



Sistemas de Propulsão Elétrica para Satélites

Buscando expandir os horizontes da exploração espacial, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas. Entre elas, vêm se destacando os propulsores elétricos, que podem ser alimentados por painéis solares e utilizam consideravelmente menos propelentes do que os sistemas de propulsão química convencionais. A NASA vem desenvolvendo o projeto SEP (*Solar Electric Propulsion*—Propulsão Elétrica Solar, em português) visando realizar uma gama de missões espaciais de próxima geração.

Recentemente, foi anunciada a entrada em operação de um satélite que utiliza propulsão exclusivamente elétrica, dispensando propulsores químicos tradicionais para manobras.

No final de 2018, a Universidade de Würzburg, na Alemanha, lançou um CubeSat 1U para caracterizar e demonstrar um sistema de propulsão elétrica exclusivo para CubeSats, seguindo a metodologia de componentes comerciais padronizada para estes artefatos. Em 2017, o portal [SpaceNews](#) publicou uma matéria apontando uma tendência de incorporação sistemas de propulsão elétrica em atividades comerciais. Segundo relatórios e previsões da indústria aeroespacial, até 2020, 50% de todos os satélites a serem lançados serão exclusivamente elétricos.

Neste boletim, são apresentados resultados do levantamento de informações realizado pelo Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE) do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) sobre propulsão elétrica para satélites, em especial para CubeSats, e sobre veículos lançadores de satélites de pequeno porte. Ademais, são apresentados alguns dados que constam do banco de dados do OTE sobre CubeSats e dados relacionados à situação de satélites no mundo.

CubeSats

Tendência de alta

Crescimento do número de objetos no espaço

A retomada do espaço

**Um histórico de
lançamentos desde 1957**

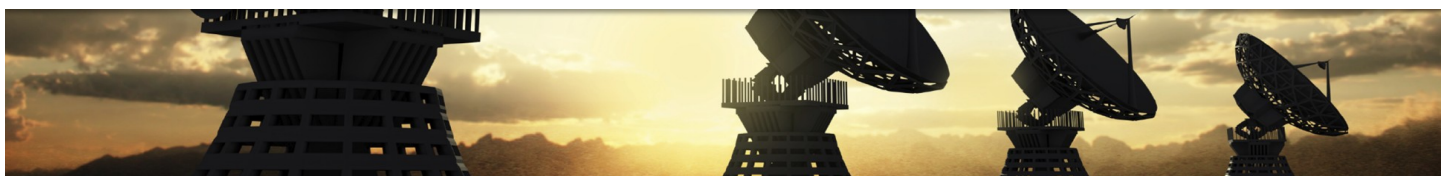
Pequenos Lançadores

**Oportunidades para novos
players**

Propulsão Elétrica

**Formas de energia mais
limpas e eficientes chega ao
espaço.**

**Novas tecnologias para uso
em nanossatélites**



CubeSats

O monitoramento da tecnologia CubeSat (tipicamente, pequenos satélites com massa de um a dez quilogramas) pelo OTE/CGEE tem constatado uma deriva destes artefatos do meio acadêmico para aplicações em outras áreas, em especial aplicações comerciais, civis e militares. O aumento do uso de CubeSats nessas aplicações segue um tendência de miniaturização de artefatos na área espacial.

Hoje, a indústria espacial tem escolhido satélites menores para atender as mais variadas demandas. Como pode ser observado na Figura 1, foram lançados 663 pequenos satélites para uso comercial no período de 2012 a 2018, a grande maioria composta de CubeSats para uso em sensoriamento remoto. Algumas empresas têm dominado esse mercado, como Planet e a Spire, que respondem pela maioria destes satélites, mas novos *players* têm entrado no mercado.

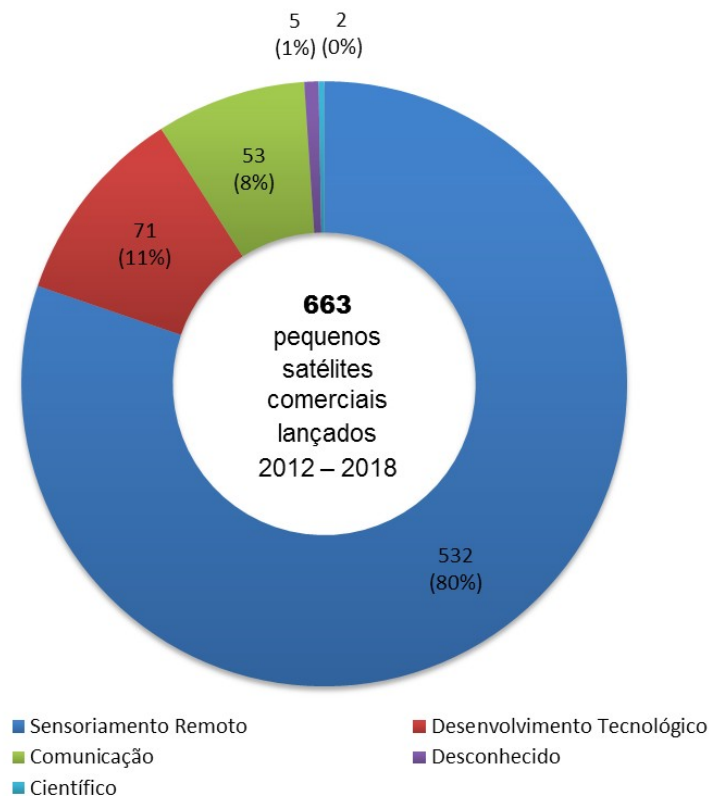


Figura 1: Distribuição de uso dos pequenos satélites. FONTE: adaptado de Bryce (2019)

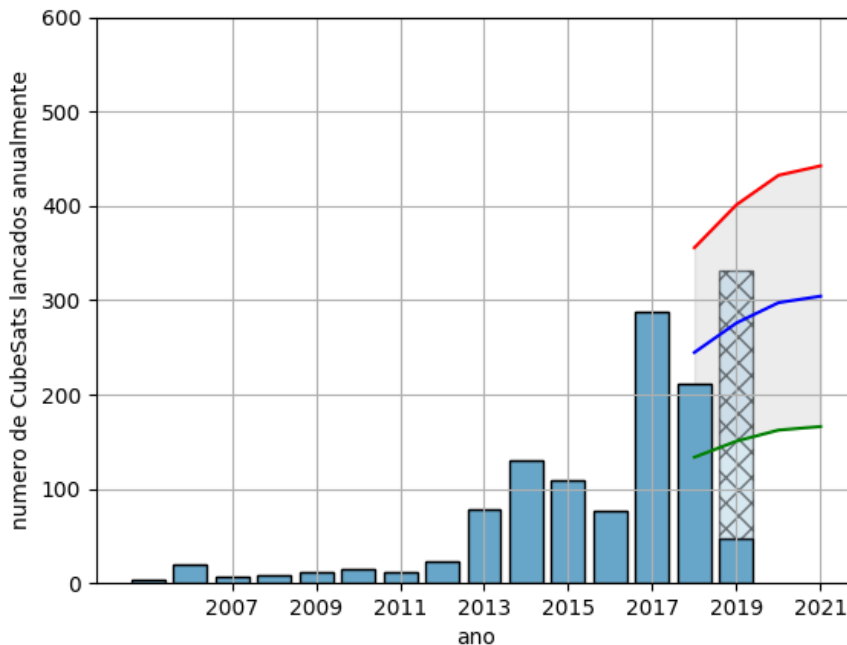
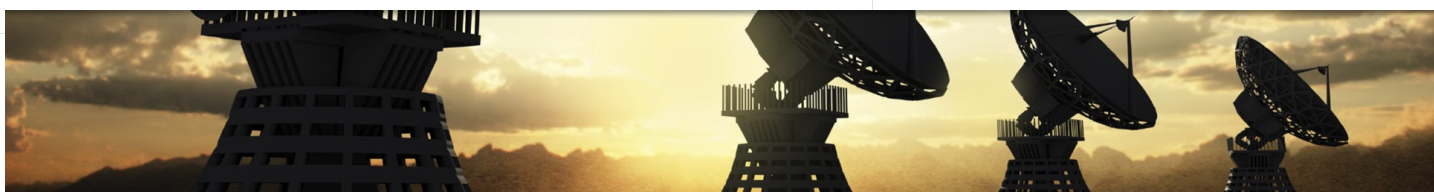


Figura 2: Número de CubeSats lançados anualmente e projeção de lançamentos até 2021.

As informações acumuladas sobre CubeSats encontram-se em um banco de dados que está disponível ao público no site <https://www.cgge.org.br/web/observatorio-espacial/bancos-de-dados>

Foi por meio deste banco de dados que o OTE identificou o primeiro CubeSat lançado que utiliza sistema de propulsão elétrica para controle de órbita e atitude. Até 30 de junho, foram armazenadas informações sobre 1067 CubeSats e seus respectivos lançadores. Estão disponibilizadas no banco de dados informações como objetivo da missão, data de lançamento, construtor, classe (1U, 2U...), status da missão, descrição da carga útil, capacidades da plataforma, informações de órbita, estações de terra e referências bibliográficas das missões.

Em 2018 foram lançados 212 CubeSats, bem aquém dos esperados 352 para o ano. Contudo, o lançamento do milésimo CubeSat ocorreu ainda em 2018, como o OTE havia previsto. Na Figura 2, é apresentada uma nova projeção pra o número de CubeSats que serão lançados nos próximos anos. Uma tendência de alta ainda é prevista, com estimativa de cerca de 280 ± 125 CubeSats a serem lançados em 2019.



O crescimento do número de objetos no espaço

Os próximos dez anos serão interessantes para o mercado de pequenos satélites. É improvável que o nível atual de crescimento recente seja mantido, mas certamente haverá um número significativo de satélites sendo lançados a cada ano. O governo do Reino Unido previu no ano passado que serão lançados dois mil pequenos satélites até 2030, e pretende entrar neste mercado com a oferta de lançamentos. Isso representa cerca de 200 pequenos satélites lançados por ano somente pelo Reino Unido.

De acordo com o Índice de Objetos Lançados ao Espaço Exterior (*Index of Objects Launched into Outer Space*), mantido pelo Escritório das Nações Unidas para Assuntos do Espaço Exterior (*United Nations Office for Outer Space Affairs*, UNOOSA), 452 objetos foram lançados ao espaço em 2018, que é praticamente o mesmo número de objetos lançados em 2017 (453), que foi o ano em que mais objetos foram lançados ao espaço.

Segundo a UNOOSA, na história, um total de 8 645 objetos foi lançado ao espaço. Atualmente, cerca de 5030 satélites ainda estão circulando a Terra ou em posições geostacionárias. Destes, de acordo com a UCS (Union of Concerned Scientists), 2062 objetos estão operando e orbitando a Terra (dados de 1º de abril de 2019).

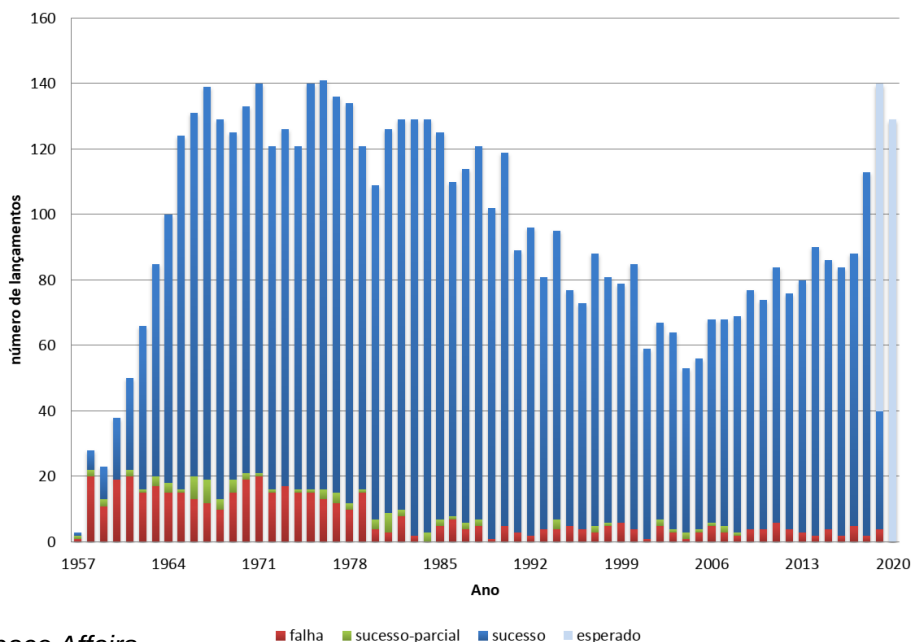


Figura 3: Número de lançamentos ao longo da história. FONTE: OTE (adaptada de [Space Launch Report](#)).

Um histórico dos lançamentos desde 1957

Na Figura 4, é mostrado o número de objetos satelitais lançados ao espaço todos os anos desde o primeiro lançamento em 1957. Nos primeiros oito anos houve um crescimento constante e, depois de 1965 até o início de 1990, geralmente cerca de 150 (± 20) objetos foram lançados todos os anos. Nos vinte anos seguintes, houve uma oscilação para cima e para baixo, com uma baixa de 72 objetos lançados em 2005; depois disso constata-se um crescimento. No entanto, o crescimento impulsionado por CubeSats e pequenos satélites pode ser visto a partir de 2013.

À medida que estes nanosatélites provam sua habilidade para imagear a superfície terrestre e coletar dados científicos, os desenvolvedores almejam utilizar essas pequenas naves para executar missões cada vez mais complexas, muitas delas demandando alguma forma de propulsão. A propulsão é utilizada para alterar a órbita ou a atitude dos pequenos satélites de acordo com as diretrizes da missão.

Contudo, a falta de opções de lançamentos para estes pequenos satélites continua sendo o principal gargalo. Os custos de manufatura de pequenos satélites estão diminuindo e, portanto, está tendo uma grande demanda pelo lançamento de tais satélites.

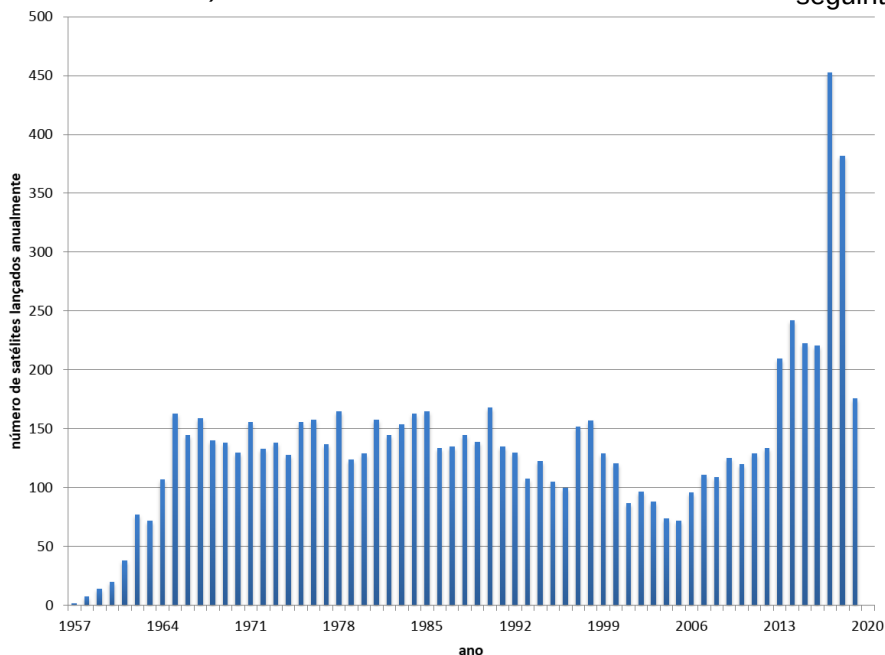


Figura 4: Número de satélites lançados ao espaço por ano. FONTE: OTE (adaptada de UCS).



Pequenos lançadores

A crescente demanda pelo lançamento de pequenos satélites abriu oportunidade para empresas construírem pequenos lançadores e supri-la com serviço comercial de lançamento de satélites. Um relatório da Northern Sky Research, divulgado recentemente, conclui que o mercado dedicado de lançamento de pequenos satélites comerciais terá crescimento rápido nos próximos anos, resultando em uma receita de mais de USD 2,2 bilhões.

Vários pequenos lançadores encontram-se em fase de desenvolvimento e as entidades desenvolvedoras focam seus projetos em pequenos satélites, incluindo CubeSats. Alguns destes atores têm anunciado contratos para o lançamento de pequenos satélites (e.g. Virgin Orbit, Rocket Lab, Vector), e alguns deles já possuem veículos prontos para serem lançados (e.g. Electron – Rocket Lab). A Rocket Lab realizou, em 2018, três lançamentos bem sucedidos de seu pequeno lançador Electron, sendo 2 deles no modo *rideshare*, ou seja, levaram junto satélites menores, como CubeSats, três deles para aplicações comerciais. Até 30 de junho de 2019, a Rocket Lab havia lançado sete Electrons (6 sucessos e 1 falha), sendo que um deles levou dois CubeSats com tecnologia experimental. Outros 5 CubeSats com o mesmo intuito foram colocados em órbita no terceiro lançamento, também como caronas de um satélite de pequeno porte.

Contudo, grandes constelações de pequenos satélites estão sendo planejadas (e.g. SpaceX, Boeing, etc.) envolvendo desde algumas centenas até mais de mil satélites. Este grande número de objetos a ser lançado aumenta a preocupação com detritos orbitais. A introdução de pequenos lançadores dedicados que coloquem estes objetos em órbitas baixas, que têm decaimento mais rápido, aparece como a alternativa mais prudente para solucionar esse problema.

Os satélites estão ficando menores e cada vez mais capazes. Por isso, novas empresas estão se formando para explorar um mercado promissor em termos de relação custo/benefício. De um modo geral, os custos de satélites de pequeno porte são bem inferiores aos custos de satélites de maior porte.

Há cada vez mais empresas com capacidade de colocar em órbita pequenos satélites. Esta demanda de mercado está sendo preenchida rapidamente por novos pequenos lançadores. E, para atender essa

demanda, a cadência desses lançamentos deve aumentar nos próximos anos. Existem algumas lacunas para empresas e/ou agências preencherem, como, por exemplo, lançamentos de baixo custo, com foguetes oferecendo margem para *payloads* até 50 ou 100 kg para a órbita baixa da Terra.

Há muitos novos atores competindo por essa fatia do mercado e tentando atender o crescimento explosivo dos pequenos de satélites. Essas pequenas empresas, normalmente *startups*, concorrem com as grandes. Há muitos requisitos que devem ser atendidos, como oferta de voos com baixos custos, lançamentos em tempo reduzido e em órbitas dedicadas.

Apesar da economia de custos em comparação com outras abordagens, muitos provedores de satélites comerciais estão exigindo mais controle sobre os requisitos de missão que são de outra forma abandonados ao se voar em uma missão compartilhada. Este fenômeno é representado na Figura 5.

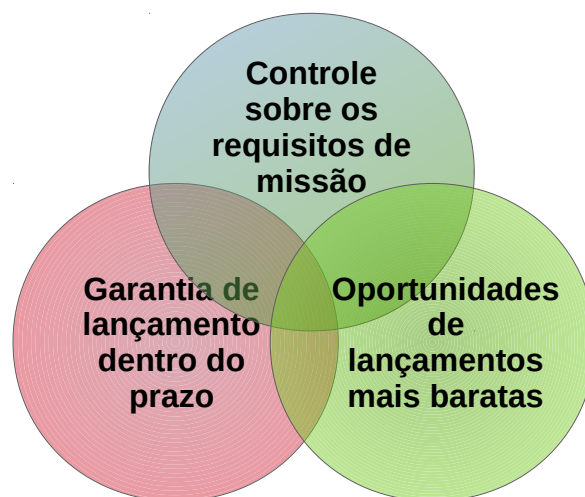


Figura 5: Balanço entre requisitos para a escolha de veículos lançadores.

Com o aumento vertiginoso no número de satélites sendo lançados, em especial satélites de pequeno porte, é preciso levar em consideração a necessidade de manobras para controle de altitude, atitude e órbita desses objetos. A indústria tem atualmente optado por propulsores elétricos como uma alternativa aos propulsores químicos, pois são, em geral, mais compactos e usam menos propelente. Essas características se adequam às necessidades dos pequenos satélites que tendem a dominar o mercado num futuro próximo.



Propulsão Elétrica

A tendência por formas de energia mais limpas e eficientes chega ao espaço.

A propulsão elétrica usa energia elétrica para energizar ou acelerar um propelente. Mais de 200 satélites já operaram ou operam algum tipo de propulsão elétrica. A propulsão que usa energia elétrica para acelerar o propelente na forma de plasma é conhecida como propulsão a plasma. A propulsão a plasma utiliza a energia elétrica para, primeiro, ionizar o propelente e, em seguida, fornecer energia ao plasma resultante, levando à aceleração do sistema. Muitos tipos de propulsores a plasma foram desenvolvidos nos últimos 50 anos.

CubeSats, mesmo sendo satélites extremamente pequenos, contêm vários subsistemas, incluindo o de controle de atitude, que inclui propulsão, responsável pela mobilidade do satélite enquanto está em órbita. Tanto em satélites tradicionais como em CubeSats, a classificação mais geral dos sistemas de propulsão se resume em elétrico e não elétrico.

Os elétricos são aqueles que dependem inteiramente do sistema de alimentação do satélite. Os diferentes tipos de propulsores elétricos incluem *resistojets*, *eletrospray*, *propulsores iônicos*, *propulsores de efeito Hall* e *pulsed plasma thrusters*. Por outro lado, os não elétricos necessitam de energia do sistema de alimentação apenas para regular os processos de propulsão, ou seja, durante sua ignição e desligamento.

Um sistema de propulsão é analisado em função de quatro fatores de desempenho: empuxo gerado, impulso específico, velocidade de saída do propelente e variação de velocidade gerada relativa às massas que do objeto antes e após a ignição.

Sistemas de propulsão a gás frio (CGP)

Propulsores desse tipo são considerados os mais simples em termos de princípios de operação e de projeto, uma vez que não ocorre nenhum processo de combustão, fazendo com que o único elemento necessário seja um propelente sem oxidantes.

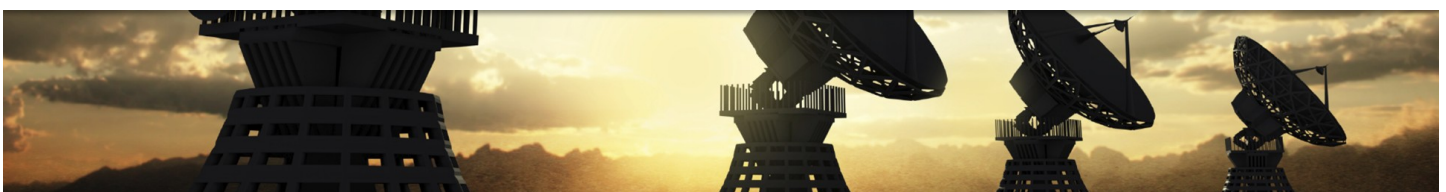
O propelente pode ser gasoso ou líquido, a depender do tempo de vida útil previsto da missão. Propelentes líquidos resultam em uma capacidade de armazenamento menor, sendo recomendado para missões de curta duração, especialmente para CubeSats. Entretanto, tais propelentes podem causar uma desestabilização do satélite devido ao seu movimento interno no tanque de armazenamento.

O propelente utilizado, independentemente de ser gasoso ou líquido, deve ter uma alta densidade de impulso específico, tendo em vista a durabilidade do propelente. A grande desvantagem desses sistemas é a redução da pressão que atua sobre o propelente dentro do tanque conforme este é utilizado, o que, por sua vez, reduz o empuxo gerado. No mérito de custos, outro fator importante a ser considerado é a toxicidade do propelente, de maneira que podem ser aumentados os custos resultantes de medidas de segurança, transporte e armazenamento destes

Sistema de propulsão por combustível sólido (SRPS)

Assim como no sistema líquido, utiliza a liberação dos gases emitidos durante a combustão do propelente, os quais devem ser armazenados em estado sólido com um oxidante. Entretanto, os propelentes sólidos já são mantidos na própria câmara de combustão, descartando a necessidade de um tanque adjacente. A grande desvantagem desse sistema é a falta de controle na taxa com que o propelente queima, resultando numa dificuldade de controlar o empuxo gerado.

A Aerospace Corporation desenvolveu um sistema de pás externas removíveis, acopladas ao lançador de maneira a controlar a direção do fluxo dos gases emitidos. Outra solução para este problema foi sugerida pela Digital Solid State Propulsion (DSSP), por meio da invenção de um novo propelente elétrico sólido (ESP), que é um propelente menos agressivo ao meio ambiente e é baseado em nitrato de hidroxilamina. Usado em um satélite (SPINSAT), o ESP também é mais seguro, pois sua ignição só ocorre mediante um suprimento contínuo de energia elétrica, reduzindo a chance de acidentes.



Sistemas de propulsão líquida (LP)

Diferentemente do anterior, sistemas de propulsão líquida não ejetam o propelente, mas sim os gases emitidos durante o processo de combustão. Propulsores dessa categoria que utilizam apenas um propelente são chamados de monopropelentes e aqueles que utilizam dois, de bipropelentes. Os sistemas LP monopropelentes exigem a presença de um catalisador na reação de ignição para gerar empuxo de maneira rápida. Já os bipropelentes necessitam de um agente oxidante para sofrerem combustão de maneira efetiva. Tradicionalmente, sistemas de propulsão líquida, sejam eles mono ou bipropelentes, são utilizados em grandes satélites para inserção em órbita ou controle de atitude. Nos últimos 60 anos, o propelente mais utilizado foi a altamente tóxica hidrazina (N_2H_4), uma vez que opera em altas pressões e possui alta densidade de impulso específico, mesmo sendo um composto de baixa densidade. Nos últimos anos, uma nova tendência global surgiu no desenvolvimento de propelentes menos tóxicos, tanto para quem os manipulam, quanto para o meio ambiente, atingido pelos gases emitidos após combustão. O hexafluoreto de enxofre (SF_6) é um exemplo de propelente não agressivo que tem propriedades físicas que resultam em um desempenho superior à hidrazina, necessitando apenas de uma temperatura mais alta de ignição. Visando uma melhor adaptação desse tipo de sistema para CubeSats, foram desenvolvidos diversos modelos customizados pelo número de unidades que serão utilizadas, variando de 0,5 U a 2, 0U.

Resistojets

Esse sistema de propulsão tem um princípio de funcionamento similar à propulsão por gás frio, diferindo pelo fato de que o propelente é superaquecido por um elemento de aquecimento antes de ser ejetado. A vantagem que este aquecimento fornece é uma velocidade de saída consideravelmente superior (2,0 a 2,2 km/s), se comparada à velocidade gerada no CGP (0,3 a 0,7 km/s), devido à maior energia acumulada pelo propelente. A maior desvantagem desse sistema é a limitação de desempenho vinculada ao ponto de ebulição do elemento de aquecimento utilizado. Assim como o sistema LP, efeitos de desequilíbrio resultantes do movimento do propelente no tanque de armazenamento podem ser observados. Uma solução para esse problema é o chamado *Free Molecule Micro Resisojet (FMMR)*,

o qual usa água como propelente, devido a sua baixa massa molecular, alta densidade e alta pressão de vapor em temperaturas orbitais típicas.

Radio-Frequency Ion Thruster (RIT)

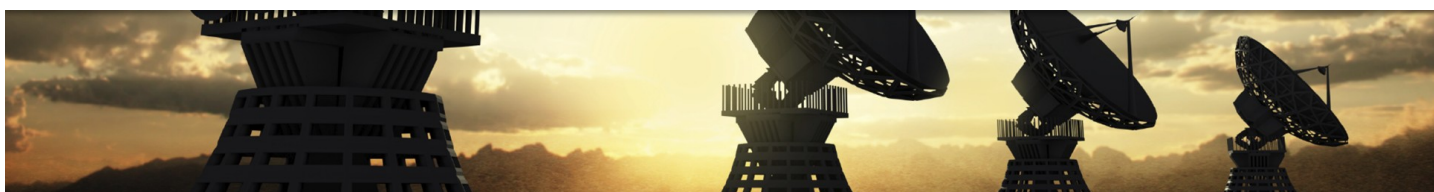
Propulsores iônicos de radiofrequência geram empuxo por meio da aceleração de um propelente ionizado (plasma) através de um campo eletrostático. O propelente fica armazenado em seu estado neutro, só sendo ionizado por radiofrequência e transformado em plasma quando entra na câmara de descarga. Esse tipo de propulsor é caracterizado por empuxo, impulso e eficiência elevados, porém é afetado com o desgaste dos polos (ânodo e cátodo) e sofre contaminação resultante de uso prolongado. Efeitos de contaminação podem ser mitigados com a utilização de gases inertes como propelente, tais como neônio, criptônio e xenônio.

Propulsor de efeito Hall

A geração de empuxo em propulsores Hall ocorre por meio da ionização e aceleração do propelente sob efeito de campos elétrico e magnético mutuamente perpendiculares. O efeito Hall enuncia que, ao se aplicar corrente elétrica em um material condutor (no caso do propulsor, o propelente) colocado em campos elétrico e magnético mutuamente ortogonais, uma diferença de potencial é gerada, também perpendicular aos dois campos.

Na estrutura do propulsor, os campos são arranjados de tal forma que o campo magnético seja radial, e o elétrico axial. O campo magnético é responsável por reter os elétrons originados do cátodo externo, mantendo o fluxo eletrônico na região em que o campo elétrico atua. Este tipo de propulsor tem um dos mais altos impulsos específicos, em comparação com os outros sistemas supracitados, além de alta densidade de empuxo, assim como a simplicidade de sua engenharia. Dentre seus pontos negativos, podem ser mencionados efeitos de corrosão nos circuitos magnéticos devido a descarga de plasma e sua baixa eficiência.

Os propulsores Hall são divididos em duas grandes categorias: camada magnética e camada de ânodos. Os de camada magnética têm zonas de aceleração de grande extensão, visando alta ionização e estabilidade.



Já os de camada de ânodos possuem zonas de aceleração estreitas e a temperatura dos elétrons é mais elevada, devido à menor perda de energia. Alguns elementos pesados podem ser citados como propelentes típicos, tais como xenônio (Xe), criptônio (Kr), iodo (I) e argônio (Ar). Tendo em vista o funcionamento básico desse propulsor, aquele que possuir menor energia de ionização será o propelente mais favorável. A vida útil de propulsores Hall é limitada pelos efeitos de corrosão já mencionados.

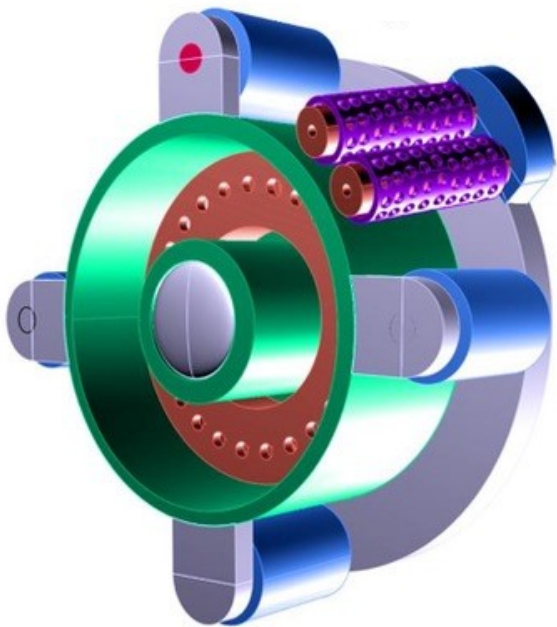


Figura 6: Propulsor por Efeito Hall

Fonte: <http://www.thespacereview.com/article/3637/1>

Electrospray

Propulsores do tipo *eletrospray* são baseados no princípio de extração eletrostática e aceleração de íons obtidos de um propelente líquido para produzir empuxo. Eles não utilizam plasma, eliminando os efeitos de corrosão dos circuitos envolvidos. Podem acelerar íons positivos e negativos, gerando um feixe com qualquer uma das cargas, o que elimina a necessidade de um cátodo externo para neutralizar os íons ejetados.

Os propelentes típicos são líquidos iônicos com valores consideravelmente pequenos de pressão de vapor, reduzindo a necessidade de pressurização.

A eficiência do propulsor *eletrospray* é variada por meio da voltagem que passa pelos eletrodos. A extração de partículas carregadas ocorre por meio de dois processos, os quais determinam o propulsor específico, podendo ser do tipo colóide ou *field emission*.

A utilização de líquidos iônicos como propelentes faz com que os propulsores operem em baixas voltagens, possuam alta condutividade e não necessitem de processos de aquecimento.

Pulse Plasma Thruster (PPT)

O funcionamento desse propulsor se resume na criação de uma descarga pulsada de alta corrente sobre uma superfície isolante exposta, a qual serve como propelente. Ao sofrer a descarga, o material propelente sofre vaporização, sendo ionizado e acelerado, caracterizando um pulso de plasma. O pulso de corrente responsável por ionizar o material propelente é gerado por um capacitor que é sucessivamente carregado e descarregado contido na unidade de processamento de energia (PPU - do inglês *power processing unit*).

A corrente elétrica gerada na PPU chega aos eletrodos através do capacitor, atingindo o pulso de plasma sobre a superfície isolante, o que induz um campo magnético e completa um ciclo do propulsor. A aceleração do plasma é resultante da ação da força de Lorentz, gerada pelo pulso de corrente e o campo magnético induzido. A alta regulação da intensidade dos pulsos utilizados destaca esse propulsor para manobras de alta precisão, contribuindo para a estabilidade em geral do objeto da missão.

Por utilizar pulsos de plasmas, este também sofre efeitos de corrosão, como mencionado no propulsor de efeito Hall, comprometendo também a eficiência do propulsor. A superfície isolante costuma ser formada de Teflon, um propelente sólido, não tóxico e inerte, porém, com os efeitos de erosão, pode ocorrer carbonização em camadas da superfície, prejudicando a eficiência do propulsor.



Observatório de Tecnologias Espaciais
Boletim Número 1, Ano 4, junho de 2019



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

SCS Quadra 9 Torre C 4º andar salas 401 a 405

Edifício Parque Cidade Corporate

70308-200 - Brasília, DF

Telefone: (61) 3424.9600



www.cggee.org.br

ote@cggee.org.br

[@CGEE_oficial](https://twitter.com/CGEE_oficial)

