



Propulsor Electrospray: Breve Revisão da Literatura e Introdução à Metodologia de Desenvolvimento

MILHOMEM, G. P.¹, INTINI MARQUES, R.²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

¹Aluno de Mestrado do curso de Combustão e Propulsão – PCP.

²Pesquisador, orientador.

gabrielpacmil@gmail.com

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre propulsores electrospray e uma metodologia para o projeto dos mesmos. A revisão parte do início do século XX, com as primeiras pesquisas com sprays eletrostáticos, passando pelas primeiras tentativas de criação de tais propulsores na década de 60 e indo até os dias de hoje, com o atual estado da arte. A metodologia indica as etapas a serem seguidas no projeto que está sendo desenvolvido no Laboratório de Propulsão Elétrica do LABCP/INPE.*

Palavras-chave: Propulsão Elétrica; Micropropulsores; Electrospray; Spray Eletrostático;

1. Introdução

Uma tendência observada na tecnologia é a miniaturização, isso pode ser percebido, por exemplo, nos computadores de hoje em dia, que são menores do que as suas primeiras versões. Essa tendência também é notada na indústria aeroespacial, pois como colocar algo no espaço custa milhões de dólares, uma forma de reduzir custos é através da diminuição do tamanho dos satélites visando aumentar o número de objetos que podem ser lançados em um mesmo foguete de uma só vez [Benetti, 2017].

Junto com a diminuição do tamanho dos satélites e espaçonaves, existe uma necessidade da miniaturização dos sistemas propulsivos e de atitude dos mesmos e desse modo, o estudo sobre micropropulsores tem se tornado cada vez mais relevante. Os atuais melhores candidatos para isso são os propulsores *electrospray*, pois são mais simples e fáceis de serem miniaturizados do que os propulsores químicos e outros propulsores elétricos, além de possuírem valores altos de eficiência e impulso específico [Krpoun, 2009; Mueller, 2010].

Os propulsores *electrospray* se baseiam no uso de campos eletrostáticos para a aceleração de partículas eletricamente carregadas. Essas partículas carregadas são extraídas de um líquido iônico que está no interior de um tubo capilar. Se o campo elétrico for forte o suficiente, a tensão superficial será superada e o líquido será deformado na ponta do tubo formando um cone e um jato. Com o aumento da intensidade do campo elétrico, o jato eventualmente irá se romper em gotas de vários tamanhos, podendo até expelir íons (Figura 1). O empuxo nesses propulsores é obtido pela ejeção dessas partículas com valores altos de velocidade [Krpoun, 2009].

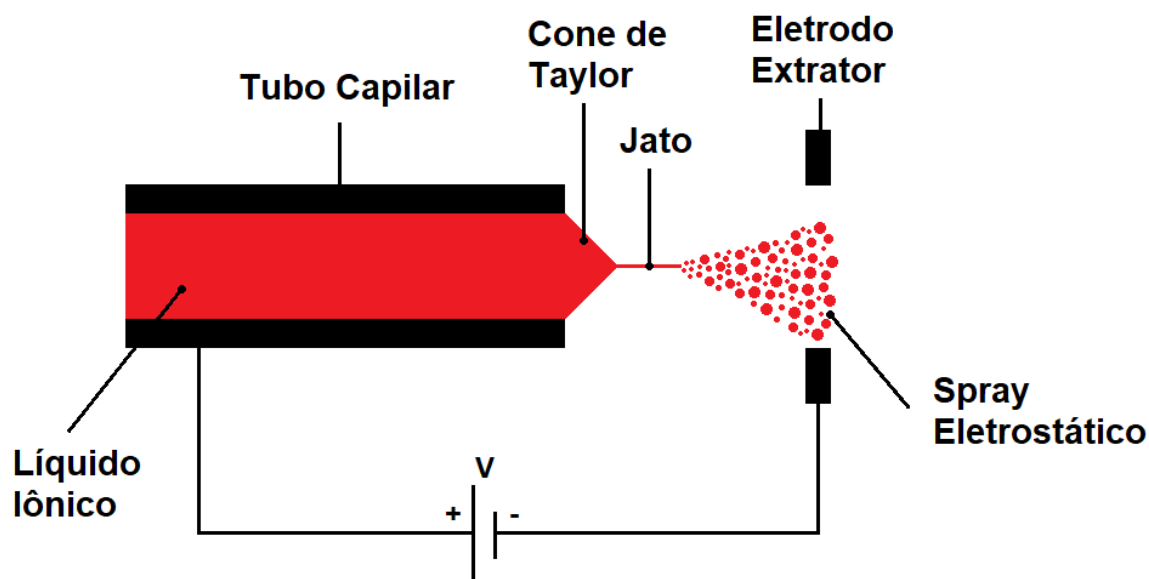


Figura 1. Propulsor *electrospray*.

O presente trabalho apresenta inicialmente uma breve revisão bibliográfica sobre os propulsores *electrospray* como a parte inicial do projeto do desenvolvimento de um propulsor desse tipo. Em seguida é mostrada a metodologia que será seguida para a realização desse projeto.

2. Revisão Bibliográfica

A descoberta do spray eletrostático foi realizada por John Zeleny no início do século XIX, onde, através de experimentos com diferentes líquidos (ácido hidrocloreídrico, etanol e glicerina), observou-se que ao submeter um líquido inserido em tubo capilar a uma diferença de potencial, observa-se a formação de um cone de fluido em uma das extremidades do tubo [Zeleny, 1917] (Figura 1). G.I. Taylor, demonstrou que esse cone, agora conhecido como cone de Taylor, é formado devido ao balanço entre a pressão interna do líquido e a pressão elétrica proveniente do campo aplicado. Taylor também mostrou que o ângulo do cone possui valor de $49,3^\circ$ independentemente das propriedades do fluido e da intensidade da tensão aplicada [Taylor, 1969].

Os Estados Unidos foram os pioneiros a pesquisar o uso de sprays eletrostáticos para produzir empuxo em veículos espaciais. Durante a década de 60 foi iniciado um trabalho conjunto entre a TRW inc. e o *Aero Propulsion Laboratory* visando o desenvolvimento de técnicas para medir o empuxo, obter dimensões ótimas dos tubos capilares e estudar propelentes de alto desempenho [Lopez-Urdiales, 2004].

O interesse da NASA nesse tipo de tecnologia se deu ao longo da década de 70, onde Stark e Sherman (1970) inicialmente testaram apenas tubos capilares simples para obter conhecimento e experiência com relação ao controle da formação do spray. Após essa fase inicial, foram testados diversos formatos diferentes de tubos ou emissores, onde a geometria



e o material do emissor foram variados. Também foram realizados experimentos com propelentes diversos.

O interesse europeu nesse tipo de tecnologia também começou durante a década de 70, onde um trabalho conjunto foi iniciado entre o Centro Europeu de Pesquisa e Tecnologia Espacial, com a sigla do nome em inglês sendo ESTEC, e a Universidade de Southampton [Lopez-Urdiales, 2004]. Utilizando uma solução de sódio com iodo glicerinado (20% de NaI de massa), Bayle et al (1972, 1974) realizaram experimentos com diversos emissores distintos.

Diversos problemas foram observados nesses propulsores, sendo o maior deles a degradação da performance após 1000 horas de operação. Ao fim da década de 70, ocorreu o fechamento desses programas em função da destinação de verbas para o projeto do ônibus espacial, enquanto na Europa os investimentos foram destinados para o programa do lançador Ariane [Lopez-Urdiales, 2004].

O ressurgimento do interesse no desenvolvimento de propulsores *electrospray* ocorreu nos últimos anos do século XX. Isso ocorreu como consequência do esforço cada vez maior em se miniaturizar os satélites e espaçonaves, pois esses propulsores são fáceis de serem miniaturizados e possuem valores expressivos de eficiência e de impulso específico [Malyshev et al, 1995]. Outro fator importante para esse reaparecimento, é o fato de a tecnologia com sprays eletrostáticos ter sido continuamente desenvolvida de maneira significativa em outras áreas, apesar do abandono das pesquisas com propulsores *electrospray*. A área mais conhecida da aplicação desses sprays é na técnica de espectrometria de massa para identificação de moléculas biológicas grandes [Fenn et al, 1989]. A popularização dos *electrosprays* por essa técnica fez com que ocorresse um forte desenvolvimento dos componentes envolvidos e com isso facilitando a obtenção dos mesmos, além de diminuir a tensão necessária para formação do cone de Taylor e desse modo, resultando em menos problemas com isolamento elétrico [Lopez-Urdiales, 2004]. Em paralelo às pesquisas com espectrometria, ocorreu a concepção de diversos líquidos iônicos e isso impactou positivamente o desenvolvimento desses propulsores, pois esses líquidos possuem baixíssima pressão de vapor, boa condutividade elétrica e boa performance tanto com tensões positivas quanto negativas [Miller, 2016]. A evolução no desenvolvimento de técnicas de microfabricação e da indústria dos semicondutores também impactou positivamente a pesquisa com esses propulsores, pois permitiu a miniaturização de diversos componentes e a confecção de estruturas mais complexas [Krpoun, 2009].

Recentemente trabalhos acadêmicos relevantes sobre propulsores *electrospray* têm sido feitos no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Isso começou no final dos anos 90 com o início de um estudo em conjunto entre o professor Martínez-Sánchez do MIT, o professor Fernández de la Mora da Universidade de Yale e Vlade Hryuby da Busek. Co. [Martínez-Sánchez et al, 2009]. Um dos principais objetivos dessa união foi a investigação de novos propelentes. Durante estas pesquisas foi observado que é possível formar um spray puramente composto por íons ao se utilizar o líquido iônico 1-etil-3-metilimidazólio tetrafluoroborato (EMI-BF₄) [Romero-Sanz et al, 2003]. Outro objetivo importante foi o desenvolvimento de emissores mais eficientes e assim, Lozano et al (2004) criou o primeiro emissor externamente embebido, onde uma agulha afiada é utilizada para aumentar a tensão aplicada na ponta do emissor, de modo que o cone de Taylor é formado utilizando uma



tensão menor do que seria necessária sem essa alteração na geometria. Os emissores embebidos mantêm uma vazão menor do que os emissores capilares, facilitando assim a formação do spray iônico. Outras características positivas dos emissores embebidos são a não-obstrução do mesmo e o alto valor de impedância do fluido naturalmente fornecido. Estas características foram suficientes para se obter o regime iônico [Velásquez-García, 2004, 2006; Gassend, 2007, 2008]. Visando a melhoria desses emissores, Legge e Lozano (2008) desenvolveram emissores de tungstênio poroso. Esses emissores são mais facilmente reproduzíveis e alcançam o regime iônico com diversos líquidos iônicos diferentes [Legge, 2008]. Esses resultados motivaram a construção de matrizes planas de emissores, Courtney e Lozano (2012) demonstraram que é possível alcançar o regime iônico utilizando emissores de níquel poroso tendo o EMI-BF4 como propelente. Guerra-Garcia et al (2016) constataram que o uso de emissores de vidro de borossilicato poroso resulta em uma fase transiente entre os regimes de gotejamento e iônico. Foi observado que quanto maior for o tamanho dos poros, mais facilmente será mantida a produção de gotas, pois as taxas de vazão aumentam.

Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de se alcançar valores mais altos de densidade de corrente emitida, pois assim se aumenta a eficiência dos propulsores. Em um desses estudos, Nabity e Daily (2017) observaram que o propelente alilmetilimidazólio dicianamida (AMI-DCA) é o candidato ideal para substituir o EMI-BF4, pois o primeiro produz valores mais altos de densidade de corrente emitida para uma mesma tensão do que o segundo e possui valores maiores de impulso específico e empuxo do que o EMI-BF4.

Com o sucesso da missão LISA *pathfinder* [ESA, 2019], onde ocorreu o primeiro uso de um propulsor *electrospray* em uma missão espacial, houve um encorajamento para a entrada desses propulsores no mercado, sendo que as companhias mais relevantes da atualidade em *electrospray* são a Busek, a Accion e a Enpulsion [Busek, 2019; Accion, 2019; Enpulsion, 2019].

3. Metodologia

A Figura 2 mostra as etapas a serem seguidas no desenvolvimento do propulsor *electrospray*.

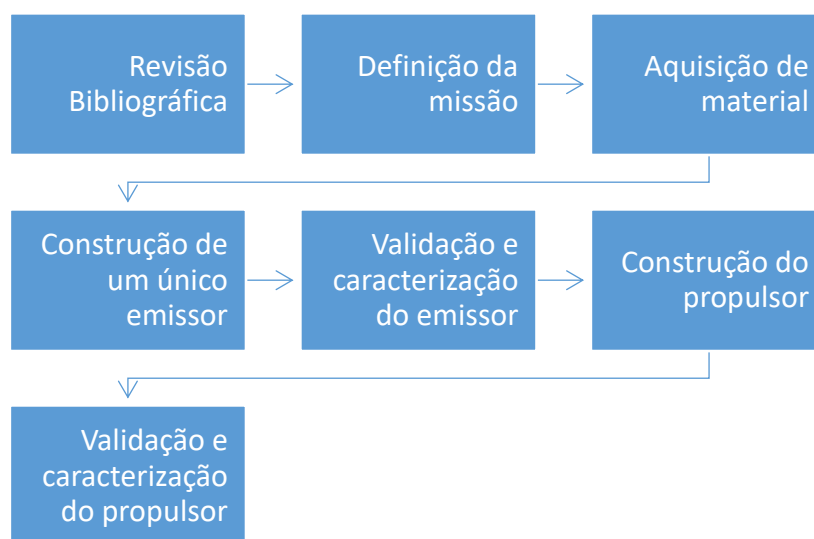


Figura 2. Metodologia para a concepção do propulsor *electrospray*.



A realização da revisão bibliográfica tem o objetivo de entender o funcionamento e as dificuldades envolvidas na concepção dos propulsores *electrospray*, além de conhecer o atual estado da arte dessa tecnologia.

Durante a fase de definição da missão estabelece-se qual o objetivo com a criação deste propulsor, quais serão os requisitos da missão, tais como empuxo, impulso específico. Até o presente momento, pretende-se a construir um dispositivo de controle de atitude para *CubeSats* e outros satélites de porte similar.

Nestas duas etapas iniciais será feito o levantamento dos materiais e equipamentos necessários para a realização da concepção do propulsor para subsidiar a compra desses materiais e equipamentos durante a etapa de aquisição de material.

Posteriormente será iniciada a construção de um único emissor. Essa fase, em conjunto com a etapa seguinte, tem como objetivo a obtenção de experiência na área de sprays *eletrostáticos* e também tem o objetivo de realizar a calibração dos sensores que serão utilizados.

A próxima etapa compreende a construção do propulsor. Ao longo dessa fase será realizada a fabricação das peças e a integração dos sistemas para que sejam finalmente feitos os testes para validar e caracterizar o propulsor.

Nos testes iniciais com um único emissor e com o propulsor pretende-se utilizar propelentes não tóxicos, de fácil obtenção e baixo custo. Posteriormente pretende-se realizar testes com EMI-BF4 e AMI-DCA, pois, como foi mostrado na revisão bibliográfica, são considerados atualmente os melhores propelentes.

4. Conclusão

A revisão de literatura abarcou décadas de pesquisa e mostrou como ocorreu a evolução da pesquisa nos propulsores *electrospray*, dos primeiros experimentos de Zeleny até o presente momento.

Com a contínua miniaturização dos sistemas espaciais, o uso de propulsores *electrospray* deverá se difundir cada vez mais, pois são sistemas eficientes e facilmente miniaturizáveis. O uso de AMI-DCA como propelente deverá propiciar propulsores ainda mais eficientes.

Foi observado a falta de estudos relevantes nessa área no Brasil. Isto serviu de motivação para a realização desta pesquisa. O domínio desta tecnologia é muito importante e este estudo visa contribuir para que num futuro próximo esta tecnologia possa ser transferida para a indústria espacial brasileira.

Foram apresentadas as etapas a serem seguidas no desenvolvimento de um propulsor *electrospray*. Inicialmente buscar-se-á entender os princípios físicos, para então realizar experimentos simples e finalmente se construir o propulsor.

Agradecimentos: O primeiro autor agradece a CAPES por todo apoio e financiamento que permitiram que esse trabalho fosse realizado.



Referências

- Accion. (2019) Disponível em: <https://www.accionsystems.com/tile>. [Acessado em 9 de Julho de 2019].
- Bailey, A. G. (1973), Investigation of a single spraying site of a colloid thruster, *Journal of Physics D: Applied Physics* 6(2), 276–288.
- Bailey, A. G., Bracher, J. E. e von Rhoden, H. J. (1972), A capillary-fed annular colloid thruster, in *Proc. 9th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy, number 490.
- Benetti, M. (2017). Feasibility study of an electrospray propulsion system for a 6U CubeSat to the moon.
- Busek. (2019). Disponível em: http://www.busek.com/technologies__espray.htm. [Acessado em 9 de Julho de 2019].
- Courtney, D. e Lozano, P. (2012) “Emission measurements from planar arrays of porous ionic liquid ion sources.” In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 45.48, p. 485203.
- Enpulsion. (2019) Disponível em: <https://www.enpulsion.com/order/>. [Acessado em 9 de Julho de 2019].
- ESA. (2019). Disponível: <http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/>. [Acessado em e 9 de julho de 2019].
- Fenn, J., Mann, M., Meng, C., Wong, S. and Whitehouse, C. (1989), Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules, *Science* 246(4926), 64– 71.
- Gassend, B. L. P. (2007), A Fully Microfabricated Two-Dimensional Electrospray Array with Applications to Space Propulsion, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Gassend, B., Velásquez-García, L. F., Akinwande, A. I. e Martínez-Sánchez, M. (2008), Fabrication of a fully integrated electrospray array with applications to space propulsion, in *Proc. 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Tucson, Arizona, IEEE, pp. 976–979.
- Guerra-Garcia, C., Krejci, D. e Lozano, P. (2016). Spatial uniformity of the current emitted by an array of passively fed electrospray porous emitters. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(11), 115503.
- Krpoun, R. (2009). Micromachined electrospray thrusters for spacecraft propulsion (No. THESIS). EPFL.
- Legge, R. S. e Lozano, P. (2008), Performance of heavy ionic liquids with porous metal electrospray emitters, in *Proc. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Hartford, Connecticut, number AIAA 2008- 5002
- Legge, S. Robert Jr. (2008) “Fabrication and characterization of porous metal emitters for electrospray applications.” PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology.



- Lopez-Urdiales, J. M. (2004), Progress in colloid propulsion, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology
- Lozano, P., Martinez-Sanchez, M. e Lopez-Urdiales. J.M. (2004) "Externally wetted ionic liquid thruster." In: 4th International Spacecraft Propulsion Conference. Vol. 555.
- Malyshev, G., Kulkov, V., Shtyrlin, A. F., Vyshedkevich, I. and Bychkow, R. (1995), Comparative analysis of the propulsion system for the small satellites, in Proc. 24th International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, number 156.
- Martínez-Sánchez, M., Fernández de la Mora, J., Hruby, V., Gamero-Castaño, M. and Khayms, V. (1999), Research on colloid thrusters, in Proc. 30th International Electric Propulsion Conference, Kitakyushu, Japan, number 014.
- Miller, C. E. (2016) Performance Characterization of Ionic Liquids in Ion Electrospray Thrusters.
- Mueller, J., Hofer, R. e Ziemer, J. (2010) "Survey of propulsion technologies applicable to cubesats."
- Nabity, J. A., & Daily, J. W. (2017). Effect of ionic liquid composition on colloid thruster emission and thrust performance. *Journal of Propulsion and Power*, 34(1), 260-266.
- Romero-Sanz, I., Bocanegra, R. and Fernandez de la Mora, J. (2003), Source of heavy molecular ions based on Taylor cones of ionic liquids operating in the pure ion evaporation regime, *Journal of Applied Physics* 94, 3599–3605.
- Stark, K. W. e Sherman, A. (1970), Research and development in needle and slit colloid thrusters, Technical Report NASA TN D-5305, Goddard Space Flight Center, NASA
- Taylor, G. I. (1969). Electrically driven jets. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515), 453-475.
- Velásquez-García, L. (2004), The design, fabrication and testing of micro-fabricated linear and planar colloid thruster arrays, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Velásquez-García, L. F., Akinwande, A. I. e Martínez-Sánchez, M. (2006), A planar array of micro-fabricated electrospray emitters for thruster applications, *Journal of Microelectromechanical Systems* 15(5), 1272–1280.
- Zeleny, J. (1917), Instability of electrified liquid surfaces, *Physical Review*.