

CENTRO PAULA SOUZA



**ETEC PHILADELPHO GOUVÊA NETTO
TÉCNICO EM MECATRÔNICA**

**MATEUS MARTINS GONÇALVES
GUILHERME BARBOSA DE SOUZA**

PROPULSORES IÔNICOS: VIABILIDADE DO USO NA ATMOSFERA

São José do Rio Preto

2024

MATEUS MARTINS GONÇALVES
GUILHERME BARBOSA DE SOUZA

PROPULSORES IÔNICOS: VIABILIDADE DO USO NA ATMOSFERA

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentada à Etec Philadelpho Gouvêa
Netto - CPS como parte dos requisitos para
obtenção do título de Técnico em
Mecatrônica.

Orientador: Fernando Faitarone Brasilino

São José do Rio Preto

2024

RESUMO

Propulsores iônicos, atualmente, são utilizados para propulsionar espaçonaves no vácuo, mas suas aplicações na atmosfera são quase nulas. O conservadorismo presente na indústria aeroespacial faz com que formas de propulsão convencionais sejam mais priorizadas e conseqüentemente possuem maior desenvolvimento tecnológico, por causa disso, a tecnologia de propulsão iônica na atmosfera é pouco desenvolvida e escassa, mesmo tendo um potencial comprovado por estudos passados.

Devido a essa escassez de pesquisas sobre o assunto, este estudo visa obter dados e estudar a aplicabilidade do uso desse tipo de propulsão na atmosfera, como por exemplo a aplicação em aeronaves. Para tal, foi criado um protótipo recatado de um propulsor iônico e estudos sobre sua performance foram desenvolvidos.

Propulsores iônico fazem parte de uma categoria de propulsores peculiares na engenharia aeroespacial, já que, ao invés de queimar um combustível inflamável e expelirem os gases da propulsão para o empuxo, fazem uso de uma fonte de alta tensão para ionizar um gás, e, através da mesma fonte elétrica, um campo elétrico acelera tais íons, gerando um empuxo específico, tendo uma eficiência muito maior em relação aos motores de combustão convencionais e não geram gases poluentes. Seu uso é aplicado especificamente no espaço, onde as aeronaves sofrem praticamente nenhum atrito e estão livres da força da gravidade.

ABSTRACT

Ionic thrusters are currently used to propel spacecraft in a vacuum, but applications in the atmosphere are almost zero. The conservatism present in the aerospace industry means that conventional forms of propulsion are more prioritized and consequently have greater technological development. Because of this, ion propulsion technology in the atmosphere is poorly developed and scarce, even though it has a potential proven by past studies.

Due to the lack of research on the subject, this study aims to obtain data and study the applicability of using this type of propulsion in the atmosphere, such as in aircraft. To this end, a modest prototype of an ion thruster was created and studies on its performance were developed.

Ionic thrusters are part of a category of peculiar thrusters in aerospace engineering, since, instead of burning a flammable fuel and expelling propulsion gases for thrust, they make use of a high voltage source to ionize a gas, and, through from the same electrical source, an electric field accelerates these ions, generating a specific thrust, having a much greater efficiency compared to conventional combustion engines and not generating polluting gases. Its use is applied specifically in space, where aircraft suffer practically no friction and are free from the force of gravity. This study aims to obtain data and study the applicability of using this type of propulsion in the atmosphere, such as application in aircraft.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ideal de um propulsor iônico	12
Figura 2: Circuito "Flyback Driver"	13
Figura 3: Circuito montado	13
Figura 4: Transformador genérico	14
Figura 5: Transformador no óleo	14
Figura 6: Esquema multiplicador 4x	15
Figura 7: Circuito multiplicador 20x	15
Figura 8: modelo 3D do propulsor - vista frontal.....	16
Figura 9: modelo 3D do propulsor - vista lateral.....	16
Figura 10: protótipo montado - vista lateral	16
Figura 11: protótipo montado - vista de cima	16
Figura 12: forças atuantes em uma partícula de ar carregada	17
Figura 13: parâmetros variáveis	18
Figura 14: medição utilizando um anemômetro.....	18

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: velocidade de escape do ar ao variar parâmetros19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NASA – National Aeronautics and Space Administration

DART - Double Asteroid Redirection Test

SERT-1 - Space Electric Rocket Test

MIT - Massachusetts Institute of Technology

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. USO NA ATMOSFERA	10
1.2. OBJETIVOS	10
2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. PRINCÍPIO DA PROPULSÃO IÔNICA	12
3. METODOLOGIA	13
3.1. CIRCUITO DA FONTE	13
3.1.1. CIRCUITO OSCILADOR	13
3.1.2. TRANSFORMADOR.....	14
3.1.3. MULTIPLICADOR DE TENSÃO'	15
3.2. MODELO DO PROPULSOR	16
4. ESTUDO DE CASO	18
5. CONCLUSÃO	20
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1. INTRODUÇÃO

Até 2019, mais de 500 espaçonaves foram equipadas com propulsores de propulsão elétrica, 340 delas em órbita geoestacionária entre 1981 e 2018 (LEV et al, 2019). A primeira experimentação espacial de propulsores elétricos ocorreu em 1964, com a missão suborbital *SERT-1 (Space Electric Rocket Test)* da NASA, na qual motores de íons com mercúrio e césio como propelentes foram testados por 31 minutos (SOVEY; RAWLIN; PATTERSON, 1999). A sonda espacial russa *Zond-2* foi lançada em 30 de novembro de 1964, do Cosmódromo de Baikonur. Ela deveria explorar Marte em uma missão de sobrevoo. No entanto, a comunicação foi perdida em maio de 1965, antes de alcançar Marte. A *Zond-2* tinha seis propulsores de plasma pulsado (PPTs) para controle de altitude, que foram testados com sucesso por 70 minutos a uma distância de $5,37 \times 10^6$ km da Terra. A *Zond-2* é considerada a primeira aplicação de propulsão elétrica no espaço (BURTON; TURCHI, 1998).

Atualmente, essa tecnologia é amplamente utilizada em diversas aplicações, comerciais e científicas. Comercialmente, os satélites *Starlink* (empresa de internet via satélite) utiliza propulsores iônicos para fazer correção orbital e desvios de rota (NASA, 2023). Para estudos científicos, já foi utilizado pela NASA na famosa missão *DART*, onde o propulsor utilizado ficou ativo por 1000 horas seguidas acelerando a sonda (KANTSIPER, 2017).

Seu diferencial está na alta eficiência, nesse caso medida em impulso específico. Ao ser comparado aos propulsores a combustão com maior eficiência, os propulsores tripropelentes (ARBIT; CLAPP; NAGAI, 1970), os elétricos podem chegar a ter 6 vezes mais impulso específico (HOLSTE et al, 2020). Todos esses fatores fazem com que seja o modelo de propulsão ideal para missões que demandam tempo e grandes distâncias.

1.1. USO NA ATMOSFERA

O conceito de vento iônico já é conhecido a um longo tempo, sendo estudado profundamente pela primeira vez por A.P. Chattock em 1899 (CHATTOCK, 1899). Ao ser comparado ao uso de propulsores iônicos no vácuo, a eficiência na atmosfera é muito menor, porém pode ser similar a outras formas de propulsão mais usualmente utilizadas (WILSON; PERKINS; THOMPSON, 2009).

Engenheiros da universidade do MIT (Massachusetts Institute of Technology) construíram em 2018 o primeiro protótipo de aeronave a manter voo utilizando somente propulsão por vento iônico, tendo diversas vantagens ao ser comparado a aviões tradicionais. Steven Barret, professor associado de aeronáutica e astronáutica no MIT, disse sobre o protótipo: “Isto possivelmente abriu novas e inexploradas possibilidades para aeronaves que são mais silenciosas, mecanicamente mais simples, e não emitem gases provenientes da combustão.” (MIT News, 2018).

1.2. OBJETIVOS

Sabendo dessas aplicações, este estudo busca explorar a viabilidade do uso atmosférico do propulsor, propor possíveis melhorias e novos modelos, e, por fim, o comparar com outras formas de propulsão convencionais. Adicionalmente, ao decorrer deste documento, será dada ênfase sobre a questão da eficiência ao ser utilizado em aplicações práticas, utilizando dados de experimentos empíricos realizados com um protótipo em pequena escala.

2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A história dos estudos realizados sobre propulsão iônica pode ser separada em cinco eras (CHOUEIRI,2004), conforme segue:

- 1) A era dos visionários: 1906-1945
- 2) A era dos pioneiros: 1946-1956
- 3) A era de diversificação e desenvolvimento: 1957-1979
- 4) A era de aceitação: 1980-1992
- 5) A era de aplicação: 1993-dias atuais

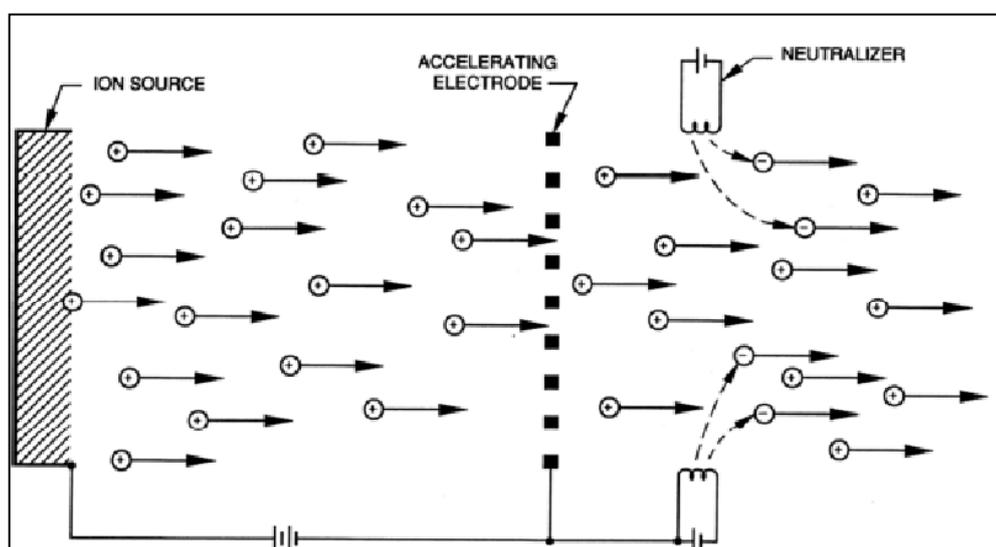
Mesmo com mais de 100 anos de desenvolvimento, essa tecnologia pode ser considerada recente, pois seu uso prático e comercial só começou a ser explorado durante as duas últimas décadas do século 20. Essa demora para a aplicação é principalmente devido ao conservadorismo presente na indústria aeroespacial, que causa a priorização de investimentos nas formas de propulsão convencionais (CHOUEIRI,2004).

Para este estudo, foi utilizado uma pesquisa bibliográfica com base em diversos artigos científicos, teses e patentes que tratam diretamente sobre o assunto de propulsão iônica ou sobre assuntos teóricos relevantes para o assunto.

2.1. PRINCÍPIO DA PROPULSÃO IÔNICA

O princípio de funcionamento dos sistemas de propulsão elétrica consiste em tornar as moléculas do gás ou, em geral, as partículas que devem ser ejetadas, sensíveis à ação de um campo elétrico. Para fazer isso, é necessário que o gás se torne um condutor elétrico, e isso é atingido por meio da ionização do mesmo. Num propulsor iônico, os íons obtidos são acelerados em um acelerador de partículas. Uma propulsão eletrostática, independentemente do tipo, consiste no mesmo princípio, um propelente, uma fonte de energia elétrica, uma câmara ionizante, uma região aceleradora e os meios de neutralizar a saída para evitar o acúmulo de carga (CICAN, G.; Popa I., 2017), como mostrado na figura 1.

Figura 1: Esquema ideal de um propulsor iônico



Fonte: CICAN, G.; Popa I., 2017

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, busca-se utilizar o estudo de caso de uma maneira exploratória para encontrar as configurações ideais das dimensões do propulsor, e produzir o máximo de empuxo possível com a maior eficiência. Para isso, foi desenvolvido um protótipo com diversas dimensões reguláveis.

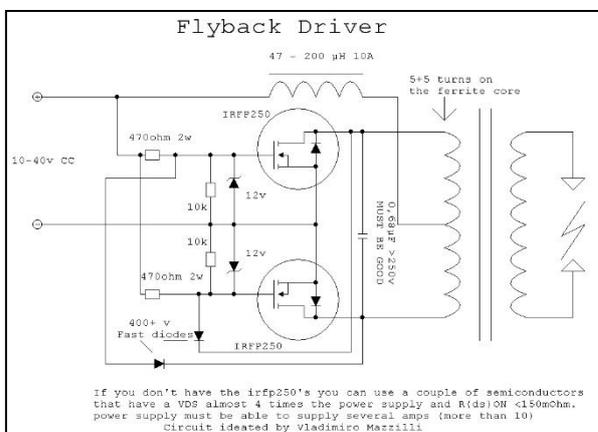
3.1. CIRCUITO DA FONTE

Primeiramente, uma fonte de alta tensão de corrente contínua foi requerida. O circuito todo é dividido em três partes: O circuito oscilador, o transformador e o multiplicador de tensão. Um dos pontos considerados durante o projeto da parte elétrica foi de fazer todo o circuito o mais seguro possível, para evitar acidentes durante testes. Cada medida de segurança será explicada com detalhes nas próximas sessões sobre cada parte.

3.1.1. CIRCUITO OSCILADOR

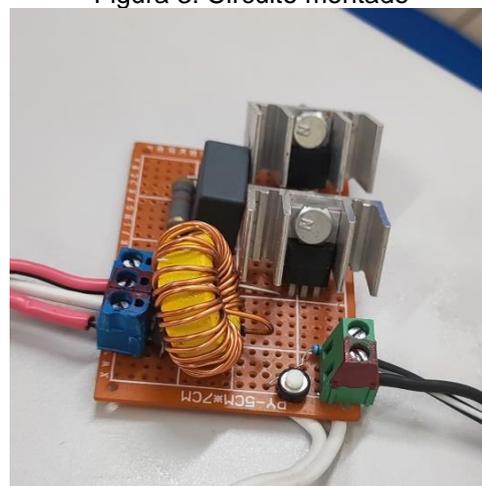
O circuito utilizado para gerar a corrente alternada necessária para alimentar o transformador foi baseado no circuito “Mazilli ZVS flyback driver” (ioces, 2023), que tem como vantagens: ser resistente a interferências eletromagnéticas, eficiente, simples e conseguir operar com altas correntes (Kaizer Power Electronics, 2009). Alguns componentes foram trocados por equivalentes para ser possível construí-lo apenas com peças compradas localmente, mas o funcionamento continua o mesmo. O circuito construído foi o mostrado nas figuras 2 e 3:

Figura 2: Circuito "Flyback Driver"



Fonte: ioces, 2023

Figura 3: Circuito montado



Fonte: do próprio autor, 2024

A alta frequência produzida pelo circuito (120kHz) garante uma maior segurança na saída do transformador, pois além de limitar a corrente por meio da maior reatância das bobinas, também faz com que a corrente necessária para causar danos à saúde seja bem maior (*All About Circuits, 2015*).

3.1.2. TRANSFORMADOR

Foi utilizado um transformador genérico encontrado em diversos marketplaces chineses (como o exemplo da figura 4), porém, para conseguir uma tensão de saída maior, o enrolamento primário foi diminuído para 6 voltas com *center tap*, onde a relação das bobinas do transformador ficou por volta de 200, ou seja, com uma entrada de 20V, a saída será 4000V.

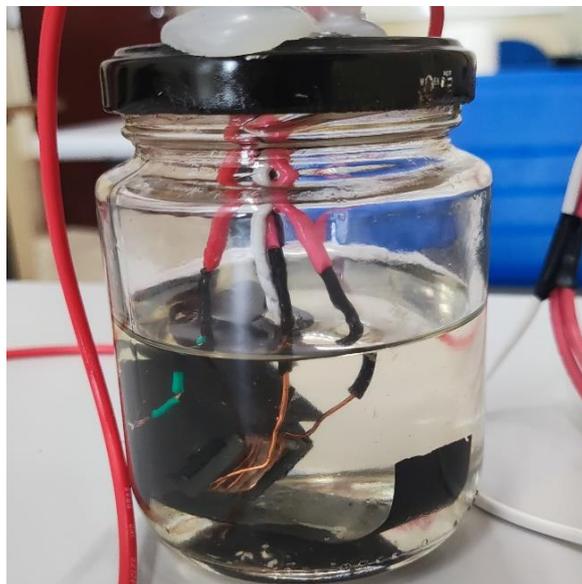
Para evitar a formação de arcos entre os fios do enrolamento secundário, o transformador foi colocado em óleo mineral (como mostra a figura 5), por ser um ótimo isolante elétrico. Também pode ser utilizado resina epóxi para fazer a isolação, porém é recomendado utilizar uma câmara a vácuo para retirar bolhas de ar que ficam entre os fios.

Figura 4: Transformador genérico



Fonte: diymore, 2024

Figura 5: Transformador no óleo

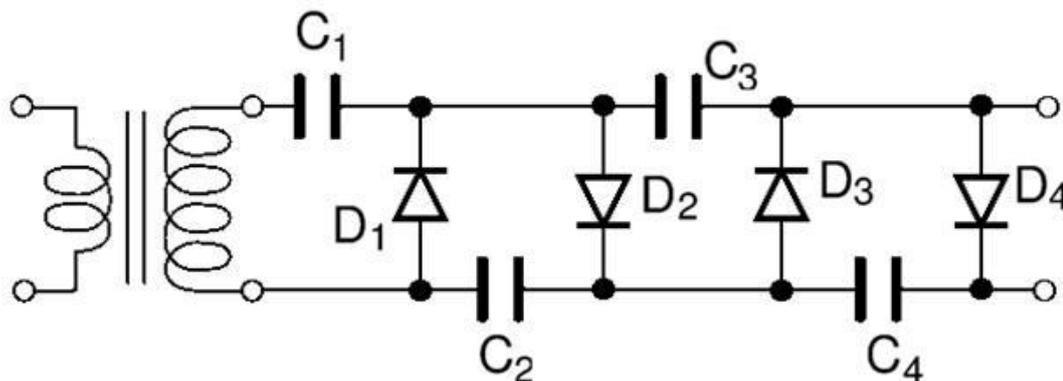


Fonte: do próprio autor, 2024

3.1.3. MULTIPLICADOR DE TENSÃO'

Um multiplicador de tensão é um circuito retificador capaz de produzir uma saída de tensão de corrente contínua a partir de uma entrada de corrente alternada, porém, diferente de um retificador comum, a tensão de saída é um múltiplo inteiro da tensão de entrada, e esse múltiplo é determinado pela quantidade de estágios (pares de diodo-capacitor), como mostra as figuras 6 e 7:

Figura 6: Esquema multiplicador 4x



Fonte: ELPROCUS, 2013

Figura 7: Circuito multiplicador 20x



Fonte: do próprio autor, 2024

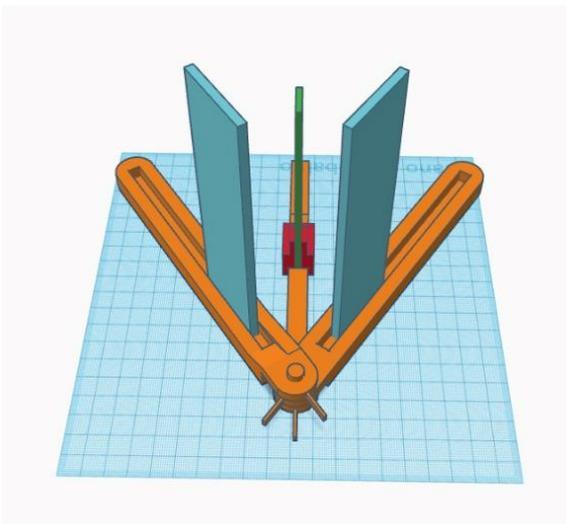
É recomendável cobrir o circuito com epóxi para diminuir perdas e evitar arcos entre as trilhas da placa.

Esse circuito também garante uma camada extra de proteção, pois ao ocorrer uma descarga, os capacitores são descarregados quase instantaneamente, ou seja, a energia liberada é baixa.

3.2. MODELO DO PROPULSOR

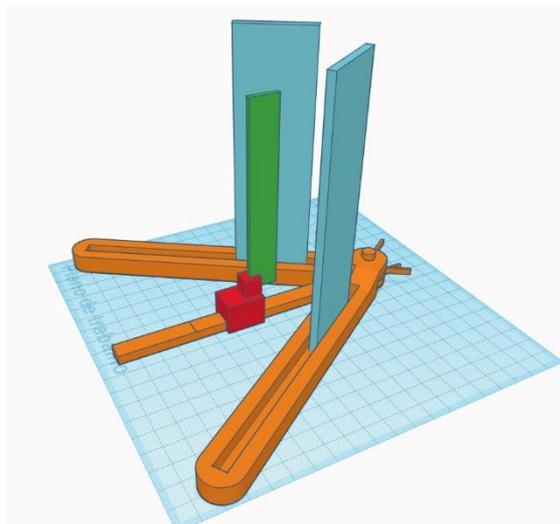
Para fazer o modelo, foi utilizado o princípio apresentado no capítulo 2.1, porém em vez de utilizar um modelo com grades, que é o normalmente utilizado nos propulsores a vácuo, foi desenvolvido um modelo mais simples e que experimentalmente teve maior desempenho, como mostrado nas figuras 8,9,10 e 11:

Figura 8: modelo 3D do propulsor - vista frontal



Fonte: do próprio autor, 2024

Figura 9: modelo 3D do propulsor - vista lateral



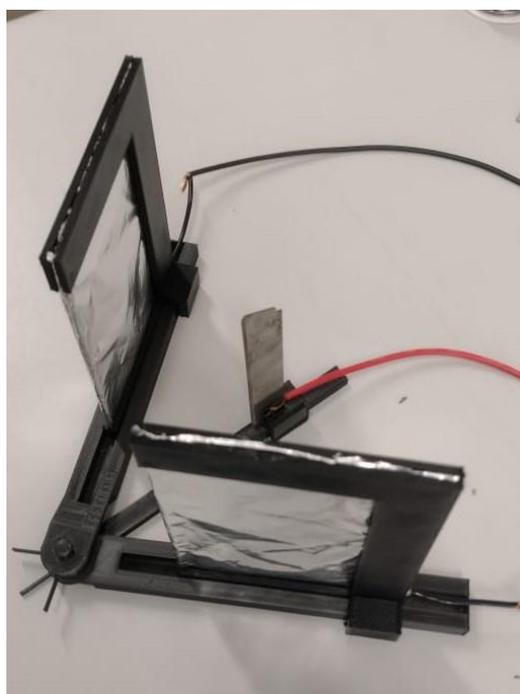
Fonte: do próprio autor, 2024

Figura 10: protótipo montado - vista lateral



Fonte: do próprio autor, 2024

Figura 11: protótipo montado - vista de cima



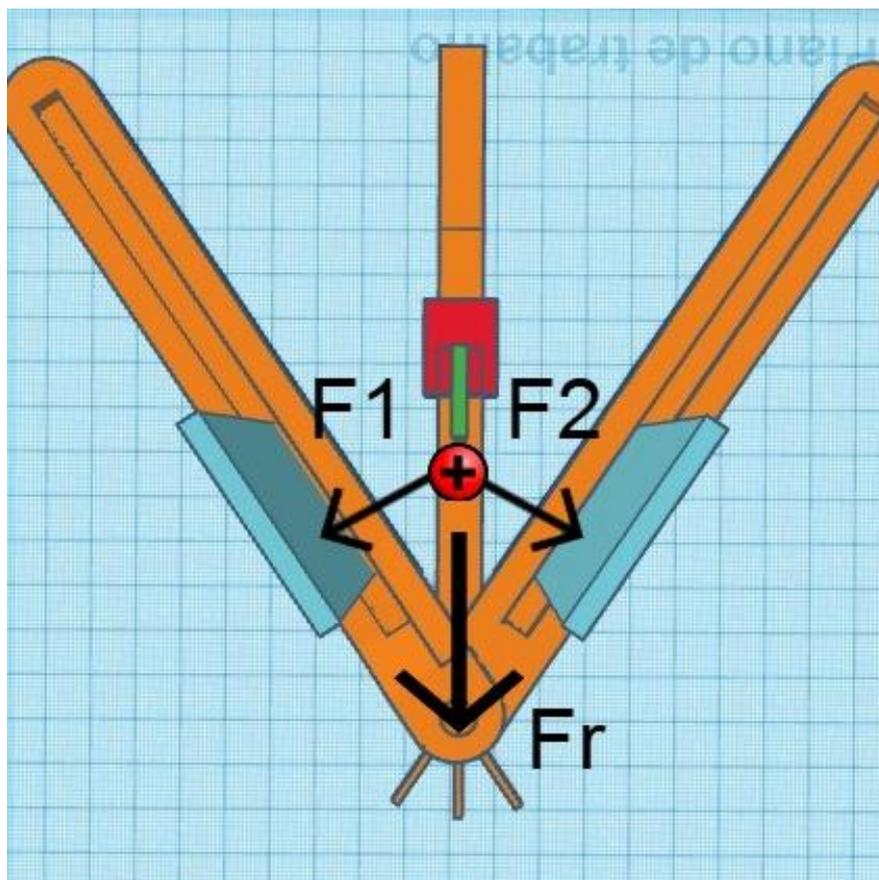
Fonte: do próprio autor, 2024

A forma em verde mostrado nas figuras 8 e 9 é o anodo e possui 100mm de altura, 17,5 mm de largura e 0,5mm de espessura. As formas azuis são os catodos, e cada uma possui 150mm de altura, 90mm de largura e 6,5mm de espessura. Tudo isso está montado em uma base que possibilita a alteração do ângulo entre os catodos e a distância relativa da ponta da lâmina até o centro da dobradiça da figura laranja.

Através da grande diferença de potencial entre os polos, o ar se ioniza e se torna um condutor elétrico, e, conseqüentemente, é atraído pelos catodos que geram um campo elétrico. Esse campo elétrico tem força suficiente para atrair as partículas carregadas dos gases ionizados e, assim, elas são aceleradas. (CICAN, G.; Popa I., 2017).

Como são duas forças atuando nas partículas do ar, e estão equidistantes da lâmina, a força resultante será um vetor paralelo à lâmina, como mostrado na figura 12.

Figura 12: forças atuantes em uma partícula de ar carregada



Fonte: do próprio autor, 2024

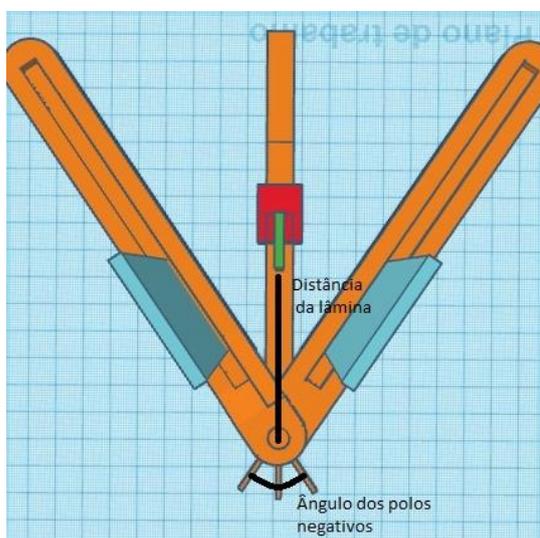
Desse modo, ocorre a aceleração dos íons através de campos elétricos, princípio básico do funcionamento de um propulsor iônico.

4. ESTUDO DE CASO

Após a montagem da parte mecânica, juntamente com a parte elétrica, verificou-se que o funcionamento estava dentro do esperado, gerando com êxito certa força de empuxo.

Variando-se os parâmetros e medidas (ângulo entre os polos negativos e a distância entre lâmina e o centro da dobradiça da base), foi observado uma mudança no empuxo resultante. Os parâmetros alterados foram de acordo com a figura 13. Para quantificar a velocidade de escape do ar, foi posicionado um anemômetro a 9cm de distância, como mostra a figura 14.

Figura 13: parâmetros variáveis



Fonte: do próprio autor, 2024

Figura 14: medição utilizando um anemômetro



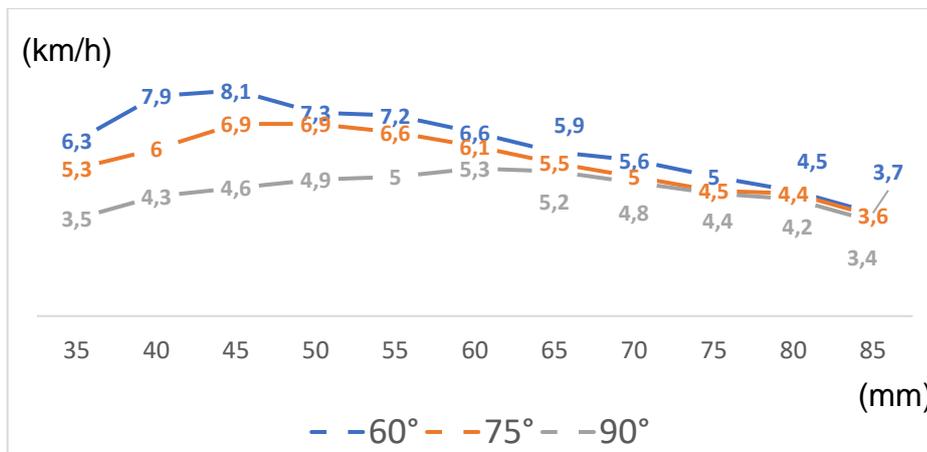
Fonte: do próprio autor, 2024

Os parâmetros previamente mencionados foram alterados em intervalos regulares, e utilizando o anemômetro esses valores foram registrados. Com os dados coletados, um gráfico foi construído com o intuito de encontrar a configuração com melhor desempenho.

É importante mencionar que os valores medidos são levemente influenciados por fatores externos, como a composição e a umidade relativa do ar. Devido a isso, a velocidade de escape pode sofrer uma alteração em um intervalo de ± 1 km/h, os dados representados no gráfico é uma média tirada de diversos valores medidos em diferentes dias com diferentes condições climáticas.

O gráfico 1 mostra a velocidade de escape do ar, em km/h, ao variar o ângulo entre os catodos, e a distância da lâmina.

Gráfico 1: velocidade de escape do ar ao variar parâmetros



Fonte: do próprio autor, 2024

Como mostrado no gráfico 1, ao alterar os valores previamente mencionados, obtém-se uma velocidade de saída diferente. Abaixo de 35mm, há formação de um arco elétrico e, portanto, não ocorre a ionização das partículas da forma desejada e o empuxo é nulo. Quando se aumenta a distância do anodo para distancias maiores que 85mm, observa-se uma diminuição linear do empuxo, uma vez que a distância se torna muito grande, e conseqüentemente a força se torna menor.

É possível observar que a angulação altera significativamente o empuxo, principalmente no intervalo entre 35mm e 55mm, onde o propulsor tem melhor desempenho. Isso se deve ao fato de ao somar vetores com menores ângulos, a resultante é maior. Não foi possível o teste com ângulos menores devido à formação de arcos entre os terminais, esse problema poderia ser possivelmente solucionado utilizando terminais mais uniformes e com menos pontas, ou em último caso diminuindo a tensão, que poderia também conseqüentemente diminuir a força.

Consumindo 24W de potência elétrica, a potência máxima, a análise com um anemômetro consta que a velocidade do “vento” gerado varia de 0 a 8,1 km/h. Um comparativo seria o caso o de uma ventoinha de computador genérica, que, com apenas 2,76W, é capaz de gerar uma saída com velocidade de 12 km/h, sendo muito mais eficiente e gerando mais força.

Mesmo a comparação sendo desmotivadora, o propulsor iônico possui diversas vantagens em relação à ventoinha. Como o fato de não ter nenhuma parte móvel, diminuindo perdas por atrito e conseqüentemente podendo durar muito mais, ou de ser completamente silencioso.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo foi realizado de maneira simples e demonstrativa, com materiais comuns - como papel alumínio e lâminas genéricas - e métodos de análise recatados, para estudar o possível uso dessa tecnologia. Nesse quesito, o estudo foi satisfatório. Apesar da baixa eficiência, provou que é possível a utilização do conceito de propulsão iônica na atmosfera mesmo de forma simples. Consequentemente, uma maior aprofundação em diferentes técnicas e métodos podem levar a um desempenho suficiente para aplicações práticas onde a eficiência é maior comparado aos métodos de propulsão convencionais.

Assim, fica visível que é necessária uma maior flexibilidade na produção de um protótipo, como: acesso à tecnologia mais precisa e manufatura de peças e partes mais complexas; placas dos catodos mais planas; utilização de anodos com formatos diferentes; testes com o anodo em temperaturas mais altas, causando o efeito termiônico; uma fonte com diferentes larguras de pulso e mais eficiente; uma estrutura mecânica com mais parâmetros; e a possibilidade de construção em maior escala. Assim, será possível uma maior apuração de dados e afirmações conclusivas a respeito da utilização eficiente da propulsão iônica.

Analisando os resultados obtidos, não se deve ser pessimista. Assim como os primeiros carros não chegavam à 15 km/h e hoje chegam à mais de 300 km/h, a propulsão iônica é uma tecnologia em potencial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

All About Circuits; Ohm's Law (again!). 09 fev. 2015. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-3/ohms-law-again/>.

Acesso em: 29 out. 2024.

ARBIT H.; CLAPP S.; NAGAI K.; **LITHIUM-FLUORINE-HYDROGEN PROPELLANT INVESTIGATION**. ROCKETDYNE, NASA, maio 1970.

Brian K.; **The Double Asteroid Redirection Test (DART) mission electric propulsion trade**. IEEE Aerospace Conference, 2017.

Burton R.; Turchi P.; **Pulsed plasma thruster**. *Journal of Propulsion and Power*, 1998

Chattock A.; **On the Velocity and Mass of the Ions in the Electric Wind in Air**. *The Philosophical Magazine*, 1899

Choueiri E.; **A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906-1956)**. *Journal of Propulsion and Power*, 2004.

Cican, G.; Popa I.; **Optimizing ideal ion propulsion systems depending on the nature of the propellant**. Bucharest, Romania: *International Conference of Aerospace Sciences*, 2016.

diymore; 15KV High Frequency DC High Voltage Arc Ignition Generator Inverter Boost Step Up 18650 DIY Kit U Core Transformer Suite 3.7V. Disponível em: https://www.diymore.cc/products/15kv-high-frequency-dc-high-voltage-arc-ignition-generator-inverter-boost-step-up-18650-diy-kit-u-core-transformer-suite-3-7v?_pos=15&_sid=496d2fb0c&_ss=r. Acesso em: 29 out. 2024.

Holste K.; Dietz P.; Scharmann S.; Keil K.; Henning T.; Zschätzsch D.; Reitemeyer M.; Nauschütt B.; Kiefer F.; Kunze F.; Zorn J.; Heiliger C.; Joshi N.; Probst U.; Thüringer R.; Volkmar C.; Packan D.; Peterschmitt S.; Brinkmann K.; Zaunick H.; Thoma M.; Kretschmer M.; Leiter H.; Schippers S.; Hannemann K.; Klar P; **Ion thrusters for electric propulsion: Scientific issues developing a niche technology into a game changer**. *Rev. Sci. Instrum.* 91, 061101, doi: 10.1063/5.0010134, 2020.

loces; Improving Mazzilli's Driver. 18 jun. 2023. Disponível em: <https://blog.ioces.com/matt/posts/improving-mazzillis-driver/>. Acesso em: 29 out. 2024.

KAIZER POWER ELECTRONICS; **Mazilli ZVS Flyback Driver**. 23 out. 2009. Disponível em: <https://kaizerpowerelectronics.dk/high-voltage/mazilli-zvs-flyback-driver/>. Acesso em: 29 out. 2024.

Lev D.; Mikellides I.; Pedrini D.; Goebel D.; Jorns B.; McDonald M.; **Recent progress in research and development of hollow cathodes for electric propulsion**. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41614-019-0026-0>. Acesso em: 07 out. 2024.

MIT News; **MIT engineers fly first-ever plane with no moving parts**. 21 de novembro de 2018. Disponível em: <https://news.mit.edu/2018/first-ionic-wind-plane-no-moving-parts-1121>. Acesso em: 09 out. 2024.

NASA; **Starlink 30037 NSSDCA/COSPAR ID: 2023-026T**, 2023. Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2023-026T>. Acesso em: 07 out. 2024.

Sovey J.; Rawlin V.; Patterson M.; **A synopsis of ion propulsion development projects in the United States: SERT I to deep space 1**. 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Junho 1999.

Wilson J.; Perkins H.; Thompson W.; **An Investigation of Ionic Wind Propulsion**. NASA/TM—2009-215822, 2009.