



Universidade de Brasília

Navinchandry B. Ruas

Desenvolvimento de Práticas Eficientes para Propulsores Iônicos: Um Estudo Exploratório

Prof.

Prof.

Brasília, DF
2025

Navinchandry B. Ruas

Desenvolvimento de Práticas Eficientes para Propulsores Iônicos: Um Estudo Exploratório

Investigação e Implementação de Melhores Práticas para Potencializar o
Desempenho e Viabilidade de Propulsão Baseada em Tecnologia Iônica

Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC), apresentado ao Departamento
de Engenharia da Universidade Federal
de Brasília (UnB), como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia da Computação.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Prof.

Prof.

Brasília, ? de ? de 2025

**“Qualquer tecnologia
suficientemente avançada é
indistinguível da magia.”**

Arthur C. Clarke

Resumo

Este estudo tem como objetivo investigar as melhores práticas para maximizar a eficiência de propulsores iônicos de campo elétrico. Serão analisadas diferentes configurações desses propulsores, explorando variações na geometria do canal de descarga, no número e polaridade dos eletrodos, entre outros parâmetros. A pesquisa será conduzida por meio de uma abordagem técnica, envolvendo simulações computacionais e experimentos em laboratório para analisar a eficiência propulsiva. Além disso, serão avaliados os impactos de parâmetros operacionais como fluxo de massa, voltagem aplicada e frequência de operação. Os resultados obtidos permitirão identificar as configurações e metodologias mais eficazes para maximizar a eficiência propulsiva desses dispositivos, com potenciais aplicações em satélites e missões espaciais. Este estudo contribuirá para o desenvolvimento de propulsores iônicos mais eficientes e econômicos, fornecendo insights importantes para a otimização desses sistemas.

Palavras-chave: Propulsores iônicos, Eficiência propulsiva, Simulações computacionais, Experimentos em laboratório, Otimização de sistemas.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Coletor.....	44
Tabela 2 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Emissor	46
Tabela 3 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Isolante.....	48
Tabela 4 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Resfriamento	50
Tabela 5 Cronograma de Desenvolvimento da Pesquisa.....	53
Tabela 6 Plano Orçamentário Detalhado.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modelo A Protótipo Propulsão Iônica	56
Figura 2 Modelo B Protótipo Propulsão Iônica	58

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Justificativa	11
2.1	Motivações.....	11
2.2	Materiais de Estudo	12
3	Objetivos.....	14
3.1	Objetivos Gerais	14
3.2	Objetivos Específicos	15
4	Revisão Bibliográfica	16
4.1	Linha do Tempo	19
4.2	Termos e conceitos importantes	20
4.2.1	Efeito de Field	20
4.2.2	Efeito Corona	21
4.2.3	Eletrodinâmica de Plasmas	22
4.2.4	Propulsão Iônica	22
4.2.5	Magnetohidrodinâmica (MHD)	Erro! Indicador não definido.
5	Metodologia	24
5.1	Propulsor Iônico de Campo Elétrico	25
5.1.1	Características	25
5.1.2	Exemplos de Aplicações	27
5.1.3	Por que um propulsor iônico de campo elétrico?	28
5.1.4	Por que múltiplos estágios?	28
5.2	Abordagem e Questões de Pesquisa	29
5.2.1	Abordagem Metodológica	30
5.2.2	Questões de Pesquisa	31
5.3	Procedimentos para estudo	32

5.4	Procedimentos para simulação.....	33
5.5	Procedimentos para testes experimentais	34
6	Problematização	36
6.1	Propulsores Iônicos de Campo Elétrico	36
6.2	Limitações dos Propulsores Convencionais	37
6.3	Necessidade de Pesquisa Adicional	38
6.4	Análise de Gases de Propulsão.....	39
6.4.1	Gases de Propulsão Analisados	39
6.4.2	Propriedades dos Gases de Propulsão	40
6.5	Análise de Materiais	40
6.5.1	Material para o Coletor (Ânodo).....	41
6.5.2	Material para o Emissor (Cátodo)	44
6.5.3	Material para o Isolante	46
6.5.4	Material para o Resfriamento.....	48
6.5.5	Componentes Adicionais	50
6.6	Outros Fatores Influenciadores.....	51
6.6.1	Configuração do Campo Elétrico	51
6.6.2	Distribuição de Carga Elétrica nos Componentes.....	51
6.6.3	Eficiência da Ionização do Gás Propulsor	52
6.6.4	Design Geral do Sistema de Propulsão	52
6.6.5	Controle e Otimização de Software	52
6.6.6	Componentes e Circuitos Eletrônicos	52
7	Cronograma.....	53
7.1	Plano Orçamentário.....	54
8	Modelo Proposto.....	55
8.1	Simulações	55

8.1.1	Modelo de Protótipo A.....	56
8.1.2	Modelo de Protótipo B	58
8.2	Testes Experimentais.....	60
8.2.1	Teste 01	60
8.2.2	Teste 02	60
8.2.3	Teste 03	60
8.3	Dados Coletados	60
9	Conclusão.....	61
	Referências	62
	APÊNDICES	65

1 INTRODUÇÃO

No cenário da engenharia, os propulsores iônicos de campo elétrico emergem como protagonistas em potencial na busca por sistemas de propulsão mais eficientes e avançados.

Este estudo tem como objetivo mergulhar profundamente na investigação das melhores práticas e configurações que podem otimizar a eficiência dos propulsores iônicos de campo elétrico. A questão central que orienta esta pesquisa é compreender de maneira abrangente e detalhada como uma variedade de fatores, incluindo a geometria do canal de descarga, a polaridade dos eletrodos, o fluxo de massa e outros parâmetros operacionais, influenciam o desempenho propulsivo desses sistemas.

A complexidade inerente aos propulsores iônicos demanda uma abordagem multidisciplinar e rigorosa para sua análise e otimização. Portanto, este estudo adotará uma metodologia abrangente, que combina análises teóricas avançadas com experimentos práticos detalhados. A revisão crítica da literatura existente será o ponto de partida, fornecendo uma base sólida para a investigação empírica que se seguirá.

Além disso, é importante ressaltar que este estudo não apenas se limitará a identificar as melhores práticas teóricas, mas também buscará compreender as implicações práticas de suas descobertas. Para isso, serão consideradas as possíveis aplicações industriais e tecnológicas das conclusões alcançadas, visando impulsionar a inovação no campo da propulsão iônica.

A relevância deste projeto transcende os limites do ambiente acadêmico, tendo o potencial de impactar significativamente o desenvolvimento futuro de tecnologias de propulsão. A otimização dos propulsores iônicos é essencial para impulsionar aplicações em diversos setores, desde a exploração espacial até a propulsão de satélites e veículos não tripulados.

Portanto, este estudo não apenas busca responder a perguntas fundamentais sobre a eficiência dos propulsores iônicos, mas também aspira a catalisar avanços revolucionários no campo da propulsão espacial e além.

2 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica pela urgente necessidade de aprofundar tanto a compreensão teórica quanto a aplicação prática da eficiência propulsiva dos propulsores iônicos de campo elétrico. Em um mundo em constante evolução tecnológica, a engenharia contemporânea demanda soluções cada vez mais avançadas e eficientes, especialmente no que diz respeito à propulsão espacial. Os propulsores iônicos emergem como uma alternativa promissora para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias de propulsão mais sustentáveis e eficazes, capazes de atender às demandas futuras de exploração espacial. Além disso, este estudo visa enriquecer a formação acadêmica e científica dos pesquisadores envolvidos, fornecendo-lhes uma compreensão mais profunda de um campo de pesquisa inovador e em constante evolução. Ao contribuir para o desenvolvimento de novos conhecimentos e abordagens na área de propulsão iônica, este estudo também abre portas para oportunidades de pesquisa adicionais e colaborações interdisciplinares.

2.1 Motivações

As motivações subjacentes a este estudo são fundamentais e multifacetadas. Em primeiro lugar, existe um interesse genuíno na compreensão aprofundada e na aplicação prática dos princípios subjacentes aos propulsores iônicos de campo elétrico. Este interesse não é apenas pessoal, mas também representa um aspecto crucial do desenvolvimento técnico e científico na área da engenharia. Em um contexto mais amplo, a pesquisa e o estudo neste campo desempenham um papel significativo na expansão do conhecimento humano sobre propulsão iônica e no potencial avanço das tecnologias existentes.

Além disso, este trabalho visa aprimorar as habilidades acadêmicas necessárias para a produção de conteúdo científico de alta qualidade. A redação técnica, em particular, desempenha um papel vital na comunicação precisa e eficaz de conceitos complexos e descobertas de pesquisa. Portanto, o processo de elaboração deste trabalho oferece uma

oportunidade valiosa para a prática e o aperfeiçoamento das habilidades de redação científica, que são essenciais não apenas para o presente estudo, mas também para empreendimentos acadêmicos futuros e para a carreira profissional.

Portanto, as motivações para este estudo não se limitam apenas ao âmbito pessoal, mas também abrangem a contribuição para o avanço do conhecimento científico e tecnológico, bem como o desenvolvimento das habilidades acadêmicas essenciais para a redação e comunicação eficazes no contexto científico.

2.2 Materiais de Estudo

Para a condução deste estudo, foram adotadas abordagens meticulosas na coleta e análise de dados, seguindo os preceitos do artesanato intelectual descrito por Gondim (2006). Inicialmente, buscou-se obter uma visão ampla e abrangente dos principais estudos e pesquisas realizados na área de propulsão iônica, utilizando sites especializados e bibliotecas virtuais como fontes primárias de informações. Seguindo as orientações do orientador do projeto, a busca por dados específicos e relevantes foi direcionada, garantindo a precisão e pertinência dos dados coletados.

Nesse sentido, as obras de autores renomados, como Braga (s.d.), forneceram valiosos conhecimentos sobre os fundamentos e aplicações dos propulsores iônicos, enriquecendo a pesquisa com perspectivas práticas e teóricas. Além disso, consultas à Biblioteca Reitor João Herculino (CEUB) e à Biblioteca Central da Universidade de Brasília (BCE/UnB) acrescentaram uma camada adicional de profundidade à pesquisa, proporcionando acesso a uma vasta coleção de recursos acadêmicos e informações atualizadas.

É relevante destacar que este estudo não é apenas uma etapa obrigatória para a conclusão do curso de engenharia, mas sim um compromisso pessoal com a busca por soluções inovadoras e eficazes para os desafios enfrentados na área. A complexidade e relevância do tema escolhido refletem a dedicação em contribuir para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na propulsão espacial.

Portanto, este trabalho representa não apenas a culminação de uma jornada acadêmica e profissional, mas também um testemunho do rigor e comprometimento dedicados à pesquisa científica. Ao seguir uma abordagem metódica e abrangente, e ao integrar insights de autores consagrados e referências bibliográficas relevantes, espera-se que este estudo contribua significativamente para o avanço do campo da propulsão iônica de campo elétrico.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais deste estudo abrangem uma análise metódica da eficiência de diferentes configurações de propulsores iônicos de campo elétrico, visando estudar métodos para otimizar seu desempenho e, conseqüentemente, contribuir para o avanço tecnológico nessa área crucial da engenharia.

Em primeiro lugar, o objetivo primordial é realizar uma investigação aprofundada sobre as características e princípios de funcionamento dos propulsores iônicos de campo elétrico. Essa etapa envolverá uma revisão detalhada da literatura existente, explorando os fundamentos teóricos e práticos que regem o funcionamento desses dispositivos. A compreensão desses aspectos é fundamental para embasar as análises subsequentes e orientar o desenvolvimento de estratégias de otimização.

Ademais, este projeto tem como meta proporcionar um ambiente propício para o desenvolvimento de habilidades de pesquisa e análise científica. Para tanto, serão empregadas metodologias e técnicas avançadas de análise de dados e simulação computacional, visando não apenas aprofundar o conhecimento teórico, mas também promover a capacitação prática dos envolvidos na condução do estudo.

A elaboração de relatórios e documentos científicos também figura como um objetivo crucial deste projeto. A comunicação clara e eficiente dos resultados obtidos é essencial para validar as conclusões alcançadas e facilitar sua disseminação na comunidade científica. Nesse sentido, serão adotadas as normas técnicas e metodologias consagradas na literatura científica, como as descritas em obras como o "Manual de Redação e Estilo da Folha de S. Paulo" (TREVISAN, 2019) e "A Pesquisa Como Artesanato Intelectual" (GONDIM, 2006), garantindo a qualidade e rigor na apresentação dos resultados.

Por fim, espera-se que este estudo contribua significativamente para o avanço do conhecimento na área de propulsão iônica, com foco especial no desenvolvimento e otimização de configurações de propulsores iônicos de campo elétrico. Embora não se

concentre exclusivamente no contexto espacial, a aplicação prática desses avanços poderá ser relevante para futuras missões espaciais de longa duração, oferecendo soluções inovadoras e eficazes para os desafios enfrentados na exploração do espaço sideral.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o impacto da variação da configuração do campo elétrico na eficiência propulsiva dos propulsores iônicos, utilizando simulações computacionais e análises teóricas.
- Comparar o desempenho de diferentes materiais utilizados nos componentes dos propulsores iônicos, como ânodo, cátodo, isolante e sistemas de resfriamento, por meio de testes experimentais e análises de laboratório.
- Analisar a integração dos circuitos eletrônicos de potência e controle com os sistemas de propulsão iônica, avaliando o impacto das características dos componentes eletrônicos na eficiência e estabilidade operacional dos propulsores.
- Identificar e analisar as características fundamentais dos propulsores iônicos de campo elétrico, bem como os principais desafios enfrentados em seu uso, visando compreender os aspectos técnicos e operacionais que influenciam seu desempenho.
- Elaborar um relatório técnico-científico abrangente que documente de forma clara e concisa os resultados da análise e simulação realizadas, adotando as normas e metodologias estabelecidas na literatura científica, com o objetivo de contribuir para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de propulsores iônicos de campo elétrico mais eficientes e viáveis para aplicações espaciais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A propulsão iônica representa uma área de pesquisa de grande interesse no campo da engenharia espacial, oferecendo potencialidades significativas para futuras missões espaciais. No contexto da exploração espacial, a busca por sistemas de propulsão mais eficientes e sustentáveis é uma prioridade constante, impulsionada pela necessidade de reduzir custos, aumentar a durabilidade das missões e explorar regiões cada vez mais distantes do universo. Dentre as diversas variantes da propulsão iônica, os propulsores iônicos de campo elétrico emergem como uma opção promissora devido à sua eficiência propulsiva e ao seu potencial para aplicações em ambientes espaciais desafiadores.

A literatura científica tem testemunhado um crescente interesse por parte da comunidade acadêmica e da indústria aeroespacial em relação aos propulsores iônicos de campo elétrico, motivado pela busca por tecnologias de propulsão mais avançadas e eficazes. Essa tecnologia tem a capacidade de oferecer níveis excepcionais de eficiência propulsiva em comparação com os sistemas de propulsão convencionais, como os motores de foguete químico. Além disso, os propulsores iônicos de campo elétrico apresentam a vantagem de serem mais sustentáveis em termos de consumo de combustível e produção de resíduos, o que os torna especialmente atraentes para missões de longa duração no espaço.

No entanto, apesar das promessas oferecidas pelos propulsores iônicos de campo elétrico, há uma série de desafios técnicos e científicos a serem superados para tornar essa tecnologia uma realidade prática e viável para missões espaciais. Entre esses desafios, destacam-se questões relacionadas à eficiência energética, durabilidade dos materiais, controle preciso da trajetória da espaçonave e integração com outros sistemas a bordo. A compreensão e o domínio desses desafios são essenciais para o avanço e a adoção generalizada dos propulsores iônicos de campo elétrico na exploração do espaço.

Portanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos nesse campo são fundamentais para impulsionar a próxima geração de tecnologias de propulsão e possibilitar avanços significativos na exploração do espaço. Ao explorar as potencialidades dos propulsores iônicos de campo elétrico, os cientistas e engenheiros espaciais estão abrindo novas

fronteiras no conhecimento humano e preparando o terreno para futuras conquistas no espaço sideral.

Segundo Marrese-Reading, Polk, Mueller, & Owens (2001), os propulsores iônicos de emissão de campo (FEEP) operam com base no princípio de extração de íons de um líquido iônico, que é submetido a um campo elétrico, e sua subsequente aceleração através de um acelerador de campo elétrico. Esse líquido iônico é então expelido através de um bocal de exaustão, gerando o impulso necessário para propulsionar o veículo espacial.

As pesquisas de Pu (2021) enfocam principalmente as técnicas de modelagem e simulação de propulsores iônicos de campo elétrico, demonstrando resultados promissores em termos de previsão de desempenho e otimização do projeto. Os autores ressaltam a importância do desenvolvimento de modelos teóricos precisos e realistas, capazes de simular com precisão o comportamento dos íons no campo elétrico do propulsor.

Já Sánchez Lara (2016) realizou um estudo detalhado sobre o design e a análise de desempenho de um propulsor iônico, destacando que, dada a evolução do mercado espacial para soluções de baixo custo, a propulsão elétrica tenderá a superar os dispositivos químicos tradicionais nos próximos anos.

No entanto, apesar dos avanços significativos alcançados por essas pesquisas, ainda há lacunas e desafios a serem enfrentados. A presente pesquisa busca avançar na compreensão dos efeitos de diferentes materiais e configurações geométricas na eficiência e desempenho dos propulsores iônicos de campo elétrico, com ênfase na redução de custos sem comprometer a qualidade. Além disso, pretende-se realizar experimentos em escala reduzida para complementar as investigações teóricas e numéricas realizadas por outros pesquisadores.

A revisão bibliográfica abrange uma ampla gama de tópicos, desde estudos sobre a física fundamental dos propulsores iônicos até pesquisas aplicadas sobre técnicas de modelagem, simulação e design de propulsores. A análise crítica desses estudos é essencial para identificar lacunas no conhecimento existente e orientar o desenvolvimento de novas pesquisas.

Nesse contexto, há um interesse significativo na otimização e desenvolvimento contínuo dos propulsores iônicos de campo elétrico, visando aprimorar sua eficiência,

confiabilidade e aplicabilidade em missões espaciais futuras. O aprofundamento desses estudos contribuirá para o avanço da engenharia espacial e para a exploração mais eficiente e sustentável do espaço exterior.

Ao adentrar o campo da propulsão iônica, é essencial compreender a evolução histórica e o estado atual das pesquisas nessa área. Newton C. Braga, renomado pesquisador brasileiro na área de eletrônica e tecnologia, destaca a importância de entender os princípios fundamentais por trás dos propulsores iônicos em suas diversas variantes. Em suas obras, como "Motor Iônico – Construindo seu Protótipo" (Braga, s.d.), ele fornece insights valiosos sobre a construção e funcionamento desses dispositivos, contribuindo para a disseminação do conhecimento nesse campo.

Além disso, estudos como o de Marrese-Reading, Polk, Mueller e Owens (2001) lançam luz sobre aspectos específicos da propulsão iônica de campo elétrico. Em seu trabalho sobre o "In-FEEP Thruster Ion Beam Neutralization with Thermionic and Field Emission Cathodes", os autores exploram detalhadamente os mecanismos de neutralização do feixe iônico, fornecendo informações cruciais para o aprimoramento do desempenho desses propulsores.

Pu (2021) oferece uma perspectiva atualizada sobre o tema, ao investigar métodos numéricos e experimentais para simular e pesquisar propulsores iônicos de campo elétrico. Sua pesquisa, publicada em "Numerical simulation and experimental research of LRIT-30 radio frequency ion thruster", representa um avanço significativo na compreensão e otimização desses dispositivos.

Assim, ao revisar a literatura existente e analisar as contribuições de diversos pesquisadores, é possível obter uma visão abrangente e aprofundada sobre os propulsores iônicos de campo elétrico e os desafios que permeiam sua otimização e aplicação em missões espaciais. Essa revisão bibliográfica é fundamental para embasar o desenvolvimento de novas pesquisas e para o avanço do conhecimento nesse campo em constante evolução.

4.1 Linha do Tempo

Teorização Inicial (Século XIX)

Durante o século XIX, os cientistas começaram a explorar os princípios básicos da eletricidade e do magnetismo, fornecendo as bases teóricas para o desenvolvimento futuro dos propulsores de campo elétrico.

Experiências de Crookes e Plücker (Meados do Século XIX)

William Crookes e Julius Plücker conduziram experimentos pioneiros com tubos de descarga, que contribuíram para o entendimento da interação entre campos elétricos e gás ionizado, um conceito fundamental para os propulsores de campo elétrico.

Desenvolvimento do Efeito Corona (Início do Século XX)

No início do século XX, os cientistas começaram a explorar o fenômeno do efeito corona, no qual um campo elétrico intenso pode ionizar o gás circundante. Essa descoberta foi fundamental para o desenvolvimento dos propulsores de campo elétrico.

Propulsores de Campo Elétrico na Ficção Científica (Décadas de 1920-1930)

Durante as décadas de 1920 e 1930, os propulsores de campo elétrico começaram a aparecer na literatura de ficção científica, alimentando o interesse público e científico nessa tecnologia emergente.

Experimentos de Goddard e Tsiolkovsky (Décadas de 1930-1940)

Robert H. Goddard, nos Estados Unidos, e Konstantin Tsiolkovsky, na União Soviética, conduziram experimentos importantes com propulsores de campo elétrico durante as décadas de 1930 e 1940, demonstrando sua viabilidade para aplicações espaciais.

Desenvolvimento de Propulsores de Campo Elétrico (Décadas de 1950-1960)

Durante as décadas de 1950 e 1960, ocorreu um aumento significativo na pesquisa e desenvolvimento de propulsores de campo elétrico, impulsionado pela corrida espacial entre os Estados Unidos e a União Soviética.

Testes Espaciais Iniciais (Década de 1960)

Na década de 1960, os primeiros testes espaciais com propulsores de campo elétrico foram realizados, incluindo experimentos em satélites e sondas espaciais para avaliar a eficácia dessa tecnologia no ambiente espacial.

Avanços na Tecnologia (Décadas de 1970-1980)

Nas décadas de 1970 e 1980, ocorreram avanços significativos na tecnologia de propulsores de campo elétrico, com melhorias no design, eficiência e confiabilidade desses sistemas.

Adoção Comercial (Décadas de 1990-Presente)

A partir da década de 1990, os propulsores de campo elétrico começaram a ser adotados em missões espaciais comerciais, com empresas privadas e agências governamentais utilizando essa tecnologia para melhorar a eficiência e reduzir os custos de lançamento.

Pesquisa Contínua e Inovação Futura

Atualmente, a pesquisa em propulsores de campo elétrico continua avançando, com ênfase na otimização do desempenho, redução de massa e aumento da confiabilidade desses sistemas para futuras missões espaciais e exploração interplanetária. Novos avanços tecnológicos e descobertas científicas estão moldando o futuro dos propulsores de campo elétrico.

4.2 Termos e conceitos importantes

4.2.1 Efeito de Field

O efeito das pontas, também conhecido como efeito de Field, é um fenômeno fundamental na física que ocorre quando um corpo carregado com uma alta tensão tende

a expulsar as cargas elétricas pelas regiões pontiagudas de sua superfície. Este fenômeno, descrito por diversos pesquisadores ao longo da história, incluindo Charles Augustin de Coulomb e Johann Philipp Reis, tem sido amplamente estudado devido à sua relevância em várias aplicações e suas implicações em sistemas elétricos.

Conforme mencionado por Newton C. Braga, um pesquisador renomado na área de eletrônica e tecnologia, o efeito de Field é de grande importância prática. Ele desempenha um papel crucial em dispositivos como geradores de ozônio, fontes de plasma e instrumentos de medição elétrica (BRAGA, s. d.). No entanto, é importante ressaltar que, embora o efeito das pontas seja útil em muitas situações, ele pode resultar em problemas indesejados, especialmente em linhas de transmissão elétrica de alta tensão. Esses problemas incluem perdas de energia, interferência eletromagnética e até mesmo riscos para a segurança dos equipamentos e operadores.

4.2.2 Efeito Corona

O efeito corona é outro fenômeno elétrico de importância significativa, ocorrendo quando um campo elétrico intenso é aplicado a um objeto condutor. Esse fenômeno resulta na formação de uma região de alta densidade de elétrons ionizados ao redor do objeto. O efeito corona é observado em uma variedade de contextos, incluindo linhas de transmissão de alta tensão, antenas de rádio e transformadores elétricos.

Embora o efeito corona seja utilizado de forma benéfica em algumas aplicações, como na operação eficiente de sistemas de transmissão de energia elétrica, ele também pode apresentar desafios. Por exemplo, a descarga corona pode causar interferência em sistemas de comunicação e danos a equipamentos eletrônicos sensíveis. Portanto, compreender os mecanismos e os efeitos do efeito corona é essencial para garantir o funcionamento adequado e seguro de sistemas elétricos e eletrônicos.

4.2.3 Eletrodinâmica de Plasmas

A eletrodinâmica de plasmas é um campo da física dedicado ao estudo do comportamento de gases ionizados, conhecidos como plasmas, nos quais as partículas estão carregadas eletricamente. Estes plasmas são encontrados em uma variedade de ambientes, desde laboratórios de pesquisa até fenômenos naturais como relâmpagos e auroras. Compreender a eletrodinâmica de plasmas é essencial para avançar em diversas tecnologias, incluindo geração de energia, propulsão espacial e fusão nuclear controlada.

No contexto da propulsão iônica, um aspecto importante é o estudo do campo elétrico, que desempenha um papel crucial no controle e direcionamento dos íons para gerar o impulso necessário para propulsionar uma espaçonave. Entender como os campos elétricos interagem com os plasmas é fundamental para otimizar o desempenho e a eficiência desses sistemas de propulsão.

4.2.4 Propulsão Iônica

A propulsão iônica é uma avançada tecnologia de propulsão espacial que utiliza a aceleração de íons para gerar impulso. Diferentemente dos motores convencionais que queimam combustível, a propulsão iônica opera através da ionização de um gás propulsor, geralmente xenônio, e acelera os íons resultantes usando campos elétricos. Essa abordagem resulta em uma eficiência notável e economia significativa de combustível em comparação com os sistemas de propulsão tradicionais.

A aplicação da propulsão iônica tem sido especialmente vantajosa em missões espaciais de longa duração, nas quais a economia de combustível e a eficiência são cruciais. Agências espaciais renomadas, como a NASA, têm empregado essa tecnologia em diversas missões, incluindo a exploração de asteroides, sondas interplanetárias e satélites de comunicação.

O contínuo desenvolvimento da propulsão iônica é fundamental para viabilizar missões espaciais cada vez mais ambiciosas e sustentáveis. Avanços na eficiência dos propulsores iônicos, na miniaturização dos sistemas e no aumento da potência disponível para esses sistemas estão abrindo portas para novas possibilidades de exploração espacial.

5 METODOLOGIA

A pesquisa científica voltada para a otimização de propulsores iônicos de campo elétrico demanda uma metodologia metódica e abrangente, capaz de lidar com a complexidade dos fenômenos observados nesse campo. Diante dessa exigência, a adoção de uma abordagem empírica se torna crucial, uma vez que viabiliza a coleta e análise de dados de pesquisa de campo, fundamentais para a compreensão dos mecanismos físicos subjacentes e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de otimização.

A justificativa para a escolha da abordagem empírica reside na peculiaridade dos fenômenos observados nos propulsores iônicos de campo elétrico, os quais ainda demandam uma exploração detalhada na literatura científica. Portanto, a coleta e análise de dados de pesquisa de campo se revelam indispensáveis para uma compreensão completa e aprofundada desses sistemas de propulsão, permitindo uma investigação direta e precisa de suas características e desafios.

É crucial destacar que os dados de pesquisa a serem empregados nesta análise possuem uma natureza dual, abrangendo tanto aspectos qualitativos quanto quantitativos. Enquanto a natureza qualitativa dos dados possibilita uma análise subjetiva e detalhada das observações, a natureza quantitativa possibilita a realização de análises estatísticas que podem fornecer insights valiosos sobre o desempenho dos propulsores iônicos de campo elétrico.

Portanto, a abordagem empírica, combinada à coleta e análise de dados de pesquisa de campo, emerge como um método robusto e eficaz para a otimização desses propulsores. Por meio dessa metodologia, não apenas se almeja avançar na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, mas também contribuir para o desenvolvimento de tecnologias de propulsão mais eficientes e sustentáveis, impulsionando assim seu progresso.

5.1 Propulsor Iônico de Campo Elétrico

A propulsão iônica de campo elétrico representa uma avançada tecnologia de propulsão que opera por meio da aceleração de íons para gerar impulso. Esse método revolucionário utiliza um propulsor elétrico que primeiro ioniza o gás de propulsão, em seguida, acelera os íons resultantes por meio de um campo elétrico e os expulsa a alta velocidade para produzir empuxo.

Um dos avanços notáveis nesse campo é o desenvolvimento do propulsor iônico de campo elétrico de estágio múltiplo, composto por dois ou mais estágios de aceleração. Cada estágio é constituído por uma grade eletricamente carregada, responsável por acelerar os íons em direção ao próximo estágio. Com cada estágio, a velocidade dos íons é aumentada, resultando em um impulso cada vez maior.

A eficiência do propulsor iônico de campo elétrico de estágio múltiplo depende diretamente da eficácia do processo de ionização e aceleração. A ionização pode ser realizada por meio de descarga elétrica ou por uma fonte de plasma, enquanto a aceleração é obtida através da aplicação de um campo elétrico sobre as grades do propulsor. Essa combinação de tecnologias avançadas permite um desempenho excepcional e uma eficiência notável na geração de impulso para a propulsão espacial.

5.1.1 Características

As características dos propulsores iônicos de campo elétrico são diretamente relacionadas ao seu princípio de funcionamento. As principais características desses propulsores incluem:

Baixa taxa de fluxo de massa: os propulsores iônicos de campo elétrico possuem uma taxa de fluxo de massa muito menor em comparação com os motores de combustão química. Isso se deve ao fato de que os propulsores iônicos aceleram apenas um pequeno

número de partículas a altas velocidades, em vez de produzir uma grande quantidade de gás quente em alta velocidade.

Alta velocidade de exaustão: embora a taxa de fluxo de massa seja baixa, a velocidade de exaustão é, geralmente, extremamente alta. Isso ocorre porque os íons acelerados atingem velocidades muito altas, o que resulta em um impulso específico muito maior em comparação com os motores de combustão química.

Alta eficiência: a eficiência dos propulsores iônicos de campo elétrico é muito maior do que a dos motores de combustão química. Isso ocorre porque a energia elétrica usada para ionizar o gás é convertida diretamente em energia cinética dos íons acelerados, sem perda significativa de energia térmica.

Longa vida útil: como os propulsores iônicos de campo elétrico possuem uma taxa de fluxo de massa muito baixa, eles usam muito pouco propelente em comparação com os motores de combustão química. Isso significa que a vida útil desses propulsores é muito maior, pois requerem menos combustível para operar.

Baixa empuxo: um dos principais desafios dos propulsores iônicos de campo elétrico é que eles geram um empuxo muito baixo em comparação com os motores de combustão química. Isso significa que eles são adequados apenas para missões que exigem um empuxo muito baixo, mas com uma alta eficiência, geralmente missões espaciais.

Requerem fonte de energia: para operar, os propulsores iônicos de campo elétrico exigem uma fonte de energia externa, geralmente painéis solares ou baterias. Isso significa que eles não podem ser usados para missões em que a fonte de energia é limitada ou inexistente.

Velocidade constante: ao contrário dos propulsores químicos, que perdem eficiência à medida que o combustível é consumido, os propulsores iônicos de campo elétrico podem manter uma velocidade constante por longos períodos, o que os torna ideais para missões de longa duração.

Limitações de altitude: devido à baixa densidade do meio interestelar, os propulsores iônicos de campo elétrico são menos eficazes em altitudes muito altas, o que limita sua utilidade para missões além da órbita terrestre.

Complexidade e fragilidade: os propulsores iônicos de campo elétrico são muito complexos e exigem cuidadoso manuseio, o que pode torná-los mais caros e mais propensos a falhas do que outros tipos de propulsores.

Em resumo, as principais características dos propulsores iônicos de campo elétrico incluem baixa taxa de fluxo de massa, alta velocidade de exaustão, alta eficiência, longa vida útil, baixo empuxo e exigem fonte de energia externa.

5.1.2 Exemplos de Aplicações

Os propulsores iônicos de campo elétrico são utilizados em diversas aplicações, desde missões espaciais até satélites de comunicação. Esses propulsores são ideais para missões espaciais de longa duração e baixa potência, pois permitem um consumo reduzido de combustível e uma maior eficiência propulsiva em comparação com outros tipos de propulsores. Além disso, eles também são utilizados em satélites de comunicação para manobras orbitais e correções de trajetória.

Um exemplo de aplicação de propulsores iônicos de campo elétrico é a sonda espacial Dawn, lançada em 2007 pela NASA. A sonda usou um propulsor iônico de campo elétrico para chegar aos planetas anões Ceres e Vesta. O propulsor permitiu que a sonda viajasse a uma velocidade constante por um longo período, economizando uma grande quantidade de combustível em comparação com os propulsores convencionais.

Outro exemplo é o satélite de comunicação europeu ARTEMIS, que foi equipado com um propulsor iônico de campo elétrico para manter sua órbita e realizar manobras orbitais. Esse propulsor permitiu que o satélite mantivesse sua posição no espaço com uma eficiência energética significativamente maior do que os propulsores convencionais.

Em resumo, os propulsores iônicos de campo elétrico são amplamente utilizados em missões espaciais de longa duração e baixa potência, bem como em satélites de comunicação para manobras orbitais e correções de trajetória, devido à sua maior eficiência propulsiva e economia de combustível.

5.1.3 Por que um propulsor iônico de campo elétrico?

A escolha de um propulsor iônico de campo elétrico para a propulsão espacial é motivada por diversos fatores. Primeiramente, essa tecnologia é capaz de gerar altos valores de impulso específico, ou seja, é capaz de gerar uma grande quantidade de empuxo para cada unidade de massa de propulsor consumida.

Além disso, propulsores iônicos de campo elétrico são conhecidos por sua alta eficiência energética. Isso se deve ao fato de que esses propulsores utilizam eletricidade para ionizar o gás de propulsão e acelerar os íons resultantes. Como a eletricidade pode ser gerada a partir de fontes renováveis, como painéis solares, propulsores iônicos de campo elétrico podem ser uma opção mais sustentável para a propulsão espacial.

Outra vantagem dos propulsores iônicos de campo elétrico é a simplicidade de seu design e construção. Diferentemente de outras tecnologias de propulsão, como motores de foguete químico, os propulsores iônicos de campo elétrico não requerem a queima de combustível e não possuem partes móveis complexas. Isso reduz os custos de produção e manutenção, tornando-os uma opção mais viável em termos de custo-benefício.

Por fim, os custos materiais de protótipo de propulsores iônicos de campo elétrico também são reduzidos, pois a maioria dos materiais necessários para a construção desses propulsores já são amplamente utilizados na indústria de semicondutores. Isso significa que a produção em larga escala de propulsores iônicos de campo elétrico pode ser mais facilmente implementada.

5.1.4 Por que múltiplos estágios?

A propulsão iônica de campo elétrico representa uma avançada tecnologia de propulsão que opera por meio da aceleração de íons para gerar impulso. Esse método revolucionário utiliza um propulsor elétrico que primeiro ioniza o gás de propulsão, em

seguida, acelera os íons resultantes por meio de um campo elétrico e os expulsa a alta velocidade para produzir empuxo.

Um dos avanços notáveis nesse campo é o desenvolvimento do propulsor iônico de campo elétrico de estágio múltiplo, composto por dois ou mais estágios de aceleração. Cada estágio é constituído por uma grade eletricamente carregada, responsável por acelerar os íons em direção ao próximo estágio. Com cada estágio, a velocidade dos íons é aumentada, resultando em um impulso cada vez maior.

A eficiência do propulsor iônico de campo elétrico de estágio múltiplo depende diretamente da eficácia do processo de ionização e aceleração. A ionização pode ser realizada por meio de descarga elétrica ou por uma fonte de plasma, enquanto a aceleração é obtida através da aplicação de um campo elétrico sobre as grades do propulsor. Essa combinação de tecnologias avançadas permite um desempenho excepcional e uma eficiência notável na geração de impulso para a propulsão espacial.

Para o desenvolvimento do protótipo do propulsor iônico de campo elétrico de estágio múltiplo, será necessário considerar diversos aspectos. Primeiramente, precisamos definir os materiais e componentes que serão utilizados na construção das grades de aceleração e dos sistemas de ionização. Além disso, é crucial determinar as dimensões e geometria do propulsor, levando em conta restrições de espaço e peso.

5.2 Abordagem e Questões de Pesquisa

Nesta seção, delinearemos a abordagem metodológica adotada para investigar as questões-chave relacionadas ao desenvolvimento e otimização de propulsores iônicos de campo elétrico. A metodologia proposta visa fornecer uma estrutura clara para a condução da pesquisa, estabelecendo o escopo e os métodos utilizados para abordar as questões levantadas.

5.2.1 Abordagem Metodológica

Para atingir os objetivos desta pesquisa, adotaremos uma abordagem multifacetada, combinando métodos teóricos e experimentais. Isso nos permitirá abordar as complexidades envolvidas na otimização de propulsores iônicos de campo elétrico de maneira abrangente e sistemática. A abordagem metodológica consistirá nos seguintes passos:

Revisão da Literatura:

Faremos uma revisão abrangente da literatura existente sobre propulsão iônica de campo elétrico, explorando estudos anteriores, teorias fundamentais e avanços recentes na área. Isso nos permitirá contextualizar nossa pesquisa dentro do corpo de conhecimento existente e identificar lacunas a serem abordadas.

Definição das Questões de Pesquisa:

Com base na revisão da literatura e nos objetivos da pesquisa, formularemos questões específicas que orientarão nossa investigação. Estas questões abordarão aspectos cruciais do desenvolvimento e otimização de propulsores iônicos de campo elétrico e servirão como guia para nossas análises e conclusões futuras.

Desenvolvimento do Protótipo:

Projetaremos e construiremos um protótipo de propulsor iônico de campo elétrico, levando em consideração as melhores práticas e os requisitos específicos identificados em nossa revisão da literatura. Isso incluirá a seleção de materiais adequados para as grades de aceleração, o dimensionamento e a disposição dos diferentes estágios de aceleração, bem como a escolha da fonte de energia para alimentar o sistema de ionização.

Execução de Testes e Análises:

Realizaremos uma série de testes de desempenho e eficiência do protótipo em ambiente simulado ou em condições reais. Durante esses testes, monitoraremos cuidadosamente uma variedade de parâmetros relevantes para avaliar a eficácia do

propulsor iônico, incluindo o impulso gerado, a eficiência do processo de ionização e aceleração, entre outros.

Análise e Interpretação dos Resultados:

Analisaremos os dados coletados durante os testes e interpretaremos os resultados à luz das questões de pesquisa definidas anteriormente. Isso nos permitirá avaliar o desempenho do protótipo em relação aos requisitos estabelecidos e identificar áreas de melhoria e otimização.

5.2.2 Questões de Pesquisa

As seguintes questões orientarão nossa pesquisa e fornecerão uma estrutura clara para nossos métodos e análises subsequentes:

1. Qual será o material mais adequado para as grades de aceleração do propulsor iônico?
2. Como será a disposição dos diferentes estágios de aceleração no protótipo?
3. Qual será a fonte de energia utilizada para alimentar o sistema de ionização?
4. Quais serão os métodos de controle e monitoramento do campo elétrico aplicado às grades?
5. Como serão realizados os testes de desempenho e eficiência do protótipo em ambiente simulado ou em condições reais?
6. Quais parâmetros serão monitorados durante os testes para avaliar a eficácia do propulsor iônico?
7. Quais são as expectativas em relação ao impulso gerado pelo protótipo em comparação com modelos teóricos ou similares existentes?
8. Quais medidas de segurança serão implementadas durante a montagem e operação do protótipo?
9. Qual será a estratégia para a integração do propulsor iônico ao veículo espacial ou à plataforma de teste?

10. Como será realizada a validação do protótipo em relação aos requisitos de desempenho e eficiência estabelecidos?

Essas questões serão abordadas ao longo da pesquisa, guiando nossas análises e contribuindo para o avanço do conhecimento no campo da propulsão iônica de campo elétrico.

5.3 Procedimentos para estudo

Para assegurar a robustez e a abrangência deste estudo, foram empregados diversos procedimentos metodológicos, visando uma compreensão profunda e precisa do tema em questão.

Inicialmente, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica extensiva, utilizando recursos disponíveis na biblioteca do CEUB, assim como fontes recomendadas por professores. Essa etapa foi fundamental para a obtenção de informações teóricas e técnicas sobre propulsores iônicos de campo elétrico e suas aplicações na engenharia aeroespacial. Além disso, consultas regulares foram realizadas com outros professores, enriquecendo ainda mais o embasamento teórico e atendendo aos requisitos acadêmicos do projeto.

Durante o desenvolvimento do estudo, foram promovidas discussões e consultas periódicas com o professor orientador, cuja orientação foi essencial para o aprofundamento e análise dos conceitos abordados.

Para complementar e enriquecer a análise, foram utilizados documentos acadêmicos, artigos científicos e outras fontes relevantes. Mesmo que não citados diretamente, esses materiais serão devidamente referenciados na bibliografia do trabalho.

Também, foram empregadas ferramentas modernas, como BING AI e ChatGPT, para análise de informações e embasamento teórico, contribuindo para uma compreensão mais ampla e atualizada do tema. Paralelamente, pesquisas online foram conduzidas para obter insights adicionais e diversas perspectivas sobre propulsores iônicos de campo elétrico.

Além das fontes tradicionais, foram utilizadas diversas ferramentas e linguagens de programação durante o desenvolvimento deste estudo. Ferramentas como Word e Excel foram empregadas para organização e análise de dados, enquanto linguagens como R, Quarto, Markdown, LaTeX e Python foram utilizadas para processamento e visualização de informações. Essa diversidade de ferramentas proporcionou uma abordagem mais completa e eficiente na condução da pesquisa.

Considerando a importância da literatura especializada, destacam-se alguns itens significativos da bibliografia consultada. Dentre eles, os trabalhos de Braga (s.d.) sobre motores iônicos forneceram valiosas orientações práticas para o desenvolvimento de protótipos, disponíveis nos links do Instituto NCB. Além disso, o livro "Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters" de Goebel e Katz (2008) ofereceu uma base sólida de conhecimento teórico sobre propulsão elétrica. Outros artigos, como o de Raitse e Fisch (2009) sobre propulsão de plasma para missões espaciais, e o estudo de Pu (2021) sobre simulação numérica e pesquisa experimental de propulsores de íons de radiofrequência, contribuíram significativamente para a compreensão e análise do tema.

Esses procedimentos metodológicos combinados garantiram uma análise completa e embasada, essencial para o desenvolvimento do estudo e a sua contribuição para o conhecimento científico na área de propulsão iônica de campo elétrico.

5.4 Procedimentos para simulação

Para a simulação dos modelos, foi adotada a plataforma Tinkercad, uma ferramenta amplamente reconhecida pela sua capacidade de criar modelos 3D de forma intuitiva e acessível. O uso do Tinkercad permitiu a elaboração de modelos básicos dos propulsores iônicos de campo elétrico, oferecendo uma representação visual dos componentes e da disposição espacial dos elementos-chave. Essa abordagem facilitou a compreensão da configuração dos propulsores e proporcionou um ambiente virtual para experimentação e análise preliminar.

A escolha do Tinkercad como plataforma de simulação foi motivada pela sua interface amigável e pela sua versatilidade em criar modelos tridimensionais de forma rápida e eficiente. Além disso, a ferramenta oferece recursos para a manipulação e ajuste dos modelos, permitindo a exploração de diferentes configurações e cenários de operação.

Ademais, a utilização do Tinkercad possibilitou a realização de experimentações virtuais, onde diferentes parâmetros e configurações puderam ser testados e avaliados sem a necessidade de prototipagem física. Isso resultou em um processo mais ágil e econômico de análise e refinamento dos modelos, contribuindo para o avanço do estudo sobre propulsão iônica de campo elétrico.

5.5 Procedimentos para testes experimentais

Para os testes experimentais e a construção do protótipo, será necessário o acesso a laboratórios especializados equipados com os recursos necessários para realizar as avaliações planejadas. Esses laboratórios oferecerão o ambiente adequado para conduzir os experimentos de forma controlada e precisa.

Os testes têm como principal objetivo avaliar a configuração e o desempenho dos modelos desenvolvidos durante a fase de simulação. Serão realizadas medições de diversos parâmetros, incluindo a eficiência na coleta de íons, a propulsão gerada e outros aspectos relevantes para validar a eficácia do sistema proposto.

Durante os testes experimentais, serão empregados equipamentos de medição e análise específicos para registrar dados precisos e confiáveis. Será dada especial atenção à calibração adequada desses equipamentos para garantir resultados consistentes e comparáveis.

A construção do protótipo envolverá a montagem dos componentes necessários de acordo com o projeto desenvolvido. Será dada ênfase à precisão na montagem e à integridade dos materiais utilizados para garantir a funcionalidade e a segurança do protótipo.

Além disso, serão realizados testes de funcionamento preliminares para verificar a integridade e o desempenho dos sistemas antes de prosseguir com os testes mais avançados. Qualquer ajuste ou otimização necessário será realizado durante essa fase para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

Ao final dos testes experimentais e da construção do protótipo, os dados coletados serão analisados e interpretados para avaliar a viabilidade e eficácia do sistema proposto. Essa análise será fundamental para orientar futuras etapas de desenvolvimento e refinamento do projeto.

6 PROBLEMATIZAÇÃO

A problematização deste projeto visa a maximização da eficiência propulsiva em propulsores iônicos de campo elétrico, por meio da investigação das melhores práticas e do desenvolvimento de metodologias para análise de diferentes configurações. O principal desafio reside em encontrar a configuração ideal para alcançar uma eficiência otimizada, o que demanda a realização de estudos teóricos e experimentais abrangentes. Esses estudos têm como objetivo avaliar o desempenho de diversas configurações e materiais, além de identificar possíveis limitações e custos envolvidos na implementação dessas configurações. Ao abordar essa questão, este projeto busca contribuir para o avanço na área de propulsão espacial, oferecendo soluções mais eficazes e sustentáveis para as demandas crescentes da exploração espacial.

6.1 Propulsores Iônicos de Campo Elétrico

Os propulsores iônicos de campo elétrico são dispositivos de propulsão que utilizam a interação entre campos elétricos e íons para gerar empuxo. O princípio de funcionamento desses propulsores é baseado na ionização de um gás de propulsão, que é então acelerado por meio de um campo elétrico aplicado. A ionização do gás é geralmente realizada por meio de um processo de descarga elétrica, como o arco elétrico ou o efeito corona.

O gás usado nos propulsores iônicos de campo elétrico geralmente é quimicamente neutro, mas eletricamente carregado após a ionização. O ar ambiente não é um gás adequado para ser utilizado como propulsor em propulsores iônicos de campo elétrico. Esses propulsores requerem um gás específico, como xenônio ou argônio, que é ionizado por um campo elétrico para produzir um impulso. O ar ambiente é composto principalmente por nitrogênio e oxigênio, que têm propriedades químicas e físicas diferentes do gás utilizado nesses propulsores, o que limita sua aplicação. Porém, ar ambiente pode ser utilizado para fins acadêmicos em experimentos relacionados à propulsão iônica de campo

elétrico, desde que devidamente preparado e purificado para garantir a qualidade e consistência dos resultados.

Após a ionização, os íons são acelerados por meio de um campo elétrico aplicado e, em seguida, são ejetados do propulsor a uma velocidade, gerando o empuxo necessário para a propulsão. A força gerada por esses propulsores é diretamente proporcional ao fluxo de massa de íons e à velocidade de ejeção dos íons.

Um dos principais benefícios dos propulsores iônicos de campo elétrico é sua eficiência, que é significativamente maior do que a dos propulsores químicos convencionais. Além disso, esses propulsores têm um tempo de vida útil muito longo, pois sua propulsão é menos agressiva. No entanto, uma desvantagem dos propulsores iônicos de campo elétrico é sua baixa capacidade de empuxo, o que limita sua aplicabilidade em algumas situações.

Os propulsores iônicos são frequentemente utilizados em missões espaciais, como satélites, sondas espaciais e espaçonaves. Além disso, esses propulsores têm sido estudados para uso em voos interplanetários de longa duração, devido à sua eficiência e longa vida útil.

6.2 Limitações dos Propulsores Convencionais

Os propulsores convencionais, baseados em combustíveis químicos, enfrentam várias limitações significativas em termos de eficiência, sustentabilidade e custos operacionais. Em contraste com os propulsores iônicos, que oferecem uma alternativa promissora, os propulsores químicos são limitados pela necessidade de combustíveis tradicionais, como hidrogênio ou hidrazina. Esses combustíveis têm densidades específicas relativamente baixas e, portanto, exigem grandes volumes para fornecer impulso adequado, resultando em sistemas de propulsão volumosos e pesados. Além disso, os propulsores químicos tendem a ter eficiências relativamente baixas e produzem resíduos nocivos que podem impactar negativamente o meio ambiente. Essas limitações destacam

a importância de explorar alternativas mais eficientes e sustentáveis, como os propulsores iônicos de campo elétrico.

6.3 Necessidade de Pesquisa Adicional

A Necessidade de Pesquisa Adicional revela a complexidade e as nuances envolvidas no desenvolvimento e aprimoramento dos propulsores iônicos de campo elétrico. Embora esses propulsores ofereçam vantagens substanciais em termos de eficiência e sustentabilidade, há várias áreas que exigem investigação adicional para otimizar seu desempenho e viabilidade prática.

Uma área crítica de pesquisa é a otimização do processo de ionização do gás de propulsão. A eficiência desse processo tem um impacto direto no desempenho geral do propulsor, tornando essencial explorar técnicas que melhorem a eficiência de ionização e minimizem perdas energéticas.

Além disso, a seleção dos materiais adequados para os componentes do propulsor, como o ânodo, o cátodo e o isolante, é fundamental para garantir a durabilidade e a eficácia do sistema. A pesquisa nessa área deve se concentrar em identificar materiais com propriedades específicas, como alta resistência ao calor e baixa erosão por plasma, para maximizar a vida útil do propulsor.

O desenvolvimento de métodos avançados de resfriamento é crucial para lidar com as altas temperaturas geradas durante a operação do propulsor iônico de campo elétrico. Estes métodos podem variar desde sistemas de refrigeração ativos até o uso de materiais de revestimento de alta dissipação de calor. Além disso, é essencial realizar estudos adicionais para compreender os efeitos da radiação espacial e do ambiente operacional no desempenho e na vida útil desses propulsores. Essa pesquisa é fundamental para mitigar possíveis danos causados pela radiação e garantir a operação confiável dos propulsores em condições extremas no espaço. Em síntese, investir nessas áreas de pesquisa é crucial para impulsionar o desenvolvimento contínuo dos propulsores iônicos de campo elétrico, visando sua adoção em futuras missões espaciais. Ao enfrentar esses desafios, podemos

avançar na exploração espacial de forma mais eficiente, sustentável e confiável, promovendo o progresso da humanidade na conquista do espaço.

6.4 Análise de Gases de Propulsão

A análise dos gases de propulsão é crucial para compreender o desempenho e a eficácia do protótipo de propulsor iônico. Nesta seção, exploramos os gases utilizados no processo de propulsão, suas propriedades e os métodos de análise empregados.

6.4.1 Gases de Propulsão Analisados

Os gases selecionados para o propulsor iônico desempenham um papel fundamental na geração de impulso. Abaixo estão os principais gases considerados para o protótipo:

1. **Xenônio (Xe):** O xenônio é amplamente empregado como gás propulsor devido à sua elevada massa atômica e à facilidade de ionização.
2. **Argônio (Ar):** O argônio é comumente utilizado devido à sua disponibilidade e custo relativamente baixo, sendo uma opção viável para aplicações de propulsão iônica.
3. **Criptônio (Kr):** O criptônio é ocasionalmente utilizado em propulsores iônicos devido às suas propriedades físicas favoráveis, proporcionando uma alternativa para a geração de impulso.
4. **Ar Ambiente (AR):** O ar ambiente, composto principalmente por nitrogênio e oxigênio, pode ser considerado para aplicações específicas de propulsão iônica, embora sua composição precise ser levada em conta devido à presença de gases não ionizáveis.

6.4.2 Propriedades dos Gases de Propulsão

Para uma análise abrangente do desempenho do propulsor iônico, é fundamental considerar as seguintes propriedades dos gases de propulsão:

1. **Massa Molecular:** A massa molecular dos gases influencia diretamente a eficiência da propulsão, determinando a força de empuxo gerada pelo protótipo.
2. **Ionização:** A capacidade do gás de ser ionizado e formar íons é essencial para o funcionamento do propulsor iônico, pois os íons são acelerados para gerar impulso.
3. **Temperatura de Ionização:** A temperatura necessária para ionizar o gás é uma consideração importante, pois afeta a eficiência do processo de ionização e, conseqüentemente, o desempenho do propulsor.
4. **Pressão de Vapor:** A pressão de vapor do gás influencia sua capacidade de ser armazenado e liberado no propulsor iônico, impactando diretamente na geração de impulso.

A análise detalhada dos gases de propulsão proporciona informações valiosas para otimizar o desempenho e a eficiência do protótipo de propulsor iônico, garantindo uma propulsão eficaz e confiável.

6.5 Análise de Materiais

A análise de materiais é uma etapa crucial para a construção de um protótipo de propulsor iônico de campo elétrico de alta qualidade. A escolha dos materiais adequados é essencial para garantir o máximo desempenho e eficiência do protótipo, além de garantir a segurança do equipamento durante seu funcionamento.

Para isso, realizamos um estudo extenso das características dos melhores materiais disponíveis no mercado, buscando selecionar aqueles que oferecem a melhor resistência

mecânica, baixo coeficiente de atrito, alta condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão, dentre outras propriedades importantes.

O objetivo desta seção é apresentar uma análise teórica dos materiais mais promissores para a construção do protótipo de propulsor iônico de campo elétrico. Para isso, serão apresentados os materiais que possuem características mais desejáveis em cada área, bem como suas vantagens e desvantagens. Serão considerados aspectos como a resistência elétrica, a condutividade, a estabilidade térmica, a resistência mecânica, a durabilidade, entre outros.

É importante ressaltar que esta análise será teórica, levando em consideração apenas as propriedades dos materiais e não os custos envolvidos em sua aquisição e uso. Dessa forma, serão considerados apenas os materiais que apresentam as melhores características para cada área do protótipo, independentemente de seu preço.

6.5.1 Material para o Coletor (Ânodo)

O coletor é um dos componentes mais importantes em propulsores iônicos de campo elétrico. Ele é responsável por coletar íons produzidos pelo processo de ionização e acelerá-los para produzir a propulsão necessária. A eficiência na coleta de íons é fundamental para o desempenho e a propulsão eficaz do sistema. Vamos analisar alguns materiais para o coletor:

- **Tungstênio (W):** Devido à sua alta densidade e resistência à corrosão, o tungstênio é amplamente utilizado para o coletor em propulsores iônicos. Além disso, possui uma alta condutividade elétrica, permitindo uma eficiente coleta de íons.
- **Molibdênio (Mo):** Assim como o tungstênio, o molibdênio é um metal refratário que apresenta alta resistência à corrosão e uma condutividade elétrica adequada para coleta de íons.
- **Cobre (Cu):** O cobre é um material com boa condutividade elétrica e pode ser utilizado no coletor, embora sua menor densidade em comparação com metais refratários possa ser uma consideração.

- **Grafeno (GR^[1]):** O grafeno, por suas propriedades únicas, incluindo alta condutividade elétrica e área superficial elevada, é considerado um material promissor para a coleta de íons.
- **Ligas de Tungstênio (Wx^[2]):** Além do tungstênio puro, algumas ligas de tungstênio com outros elementos, como tântalo, podem ser utilizadas para melhorar ainda mais a eficiência na coleta de íons. Essas ligas podem combinar as propriedades desejáveis do tungstênio, como alta densidade e resistência à corrosão, com características únicas dos outros elementos.
- **Carbeto de Tungstênio (WC):** O carbeto de tungstênio é uma cerâmica de tungstênio e carbono com alta condutividade elétrica e é conhecido pela sua durabilidade e capacidade de coleta de íons. É usado em aplicações onde a resistência ao desgaste é fundamental.
- **Ligas de Titânio (Tx^[2]):** Algumas ligas de titânio, como a liga de titânio e alumínio, são conhecidas pela sua alta condutividade elétrica e resistência à corrosão, o que pode torná-las eficazes para a coleta de íons.
- **Diamante Dopado com Boro (DDB^[1]):** O diamante, quando dopado com boro, pode apresentar propriedades condutoras excepcionais e, ao mesmo tempo, oferecer uma superfície extremamente dura e resistente à corrosão, tornando-o adequado para a coleta de íons.
- **Óxido de Cério (CeO₂):** O óxido de cério é uma cerâmica condutora que pode ser utilizada para coletar íons de forma eficiente devido à sua alta condutividade elétrica e estabilidade química.

Propriedades a serem comparadas para o Coletor

Além das propriedades gerais, como condutividade elétrica e ponto de fusão, é essencial considerar outras propriedades específicas para a eficiência do coletor:

1. **Condutividade Elétrica (S/m):** A capacidade do material de conduzir corrente elétrica é essencial para a eficiência da coleta de íons. Materiais com alta condutividade elétrica permitem um fluxo eficaz de elétrons, facilitando a coleta e aceleração dos íons.
2. **Ponto de Fusão e Estabilidade Térmica (°C):** O ponto de fusão e a estabilidade térmica são críticos, pois o coletor está exposto a altas temperaturas durante a operação. Materiais com altos pontos de fusão e

¹ Esta sigla é comumente usada para identificar esse material em diversos contextos científicos e técnicos.

² Onde "x" representa o elemento de liga.

estabilidade térmica adequada garantem que o coletor mantenha sua integridade estrutural sob condições de operação.

3. **Emissividade Eletrônica (A/m^2):** A capacidade do material de liberar elétrons quando submetido a um campo elétrico é crucial. Materiais com alta emissividade eletrônica facilitam a liberação eficiente de elétrons, otimizando a coleta de íons.
4. **Resistência Mecânica (kPa):** A resistência mecânica do material é fundamental para suportar as condições físicas e térmicas associadas à propulsão iônica. Um coletor com boa resistência mecânica é capaz de suportar forças e temperaturas extremas sem deformações ou falhas.
5. **Custo e Disponibilidade:** A relação custo-benefício do material e sua disponibilidade no mercado são considerações práticas. Materiais acessíveis economicamente, sem comprometer significativamente a eficiência e a durabilidade, são preferíveis para garantir viabilidade financeira nas aplicações práticas.

A análise detalhada dos materiais para o coletor em propulsores iônicos revela uma gama de opções, cada uma com suas próprias vantagens e considerações. O tungstênio destaca-se com sua alta condutividade elétrica, estabilidade térmica e resistência mecânica, tornando-o uma escolha tradicionalmente sólida para aplicações de propulsores iônicos. O molibdênio também apresenta propriedades notáveis, oferecendo alta condutividade e estabilidade térmica.

Tabela 1 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Coletor

Propriedade	(W)	(Mo)	(Cu)	(GR)	(Wx)	(WC)	(Tx)	(DDB)	(CeO ₂)
Conductividade Elétrica (S/m)									
Ponto de Fusão (°C)									
Emissividade Eletrônica (A/m ²)									
Resistência Mecânica (kPa)									
Custo									

6.5.2 Material para o Emissor (Cátodo)

Assim como o coletor, a seleção cuidadosa do material para o cátodo é crucial para o desempenho otimizado do propulsor iônico. O cátodo desempenha um papel fundamental na emissão dos elétrons que serão posteriormente ionizados e acelerados para gerar a propulsão necessária. Portanto, suas propriedades são essenciais para garantir a eficiência do sistema.

- **Tungstênio (W):** O tungstênio, devido à sua alta emissividade e resistência à corrosão, é uma escolha comum e sólida para o cátodo em propulsores iônicos. Além disso, possui uma alta condutividade elétrica, permitindo uma eficaz emissão de elétrons.
- **Molibdênio (Mo):** Similar ao tungstênio, o molibdênio é um metal refratário que apresenta alta emissividade e resistência à corrosão, sendo uma opção válida para o cátodo. Sua condutividade elétrica adequada contribui para uma emissão eficiente de elétrons.

- **Grafite (C):** Devido à sua alta emissividade e baixa densidade, o grafite é considerado um material promissor para o cátodo. No entanto, sua estabilidade térmica limitada pode impactar sua vida útil.
- **Grafeno (GR):** O grafeno, com sua excepcional condutividade elétrica e área superficial elevada, é um material altamente promissor para o cátodo. No entanto, o custo e a disponibilidade podem ser fatores a serem considerados.
- **Cobre (Cu):** O cobre, com sua boa condutividade elétrica, pode ser uma opção viável para o cátodo, especialmente devido à sua disponibilidade e preço acessível. No entanto, é fundamental considerar sua menor densidade em comparação com os metais refratários.
- **Diamante Dopado com Boro (DDB):** O diamante, quando dopado com boro, apresenta propriedades condutoras excepcionais e uma superfície extremamente dura e resistente à corrosão, tornando-o adequado para a emissão de elétrons.

Propriedades a serem comparadas para o Emissor

A consideração cuidadosa dessas propriedades permite a escolha do material mais adequado para o emissor, levando em conta a eficiência da emissão de elétrons, a resistência às condições operacionais e a viabilidade econômica do projeto:

- **Condutividade Elétrica (S/m):** A capacidade de um material conduzir corrente elétrica é vital para a eficiência da emissão de elétrons. Materiais com alta condutividade elétrica facilitam um fluxo eficaz de elétrons durante o processo de emissão.
- **Ponto de Fusão (°C):** Assim como no coletor, o ponto de fusão e a estabilidade térmica são fundamentais para o emissor, pois ele está exposto a altas temperaturas durante a operação. Materiais com altos pontos de fusão e estabilidade térmica adequada garantem a manutenção da integridade estrutural do emissor sob condições de operação extremas.
- **Emissividade Eletrônica (A/m²):** A capacidade do material liberar elétrons quando submetido a um campo elétrico é crucial para a eficiência da emissão de elétrons. Materiais com alta emissividade eletrônica facilitam a liberação eficiente de elétrons, otimizando o processo de emissão.
- **Resistência Mecânica (kPa):** A resistência mecânica do material é essencial para garantir que o emissor seja capaz de suportar as condições físicas associadas à propulsão iônica. Um emissor com boa resistência mecânica é capaz de suportar forças e estresses mecânicos sem deformações ou falhas.
- **Custo e Disponibilidade:** A relação custo-benefício do material e sua disponibilidade no mercado são considerações práticas importantes ao escolher o

material para o emissor. Materiais que são economicamente acessíveis e amplamente disponíveis, sem comprometer a eficiência e a durabilidade, são preferíveis para garantir a viabilidade financeira nas aplicações práticas.

Tabela 2 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Emissor

Propriedade	(W)	(Mo)	(C)	(GR)	(Cu)	(DDB)
Conductividade Elétrica (S/m)						
Ponto de Fusão (°C)						
Emissividade Eletrônica (A/m ²)						
Resistência Mecânica (kPa)						
Custo						

6.5.3 Material para o Isolante

O isolante é uma parte crucial do sistema de propulsores iônicos de campo elétrico, responsável por separar eletricamente o coletor e o emissor. Este componente deve garantir que a corrente elétrica flua da fonte para o cátodo, permitindo o processo de ionização e a subsequente propulsão sem interferências indesejadas ou fuga de corrente. Vamos analisar:

- **Alumina (Al₂O₃):** A alumina é frequentemente usada como isolante devido à sua alta resistência elétrica, estabilidade térmica e boa resistência à corrosão. Além

disso, apresenta uma excelente rigidez dielétrica, tornando-a uma escolha sólida para essa aplicação.

- **Cerâmicas de Óxido de Boro (B_2O_3):** As cerâmicas à base de óxido de boro oferecem uma alta resistência elétrica e estabilidade térmica, tornando-as adequadas para isolantes em propulsores iônicos. Podem ser usadas em formas variadas, como placas ou revestimentos.
- **Politetrafluoroetileno (PTFE):** O PTFE é amplamente utilizado devido à sua alta resistência dielétrica e baixa permissividade elétrica. Além disso, é resistente a produtos químicos e possui uma boa estabilidade térmica.
- **Perfluoroalcoxi (Teflon PFA):** Semelhante ao PTFE, o Teflon PFA oferece boas propriedades dielétricas e resistência química. Além disso, é mais flexível, o que pode ser vantajoso dependendo da aplicação.

Propriedades a serem comparadas para o Isolante

Assim como no caso do coletor e do emissor, é fundamental avaliar propriedades específicas para garantir a eficiência do isolante:

- **Resistência Elétrica (Ω):** A capacidade do material de resistir à passagem de corrente elétrica é essencial para o isolante. Materiais com alta resistência elétrica evitam vazamento de corrente e garantem a separação eficaz entre os componentes do propulsor.
- **Rigidez Dielétrica (V/m):** A rigidez dielétrica indica a capacidade do material de suportar um campo elétrico sem se tornar condutor. Materiais com alta rigidez dielétrica são fundamentais para garantir a eficácia do isolamento elétrico.
- **Ponto de Fusão ($^{\circ}C$):** A estabilidade térmica é crucial para garantir que o isolante mantenha suas propriedades estruturais e elétricas sob altas temperaturas durante a operação do propulsor. Materiais com boa estabilidade térmica são preferíveis para essa aplicação.
- **Resistência Química:** A resistência do material a produtos químicos é importante devido às condições variadas a que o propulsor pode estar exposto. Materiais que resistem à corrosão química garantem a longevidade e a eficiência do isolante.
- **Custo e Disponibilidade:** Considerar a relação custo-benefício e a disponibilidade dos materiais é fundamental para a viabilidade econômica do projeto. Materiais

acessíveis economicamente e amplamente disponíveis são preferíveis, desde que atendam aos requisitos de desempenho.

Tabela 3 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Isolante

Propriedade	(Al ₂ O ₃)	(B ₂ O ₃)	(PTFE)	(PFA)
Resistência Elétrica (Ω)				
Rigidez Dielétrica (V/m)				
Ponto de Fusão (°C)				
Resistência Química				
Custo				

6.5.4 Material para o Resfriamento

O sistema de resfriamento é vital para manter a temperatura adequada nos propulsores iônicos de campo elétrico, garantindo o funcionamento eficiente e a integridade dos componentes. Os materiais utilizados no sistema de resfriamento devem ser capazes de dissipar o calor gerado durante a operação do propulsor. Vamos analisar alguns materiais comumente utilizados para o sistema de resfriamento em propulsores iônicos:

- **Cobre (Cu):** Devido à sua excelente condutividade térmica, o cobre é frequentemente usado em sistemas de resfriamento. Permite uma rápida dissipação de calor, contribuindo para a eficiência térmica.

- **Alumínio (Al):** O alumínio também é amplamente utilizado devido à sua boa condutividade térmica e baixo peso. É eficaz na dissipação de calor e é mais leve que o cobre.
- **Grafeno (GR):** Devido à sua excelente condutividade térmica, o grafeno é uma escolha promissora para o sistema de resfriamento. Pode ser usado em formas variadas, incluindo revestimentos e nano fluidos para melhorar a transferência de calor.
- **Compósitos de Carbono (C):** Compósitos que contêm fibras de carbono são conhecidos por sua alta condutividade térmica e resistência, sendo uma opção interessante para o sistema de resfriamento.

Propriedades a serem comparadas para o Sistema de Resfriamento

A análise dos materiais para o sistema de resfriamento deve levar em consideração propriedades específicas relacionadas à eficiência na dissipação de calor:

- **Condutividade Térmica (W/mK):** A capacidade do material em conduzir calor é fundamental para um eficaz sistema de resfriamento. Materiais com alta condutividade térmica dissipam o calor de forma eficiente.
- **Capacidade Térmica (J/K):** A capacidade de um material de armazenar calor temporariamente pode ser útil para absorver picos de temperatura e garantir uma dissipação mais uniforme.
- **Resistência Mecânica (kPa):** A resistência mecânica do material é essencial para suportar as condições físicas associadas ao resfriamento, garantindo a durabilidade e a integridade do sistema.
- **Densidade (kg/m³):** O peso e a densidade do material afetam o design e a eficiência do sistema de resfriamento, especialmente em aplicações espaciais onde a carga útil deve ser minimizada.
- **Custo e Disponibilidade:** A relação custo-benefício do material e sua disponibilidade no mercado são considerações práticas importantes ao escolher o material para o sistema de resfriamento.

Tabela 4 Análise de materiais e propriedades pertinentes ao Resfriamento

Propriedade	(Cu)	(Al)	(GR)	(C)
Condutividade Térmica (W/mK)				
Capacidade Térmica (J/K)				
Resistência Mecânica (kPa)				
Densidade (kg/m ³)				
Custo				

6.5.5 Componentes Adicionais

- **Material para Estrutura:** Avaliação dos materiais utilizados na estrutura física do propulsor iônico, incluindo sua resistência mecânica, durabilidade e peso.
- **Material para a Alimentação:** Análise dos materiais empregados nos sistemas de alimentação do propulsor, como tanques de combustível, reservatórios de gases propulsores ou outros componentes relacionados à entrada de energia no sistema.
- **Sistema de alimentação elétrica:** Avaliação do material utilizado nas fontes de energia, baterias ou outros dispositivos de armazenamento e distribuição de energia elétrica.
- **Condutores elétricos:** Avaliação dos materiais utilizados nos cabos, fios e conexões elétricas que ligam os componentes do propulsor iônico.

- **Sistema de controle e eletrônica:** Avaliação dos materiais dos componentes eletrônicos e sistemas de controle que gerenciam a operação do propulsor iônico.

6.6 Outros Fatores Influenciadores

Fatores que podem afetar a eficiência dos propulsores iônicos de campo elétrico incluem a configuração do campo elétrico, a distribuição de carga elétrica nos componentes do propulsor, a eficiência da ionização do gás propulsor e o design geral do sistema de propulsão. A compreensão e otimização desses aspectos são essenciais para maximizar a eficiência e a viabilidade prática dos propulsores iônicos de campo elétrico.

Além dos fatores mencionados anteriormente, existem outros elementos que desempenham um papel crucial na eficiência dos propulsores iônicos de campo elétrico. Esses elementos incluem:

6.6.1 Configuração do Campo Elétrico

A forma como o campo elétrico é configurado dentro do propulsor influencia diretamente na direção e na força dos íons acelerados, afetando o desempenho geral do sistema.

6.6.2 Distribuição de Carga Elétrica nos Componentes

Uma distribuição uniforme e adequada da carga elétrica nos componentes do propulsor é essencial para garantir uma ionização eficiente do gás propulsor e uma propulsão consistente.

6.6.3 Eficiência da Ionização do Gás Propulsor

A eficiência com que o gás propulsor é ionizado dentro do propulsor iônico afeta diretamente a quantidade de íons disponíveis para gerar impulso, influenciando assim a eficiência do sistema.

6.6.4 Design Geral do Sistema de Propulsão

O design geral do sistema, incluindo a disposição dos componentes, a aerodinâmica e a integração com outros sistemas da espaçonave, tem um impacto significativo no desempenho e na eficiência dos propulsores iônicos de campo elétrico.

6.6.5 Controle e Otimização de Software

O desenvolvimento de algoritmos e software para controlar o funcionamento do propulsor iônico, incluindo a otimização da trajetória da espaçonave e o gerenciamento de energia, desempenha um papel fundamental na maximização da eficiência do sistema.

6.6.6 Componentes e Circuitos Eletrônicos

A seleção e o design adequado dos componentes eletrônicos, como transistores, capacitores e circuitos integrados, são essenciais para garantir o funcionamento confiável e eficiente do sistema de propulsão iônica.

7 CRONOGRAMA

Tabela 5 Cronograma de Desenvolvimento da Pesquisa

Etapa	Atividades Planejadas	Período Previsto
Levantamento Bibliográfico	Pesquisa e coleta de materiais bibliográficos Acesso a fontes online, incluindo Bing AI e ChatGPT	4 semanas
Análise e Estudo de Teorias	Revisão e análise crítica de teorias relevantes Identificação e seleção de abordagens teóricas promissoras	6 semanas
Pesquisa Online	Realização de pesquisas adicionais em fontes confiáveis Exploração de artigos científicos atualizados	6 semanas
Elaboração do Plano de Pesquisa	Desenvolvimento de um plano detalhado para a pesquisa experimental Definição dos objetivos, hipóteses e metodologia	4 semanas
Simulação e Modelagem	Criação de modelos 3D básicos no Tinkercad Análise computacional preliminar para prever comportamentos	8 semanas
Testes Experimentais	Preparação e execução de testes nos laboratórios Coleta de dados e registros cuidadosos das observações	10 semanas
Análise de Resultados	Avaliação estatística e interpretação dos dados obtidos Comparação dos resultados experimentais com as simulações	6 semanas
Escrita e Revisão do Trabalho	Elaboração da monografia, incluindo revisões e correções Apresentação de resultados e discussão de conclusões	12 semanas

7.1 Plano Orçamentário

Tabela 6 Plano Orçamentário Detalhado

Produto	Unidade(s)	Valor Unitário	Valor Pago
Total			

8 MODELO PROPOSTO

8.1 Simulações

Para avaliar de maneira abrangente e precisa o desempenho do propulsor iônico, foram conduzidas simulações computacionais utilizando software de modelagem especializado. Essas simulações representam uma etapa crucial no desenvolvimento e refinamento do protótipo, proporcionando insights valiosos sobre o comportamento do sistema em diferentes cenários e condições operacionais.

Por meio das simulações, foi possível realizar uma análise detalhada dos aspectos fundamentais do funcionamento do propulsor. Isso incluiu a investigação da distribuição do campo elétrico ao redor do emissor e do coletor, a compreensão do processo de ionização dos gases propulsores e a avaliação da eficiência de coleta de íons pelo coletor. Além disso, as simulações permitiram explorar a influência de variáveis importantes, como voltagem aplicada, distância entre emissor e coletor, materiais utilizados e geometria do sistema.

Ao analisar os resultados das simulações, foram identificados padrões e tendências que forneceram insights valiosos para a otimização do protótipo. Isso incluiu ajustes nos parâmetros de projeto, refinamento da geometria do propulsor e seleção de materiais mais adequados para garantir o máximo desempenho e eficiência.

As simulações computacionais desempenharam um papel essencial no processo de desenvolvimento do propulsor iônico, permitindo uma avaliação abrangente e detalhada de seu funcionamento e fornecendo orientações preciosas para aprimoramentos futuros. Essa abordagem baseada em modelagem contribuiu significativamente para a compreensão do sistema e para o progresso em direção a um propulsor iônico mais eficaz e confiável.

8.1.1 Modelo de Protótipo A

O Protótipo Modelo A é composto por uma estrutura de base em plástico, acompanhada por duas paredes laterais que possuem furos para a fixação de duas barras distintas. Uma dessas barras é de maior espessura, desempenhando a função de coletor, enquanto a outra, mais fina, atua como emissor. Ambas as barras são conectadas a um amplificador de tensão e a um gerador de funções, permitindo a aplicação controlada de corrente elétrica e a geração de um campo elétrico.

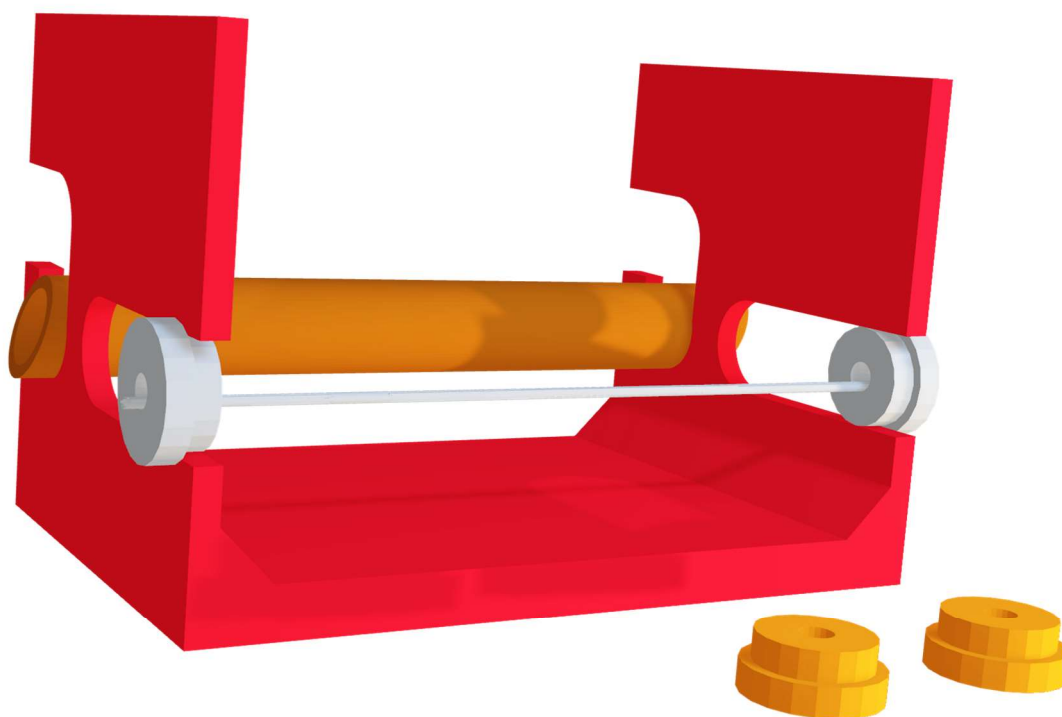


Figura 1 Modelo A Protótipo Propulsão Iônica

As simulações e experimentos foram conduzidos levando em consideração as seguintes características:

Distribuição do campo elétrico: As simulações permitiram analisar a distribuição do campo elétrico dentro do protótipo, identificando áreas de alta e baixa intensidade elétrica.

- **Trajectoria dos íons:** Foi possível simular a trajetória dos íons propulsores sob a influência do campo elétrico, permitindo avaliar a eficiência da aceleração e a direção do impulso gerado.
- **Variação da distância entre emissor e coletor:** Foram realizadas simulações para investigar como a distância entre o emissor e o coletor afeta o desempenho do propulsor iônico.
- **Diferentes tamanhos de diâmetros para emissor e coletor:** Exploramos o efeito de diferentes tamanhos de diâmetros para o emissor e o coletor na eficiência da propulsão iônica.
- **Variação de voltagem, amperagem e outros parâmetros elétricos:** Foram realizadas simulações para estudar como a variação de voltagem, amperagem e outros parâmetros elétricos influenciam o desempenho do propulsor iônico.
- **Segurança:** Todas as simulações e experimentos foram realizados seguindo rigorosas medidas de segurança, incluindo o uso de equipamentos de proteção individual e precauções para evitar riscos elétricos.

Os resultados dessas simulações e experimentos são discutidos nas seções subsequentes, fornecendo informações valiosas para o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo do protótipo do propulsor iônico.

8.1.2 Modelo de Protótipo B

O Modelo B apresenta um design alternativo para o protótipo do propulsor iônico, visando explorar os efeitos do campo elétrico em uma configuração diferenciada. Este modelo consiste em uma base robusta com um suporte para o emissor e o coletor.



Figura 2 Modelo B Protótipo Propulsão Iônica

O emissor é configurado como um cilindro curto, com extremidades pontiagudas voltadas para fora. Essas pontas são projetadas para explorar o efeito de campo elétrico nas extremidades afiadas, que pode aumentar a eficiência na emissão de íons. O material

e o diâmetro do emissor serão variados para avaliar seu impacto na geração de íons e no impulso resultante.

O coletor, por sua vez, é projetado como um cilindro curto com uma extremidade menor do que a outra, criando uma grande superfície de entrada e uma saída mais estreita. Essa configuração visa maximizar a eficiência na coleta de íons, permitindo uma entrada eficaz de íons na extremidade mais larga e uma concentração adequada na extremidade mais estreita. A área superficial do coletor será otimizada para melhorar a captura de íons e, conseqüentemente, o impulso gerado.

As simulações realizadas para o Modelo B abrangem os seguintes aspectos:

- **Distribuição do campo elétrico:** Serão conduzidas simulações para analisar a distribuição do campo elétrico ao redor do emissor e do coletor, especialmente nas extremidades pontiagudas do emissor.
- **Efeito de pontas:** Será investigado o efeito das pontas no emissor na emissão de íons, avaliando como essa configuração influencia a eficiência da propulsão iônica.
- **Eficiência de coleta:** As simulações serão utilizadas para determinar a eficiência de coleta de íons pelo coletor, considerando sua geometria e área superficial.
- **Variação de parâmetros:** Diferentes parâmetros, como voltagem aplicada, distância entre emissor e coletor e material utilizado, serão variados nas simulações para entender seu impacto no desempenho do protótipo.

O Modelo B representa uma abordagem inovadora para o projeto do propulsor iônico, explorando configurações alternativas para otimizar a eficiência da propulsão. Os resultados das simulações fornecerão valiosas informações para o desenvolvimento e refinamento do protótipo.

8.2 Testes Experimentais

8.2.1 Teste 01

Configuração A

8.2.2 Teste 02

8.2.3 Teste 03

8.3 Dados Coletados

9 CONCLUSÃO

9.1 Dados Analisados

9.2 Conclusões

9.3 Modelo Final

REFERÊNCIAS

- Braga, N. C. (2010). *Supercondutores (ART157)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/como-funciona/1077-art157.html>
- Braga, N. C. (2011). *Motor iônico (MEC071)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica-e-mecatronica/3138-mec071.html>
- Braga, N. C. (2014). *Consumo racional de energia (EL057)*. Fonte: Instituto NCB: <https://newtoncbraga.com.br/?view=article&id=9840:consumo-racional-de-energia-el057&catid=38>
- Braga, N. C. (2015). *Motor Iônico – Construindo seu Protótipo (ART2444)*. Fonte: Instituto NCB: <https://br.newtoncbraga.com.br/projetos/10596-motor-ionico-construindo-seu-prototipo-art2444.html>
- Braga, N. C. (2015). *Motor Iônico (ART2416)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/?view=article&id=10523:motor-ionico-art2416&catid=52>
- Braga, N. C. (2018). *Astronáutica e Eletrônica (AST011)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/astrofisica-e-astronautica/15338-astronautica-e-eletronica-ast011.html>
- Braga, N. C. (2018). *Motor Iônico (ALM1066)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque-tecnologico/202-m/16009-motor-ionico-alm1066.html>
- Braga, N. C. (2021). *Gerador de Íons Negativos (ART2146)*. Fonte: Instituto NCB: <https://www.newtoncbraga.com.br/projetos/18257-gerador-de-ions-negativos-art2146.html>
- Chen, F. F. (2016). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer.
- Divergilio, A. J., Mantovani, J. A., & Benilov, M. S. (2018). Electric propulsion: status and prospects. *Plasma Physics Reports*.

- Goebel, D. M., & Katz, I. (2008). *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (1º ed.). John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470436448
- Gondim, L. M., & Lima, J. C. (2006). *A Pesquisa Como Artesanato Intelectual*. Editora Vozes.
- Khaing, E. E. (2019). *A Review of an Ionic Thruster*. Acesso em 5 de 3 de 2024, disponível em <http://ijrp.org/paper-detail/500>
- Lara, C. S. (22 de Junho de 2016). Design and Performance Analysis. *Bachelor's Degree in Aerospace Technology Engineering*. Terrassa, Catalunya, Espanha: Terrassa School of Industrial, Aerospace and Audiovisual Engineering.
- Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. (2005). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. John Wiley & Sons.
- Loeb, H. e. (1971). Recent work on radio frequency ion thrusters. *Journal of Spacecraft and Rockets*.
- Marrese-Reading, C., Polk, J., Mueller, J., & Owens, A. (2001). In-FEEP Thruster Ion Beam Neutralization with Thermionic and Field Emission Cathodes. *Paper IEPC-01-290*, (p. 15). Pasadena, CA.
- Mattingly, J. D., & Ohain, H. v. (2016). *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Nair, D. e. (2016). End-Of-Life Performance and Plume Diagnostics of a High-Power Hall Thruster.
- Pu, Y. (2021). *Numerical simulation and experimental research of LRIT-30 radio frequency ion thruster*. Fonte: AIP Publishing: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/11/5/055313/1040066/Numerical-simulation-and-experimental-research-of>
- Raitse, Y., & Fisch, N. J. (2009). Plasma propulsion for space missions. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- Sarris, C. D. (2014). *Ion Propulsion for Spacecraft: Past, Present and Future*. Springer.

- Sturrock, P. A. (1994). *Plasma Physics: An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical & Laboratory Plasmas*. Cambridge University Press.
- Trevisan, J. (2019). *Manual de Redação e Estilo da Folha de S. Paulo*. Publifolha.
- Yin, Y., Messier, J., & Hopwood, J. (1999). Miniaturization of inductively coupled plasma sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*.

APÊNDICES