, FAP-DF, CNPq, CAPES, FINEP e FINATEC. Ao longo dos anos, o projeto PHALL produziu quatro protótipos, cada um apresentando avanços incrementais em tecnologia e desempenho.

O PHALL I utilizou ímãs de ferrite longos, gerando um campo magnético médio de 260 G dentro do canal anular. O PHALL II-A introduziu ímãs longos de Neodímio, alcançando um campo magnético mais intenso de 1100 G . O PHALL II-B empregou ímãs curtos de Neodímio, mas devido ao material ferromagnético, o campo magnético foi reduzido para 100 G . O protótipo PHALL II-C marcou uma inovação significativa ao incorporar um cátodo oco como fonte de elétrons, juntamente com ímãs de Samário-Cobalto, mantendo um campo magnético de 100 G dentro do canal.

O primeiro protótipo, PHALL I, demonstrou em 2004 que a operação eficaz desse tipo de propulsor é possível utilizando campos magnéticos produzidos por ímãs permanentes. Os resultados experimentais mais recentes com o PHALL II-C indicaram uma maturação crucial dessa tecnologia, atingindo o objetivo de produzir forças superiores a 40 mN .

Comercialmente, o propulsor Hall SPT 100 da SNECMA (100 mN , $I_s = 2500$ s) consome 1 kW com seu campo magnético produzido por eletroímãs. Em contraste, o PHALL I opera a 2.5 mN e consome 60 $Watts$, enquanto o PHALL II-C, apesar de ser menor, produz um empuxo de 41 mN com um consumo de potência de 620 $Watts$ e um impulso específico mais elevado (~ 2286 s) em comparação com o PHALL I (~ 300 s).

A evolução contínua desses protótipos resultou em um novo design especificamente para *CubeSats*. Esse projeto apresenta um propulsor redimensionado para 90 mm de diâmetro e 30 mm de altura, ideal para *CubeSats* a partir de 3U. Ele integra tecnologias avançadas, como ímãs de Samário-Cobalto e um cátodo oco/cátodo de RF, desenvolvido neste trabalho. Além disso, o autor deste TCC não apenas projetou o cátodo de RF, como também o novo propulsor de efeito Hall (Mini-PHall) do laboratório.

Esse novo design do PHALL representa um avanço significativo na tecnologia de propulsores elétricos, oferecendo uma solução inovadora e eficiente para a propulsão de pequenos satélites. Além de fortalecer a liderança e a expertise do LFP e da UnB no desenvolvimento de tecnologia espacial no Brasil, este projeto foi conduzido pelo autor, estabelecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações. Estudos adicionais sobre o propulsor serão aprofundados em trabalhos futuros do próprio autor.

A Figura 53 apresenta o propulsor PHALL II-C juntamente com o cátodo de RF desenvolvido neste trabalho. Nota-se que, no experimento ilustrado, apenas o cátodo de plasma está operando, uma vez que a integração completa entre o dispositivo e o propulsor, também conduzida pelo autor, ainda não foi implementada. Esse processo será concluído em pesquisas futuras.

Figura 53 – Cátodo de RF com PHall II-C na Câmara de Vácuo



APÊNDICE C – Curva de Langmuir: Código em Python

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
from google.colab import files
import re

# Define the voltage (V) and current (I) vectors manually:
V = np.array([-100.0, -99.0, -98.0, -97.0, -96.0, -95.0, -94.0, -93.0, -92.0, -91.0,
-90.0, -89.0, -88.0, -87.0, -86.0, -85.0, -84.0, -83.0, -82.0, -81.0, -80.0,
-79.0, -78.0, -77.0, -76.0, -75.0, -74.0, -73.0, -72.0, -71.0, -70.0, -69.0,
-68.0, -67.0, -66.0, -65.0, -64.0, -63.0, -62.0, -61.0, -60.0, -59.0, -58.0,
-57.0, -56.0, -55.0, -54.0, -53.0, -52.0, -51.0, -50.0, -49.0, -48.0, -47.0,
-46.0, -45.0, -44.0, -43.0, -42.0, -41.0, -40.0, -39.0, -38.0, -37.0, -36.0,
-35.0, -34.0, -33.0, -32.0, -31.0, -30.0, -29.0, -28.0, -27.0, -26.0, -25.0,
-24.0, -23.0, -22.0, -21.0, -20.0, -19.0, -18.0, -17.0, -16.0, -15.0, -14.0,
-13.0, -12.0, -11.0, -10.0, -9.0, -8.0, -7.0, -6.0, -5.0, -4.0, -3.0, -2.0, -1.0,
0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0,
15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0, 20.0, 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0, 26.0, 27.0,
28.0, 29.0, 30.0, 31.0, 32.0, 33.0, 34.0, 35.0, 36.0, 37.0, 38.0, 39.0, 40.0,
41.0, 42.0, 43.0, 44.0, 45.0, 46.0, 47.0, 48.0, 49.0, 50.0, 51.0, 52.0, 53.0,
54.0, 55.0, 56.0, 57.0, 58.0, 59.0, 60.0, 61.0, 62.0, 63.0, 64.0, 65.0, 66.0,
67.0, 68.0, 69.0, 70.0, 71.0, 72.0, 73.0, 74.0, 75.0, 76.0, 77.0, 78.0, 79.0,
80.0, 81.0, 82.0, 83.0, 84.0, 85.0, 86.0, 87.0, 88.0, 89.0, 90.0, 91.0, 92.0,
93.0, 94.0, 95.0, 96.0, 97.0, 98.0, 99.0, 100.0]) # Insert voltage values here

I = np.array([-1.58996e-05, -1.57444e-05, -1.57462e-05, -1.57599e-05, -1.58206e-05,
-1.58646e-05, -1.55648e-05, -1.55177e-05, -1.55779e-05, -1.56911e-05,
-1.55582e-05, -1.56207e-05, -1.56035e-05, -1.56483e-05, -1.55218e-05,
-1.5443e-05, -1.52388e-05, -1.53023e-05, -1.5392e-05, -1.5234e-05, -1.53938e-05,
-1.56011e-05, -1.51551e-05, -1.51151e-05, -1.51639e-05, -1.51929e-05,
-1.51775e-05, -1.55121e-05, -1.52898e-05, -1.53461e-05, -1.55524e-05,
-1.53049e-05, -1.54333e-05, -1.56098e-05, -1.59174e-05, -1.57884e-05,
-1.57035e-05, -1.58594e-05, -1.57978e-05, -1.58e-05, -1.59613e-05, -1.57253e-05,
-1.58818e-05, -1.61007e-05, -1.60454e-05, -1.6025e-05, -1.59374e-05,
-1.63422e-05, -1.60693e-05, -1.60231e-05, -1.58373e-05, -1.58613e-05,
-1.60106e-05, -1.57555e-05, -1.58154e-05, -1.54024e-05, -1.54726e-05,
-1.53942e-05, -1.53576e-05, -1.52258e-05, -1.53155e-05, -1.51094e-05,
-1.50306e-05, -1.48539e-05, -1.45279e-05, -1.44299e-05, -1.43699e-05,
-1.40173e-05, -1.3664e-05, -1.336e-05, -1.29261e-05, -1.27169e-05, -1.21062e-05,

```

```

-1.20152e-05, -1.10514e-05, -1.0486e-05, -1.00217e-05, -9.40427e-06,
-8.77536e-06, -8.24204e-06, -7.629e-06, -6.94895e-06, -6.44564e-06, -5.82785e-06,
  -5.16487e-06, -4.53565e-06, -4.05554e-06, -3.41593e-06, -2.81832e-06,
-2.17844e-06, -1.59303e-06, -9.7939e-07, -3.4808e-07, 2.44486e-07, 6.82808e-07,
  1.2363e-06, 1.69908e-06, 2.09835e-06, 2.48899e-06, 2.68291e-06, 2.97826e-06,
  3.13223e-06, 3.29693e-06, 3.47322e-06, 3.54685e-06, 3.72824e-06, 3.71496e-06,
  3.66617e-06, 3.78221e-06, 3.81272e-06, 3.7956e-06, 3.85818e-06, 3.89151e-06,
  3.92933e-06, 4.03791e-06, 4.03532e-06, 4.04289e-06, 4.0397e-06, 4.09496e-06,
  4.14128e-06, 4.2693e-06, 4.28764e-06, 4.1943e-06, 4.25281e-06, 4.38299e-06,
  4.36441e-06, 4.3982e-06, 4.34833e-06, 4.36657e-06, 4.4151e-06, 4.40717e-06,
  4.51738e-06, 4.55334e-06, 4.57126e-06, 4.50751e-06, 4.56304e-06, 4.49688e-06,
  4.58447e-06, 4.69291e-06, 4.59696e-06, 4.5887e-06, 4.67331e-06, 4.62504e-06,
  4.71366e-06, 4.69645e-06, 4.83586e-06, 4.83174e-06, 4.9187e-06, 5.01153e-06,
  5.06181e-06, 5.02076e-06, 4.86807e-06, 4.99682e-06, 5.10543e-06, 5.08783e-06,
  5.11513e-06, 5.09002e-06, 5.12581e-06, 5.2097e-06, 5.29231e-06, 5.31299e-06,
  5.15871e-06, 5.26352e-06, 5.24696e-06, 5.33758e-06, 5.39678e-06, 5.42231e-06,
  5.42274e-06, 5.49266e-06, 5.48857e-06, 5.52424e-06, 5.56524e-06, 5.53374e-06,
  5.66179e-06, 5.4667e-06, 5.6437e-06, 5.58649e-06, 5.74096e-06, 5.65538e-06,
  5.71562e-06, 5.85007e-06, 5.84898e-06, 5.84728e-06, 5.86955e-06, 5.76525e-06,
  5.87088e-06, 5.91611e-06, 5.91856e-06, 5.90137e-06, 6.02004e-06, 5.97633e-06,
  5.96441e-06, 6.04785e-06, 5.98262e-06, 6.06764e-06, 5.96123e-06, 5.92442e-06,
  5.83944e-06, 6.06455e-06, 5.97395e-06, 5.92998e-06]) # Insert current values
  here

# Plot the Langmuir plasma curve with grid showing intersections:
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(V, I, 'b-', linewidth=2, label='Langmuir Curve') # 'b-' for blue line, no
  markers

# Configure graph paper style grid:
plt.minorticks_on()
plt.grid(True, which='major', linestyle='-', linewidth=0.8, alpha=0.7, color='black')
  # Linhas principais
plt.grid(True, which='minor', linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.3, color='gray')
  # Linhas secundárias

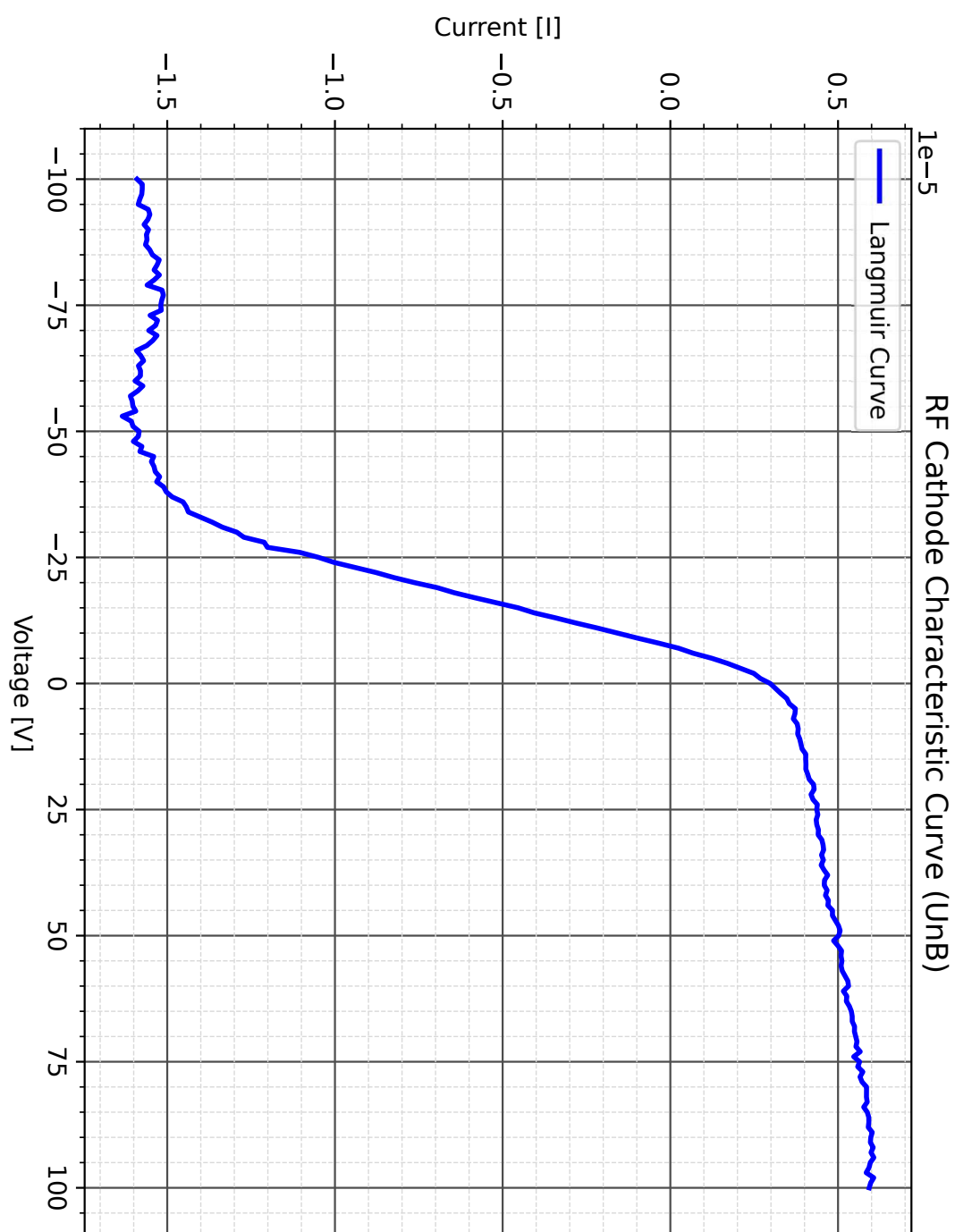
# Labels and title:
plt.xlabel("Voltage [V]")
plt.ylabel("Current [I]")
plt.title("RF Cathode Characteristic Curve (UnB)")
plt.legend()

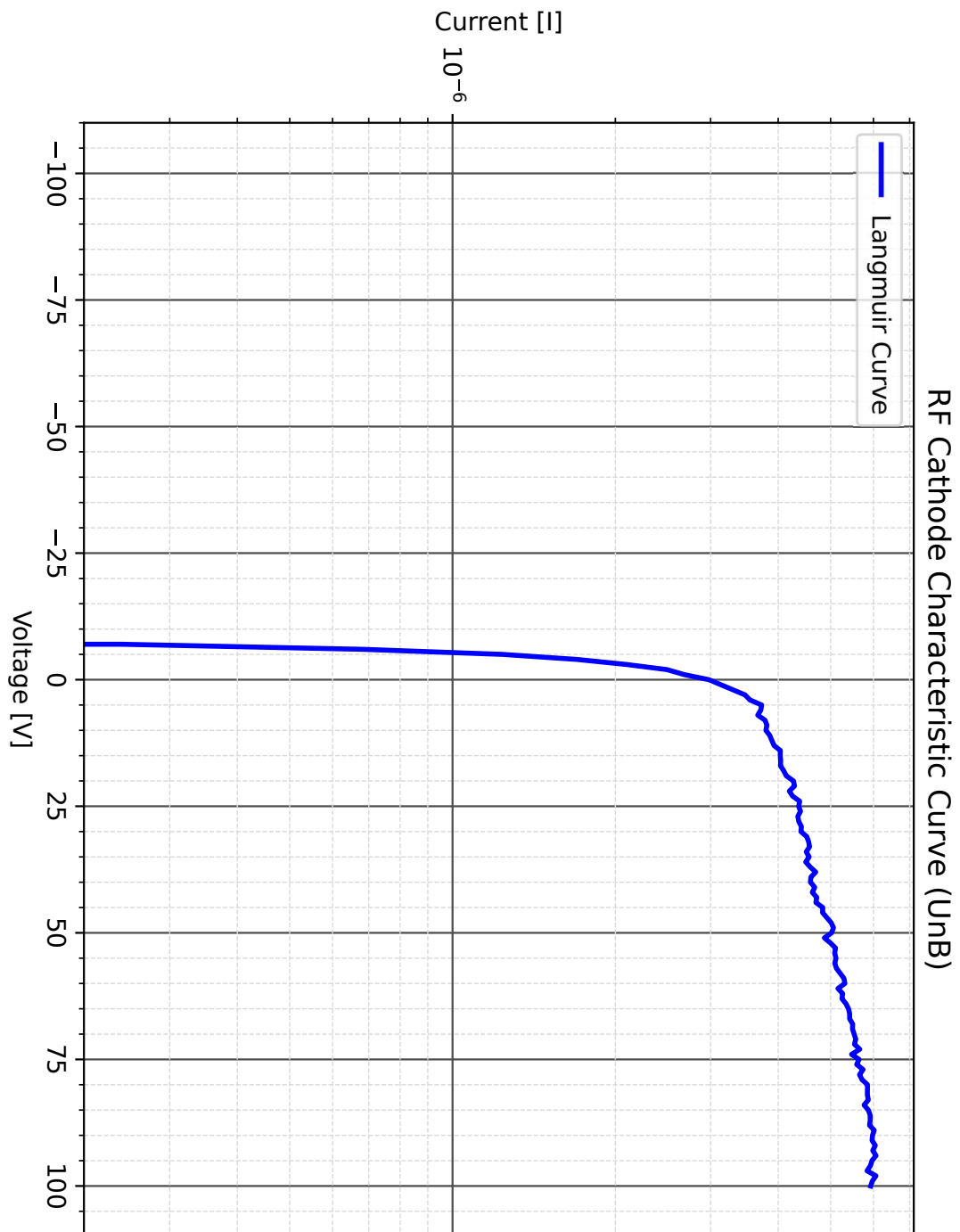
# Save plot as PDF:
pdf_path = "/content/Langmuir_Curve.pdf"
plt.savefig(pdf_path, format='pdf')
plt.show()

```

```
# Provide download link:  
files.download(pdf_path)
```


APÊNDICE D – Curvas de Langmuir do Cátodo de RF





Anexos

ANEXO A – Propriedades do Macor

Propriedades Térmicas do Macor

Figura 54 – Propriedades Térmicas do Macor

I. Thermal		
	SI/Metric	Imperial
Coefficient of Expansion		
CTE -100°C → 25°C	81 x 10 ⁻⁷ /°C	45 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 300°C	90 x 10 ⁻⁷ /°C	50 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 600°C	112 x 10 ⁻⁷ /°C	62 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 800°C	123 x 10 ⁻⁷ /°C	68 x 10 ⁻⁷ /°F
Specific Heat, 25°C	0,79 kJ/kg°C	0.19 Btu/lb°F
Thermal Conductivity, 25°C	1,46 W/m°C	10.16 Btu.in/hrft²°F
Thermal Diffusivity, 25°C	7,3 x 10 ⁻⁷ m²/s	0.028 ft²/hr
Continuous Operating Temperature	800°C	1472°F
Maximum No Load Temperature	1000°C	1832°F

Propriedades Mecânicas do Macor

Figura 55 – Propriedades Mecânicas do Macor

II. Mechanical		
	SI/Metric	Imperial
Density	2,52 g/cm³	157 lbs/ft³
Porosity	0%	0%
Young's Modulus, 25°C (Modulus of Elasticity)	66,9 GPa	9.7 x 10 ⁶ PSI
Poisson's Ratio	0,29	0.29
Shear Modulus, 25°C	25,5 GPa	3.7 x 10 ⁶ PSI
Knoop Hardness, 100g	250 kg/mm²	
Modulus of Rupture, 25°C (Flexural Strength)	94 MPa (Minimum specified average value)	13 600 PSI
Compressive Strength (After polishing)	345 MPa up to 900 MPa	49 900 PSI 130 000 PSI

Propriedades Elétricas do Macor

Figura 56 – Propriedades Elétricas do Macor

III. Electrical		
	SI/Metric	Imperial
Dielectric Constant, 25°C		
1 kHz	6,01	6.01
8,5 GHz	5,64	5.64
Loss Tangent, 25°C		
1 kHz	0,0040	0.0040
8,5 GHz	0,0025	0.0025
Dielectric Strength (AC) avg. 25°C, under 0,3 mm thickness.	45 kV/mm	1143 V/mil
Dielectric Strength (DC) avg. 25°C, under 0,3 mm thickness	129 kV/mm	3277 V/mil
DC Volume Resistivity, 25°C	10^{17} Ohm.cm	10^{17} Ohm.cm

Propriedades Químicas do Macor

Figura 57 – Propriedades Químicas do Macor

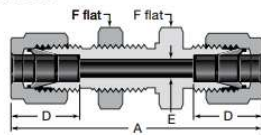
IV. Chemical				
Solution	pH	Time	Temp.	Weight Loss (mg/cm ²) Gravimetric
5% HCl (Hydrochloric Acid)	0,1	24 hrs	95°C	~100
0,002 N HNO ₃ (Nitric Acid)	2,8	24 hrs	95°C	~0,6
0,1 N NaHCO ₃ (Sodium Bicarbonate)	8,4	24 hrs	95°C	~0,3
0,02 N Na ₂ CO ₃ (Sodium Carbonate)	10,9	6 hrs	95°C	~0,1
5% NaOH (Sodium Hydroxide)	13,2	6 hrs	95°C	~10
Chemical durability				Class
DIN 12111 / NF ISO 719		Water		HGB2
DIN 12116		Acid		4
DIN 52322 / ISO 695		Alkali		A3

ANEXO B – Dimensões dos Conectores Herméticos

Dimensões da União Bulkhead

Figura 58 – Tabela de Dimensões da União Bulkhead [in] & [mm]

Unions



Bulkhead Union

Tube OD	Basic Ordering Number	Dimensions					Panel Hole Size	Max Panel Thickness
		A	D	E	F			
Dimensions, in.								
1/16	-100-61	1.24	0.34	0.05	5/16	13/64	0.12 ^①	
1/8	-200-61	2.02	0.50	0.09	1/2	21/64	0.50	
3/16	-300-61	2.11	0.54	0.12	9/16	25/64	0.40	
1/4	-400-61	2.27	0.60	0.19	5/8	29/64	0.40	
5/16	-500-61	2.39	0.64	0.25	11/16	33/64	0.44	
3/8	-600-61	2.45	0.66	0.28	3/4	37/64	0.50	
1/2	-810-61	2.80	0.90	0.41	15/16	49/64	0.50	
5/8	-1010-61	2.86	0.96	0.50	1 1/16	57/64	0.66	
3/4	-1210-61	3.11	0.96	0.62	1 3/16	1 1/64	0.66	
1	-1610-61	3.77	1.23	0.88	1 5/8	1 21/64	0.75	
1 1/4	-2000-61	4.85	1.62	1.09	1 7/8	1 41/64	0.75	
1 1/2	-2400-61	5.48	1.97	1.34	2 1/4	1 61/64	0.75	
2	-3200-61	7.10	2.66	1.81	2 3/4	2 41/64	0.75	
Dimensions, mm								
3	-3M0-61	51.3	12.9	2.4	14	8.3	12.7	
4	-4M0-61	53.6	13.7	2.4		9.9		
6	-6M0-61	57.7	15.3	4.8	16	11.5	10.2	
8	-8M0-61	61.0	16.2	6.4	18	13.1	11.2	
10	-10M0-61	63.7	17.2	7.9	22	16.3		
12	-12M0-61	71.0	22.8	9.5	24	19.5	12.7	
14	-14M0-61	72.5	24.4	11.1	27	22.5		
15	-15M0-61	72.5	24.4	11.9		22.8		
16	-16M0-61	72.5	24.4	12.7		22.8		
18	-18M0-61	78.9	24.4	15.1		30	26.0	16.8
20	-20M0-61	84.5	26.0	15.9	35	29.0	19.0	
25	-25M0-61	96.0	31.3	21.8	41	34.0		
30	-30M0-61	124	39.6	26.2	50	40.5		
32	-32M0-61	128	42.0	28.6		42.5		
38	-38M0-61	145	49.4	33.7		60		50.5

Dimensões dos Ferrules (Anéis de Vedação)

Figura 59 – Tabela de Dimensões dos Ferrules (Anéis de Vedação) [in] & [mm]

Ferrules



Front

Tube OD	Basic Ordering Number
Dimensions, in.	
1/16	-103-1
1/8	-203-1
3/16	-303-1
1/4	-403-1
5/16	-503-1
3/8	-603-1
1/2	-813-1
5/8	-1013-1
3/4	-1213-1
7/8	-1413-1
1	-1613-1
1 1/4	-2003-1 ^①
1 1/2	-2403-1 ^①
2	-3203-1 ^①

^① Over 1 in. and over 25 mm stainless steel front ferrules are PFA coated. To order silver-plated front ferrules, add **-BL** to the basic ordering number.
Example: SS-2003-1**BL**

Tube OD	Basic Ordering Number
Dimensions, mm	
2	-2M3-1
3	-3M3-1
4	-4M3-1
6	-6M3-1
8	-8M3-1
10	-10M3-1
12	-12M3-1
14	-14M3-1
15	-15M3-1
16	-16M3-1
18	-18M3-1
20	-20M3-1
22	-22M3-1
25	-25M3-1
28	-28M3-1 ^①
30	-30M3-1 ^①
32	-32M3-1 ^①
38	-38M3-1 ^①
50	-50M3-1 ^①



Back

Tube OD	Basic Ordering Number
Dimensions, in.	
1/16	-104-1
1/8	-204-1
3/16	-304-1
1/4	-404-1
5/16	-504-1
3/8	-604-1
1/2	-814-1
5/8	-1014-1
3/4	-1214-1
7/8	-1414-1
1	-1614-1
1 1/4	-2004-1 ^①
1 1/2	-2404-1 ^①
2	-3204-1 ^①

^① Over 1 in. and over 25 mm stainless steel back ferrules are PFA coated. To order back ferrules without PFA coating, add **-WC** to the basic ordering number.
Example: SS-2004-1**WC**

Tube OD	Basic Ordering Number
Dimensions, mm	
2	-2M4-1
3	-3M4-1
4	-4M4-1
6	-6M4-1
8	-8M4-1
10	-10M4-1
12	-12M4-1
14	-14M4-1
15	-15M4-1
16	-16M4-1
18	-18M4-1
20	-20M4-1
22	-22M4-1
25	-25M4-1
28	-28M4-1 ^①
30	-30M4-1 ^①
32	-32M4-1 ^①
38	-38M4-1 ^①
50	-50M4-1 ^①