

PROGRESSOS NA MODELAGEM NUMÉRICA DE UM PPT RETANGULAR

L.V. Souza, lvs.vinicius@gmail.com¹
R. Intini Marques, intini@lcp.inpe.br²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Pres. Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP Brasil CEP 12630-000,

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Pres. Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP Brasil CEP 12630-000,

Resumo: O propulsor de plasma pulsado (PPT) é um motor para veículos espaciais que gera empuxo a partir de descargas elétricas de alta tensão. Foi desenvolvido e utilizado já no começo dos programas espaciais, na década de 1960. Sua análise e aperfeiçoamento desde então é baseada, principalmente, em medições experimentais e leis empíricas derivadas de tais medições. A complexidade de fenômenos ocorrendo em um PPT não é capturada por leis empíricas e modelos de circuitos elétricos, havendo necessidade de ferramentas de análise mais completas. Para sanar este problema, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um código numérico que permita a análise numérica do escoamento de plasma no PPT, no mínimo, ao nível da magneto-hidrodinâmica (MHD). O programa será baseado na biblioteca C++ de código aberto OpenFOAM, desenvolvida, principalmente para simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

Palavras-chave: PPT, MHD, OpenFOAM, C++

1. INTRODUÇÃO

Propulsores de Plasma Pulsado (PPT) são propulsores categorizados como eletromagnéticos, embora uma parte do empuxo produzido se deva a efeitos gás dinâmicos [1]. Dentre os vários tipos de propulsores elétricos existentes, o PPT destaca-se por sua simplicidade, robustez, baixo custo de fabricação e curto tempo de desenvolvimento. Essas características permitiram a utilização de PPTs já na década de 1960, apesar de sua eficiência muito baixa.

Na Fig. 1 vemos um diagrama esquemático de um PPT retangular padrão. Nessa figura são apresentados os componentes principais de um PPT, sendo esses componentes comuns a outros arranjos construtivos de PPT. Destacam-se na figura: o propelente sólido em barra, a mola que abastece a câmara de descarga continuamente empurrando o propelente para a posição adequada, a fonte de alimentação do veículo espacial (PPU – Power Processing Unit), um capacitor (ou banco de capacitores) e a vela de ignição de descarga [2].

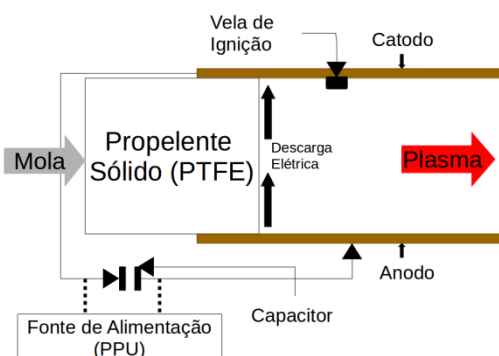


Figura 1. Diagrama esquemático de um PPT. [1; 3]

A ignição do PPT é um processo bastante complexo. A vela de ignição, geralmente feita de material semicondutor ou isolante, gera uma pequena descarga de plasma próxima à superfície do propelente, aquecendo-o. O aquecimento causa a sublimação de uma pequena quantidade de propelente, suficiente para diminuir a rigidez dielétrica entre os eletrodos principais.

Uma vez iniciada a descarga principal ($\sim kA$, $\sim \mu s$) na superfície do propelente (PTFE), uma fração do mesmo sofre ablação. Este processo gera gases não ionizados e uma pequena quantidade de plasma, além de aquecer a barra de propelente. O empuxo é gerado através da combinação de dois efeitos: a aceleração e ejeção a altas velocidades do plasma, por meio da força de corpo eletromagnética; e a expansão térmica do vapor de propelente não-ionizado, devido ao gradiente de pressão [4].

O primeiro destes efeitos, a força eletromagnética, se deve a interação da densidade de corrente elétrica (J), que flui através do plasma, e o campo magnético (B), gerado por essa mesma corrente elétrica. O produto vetorial entre a densidade de corrente (J) e campo magnético auto induzido (B) gera uma força eletromagnética denominada força de Lorentz ($J \times B$) [4]. Esta força de corpo atua em toda a massa de plasma, acelerando-a e deformando-a conforme a mesma se desloca até a saída do propulsor [5]. A Fig. 2 ilustra este processo.

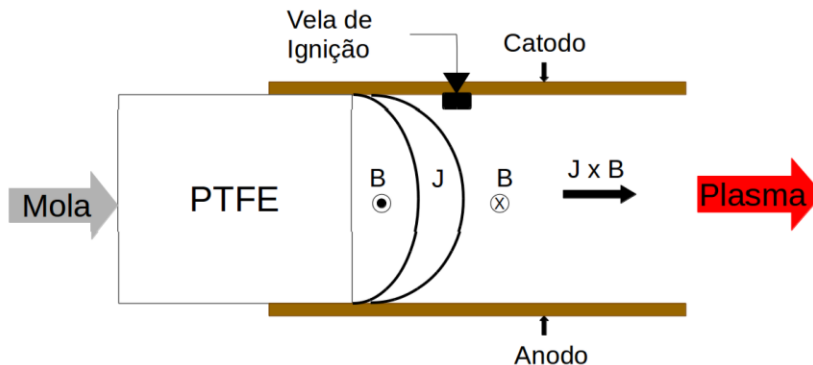


Figura 2. Força de Lorentz no PPT. [1; 3]

O segundo efeito que contribui para o empuxo do PPT é a expansão dos gases não-ionizados resultantes da sublimação do propelente. Esses gases não sofrem a ação de nenhum tipo de força eletromagnética, sendo acelerados apenas pelo gradiente de pressão que existe entre o vapor de propelente e o vácuo no qual o propulsor opera.

Desta maneira existem, basicamente, dois tipos de massa no PPT: a massa de plasma, que é acelerado eletromagneticamente a altas velocidades ($\sim 5 km/s$ - $15 km/s$), e a massa não-ionizada, que é acelerada, através de um gradiente de pressão termodinâmica, a baixas velocidades ($\sim 300 m/s$). Essa massa acelerada a baixas velocidades diminui consideravelmente o impulso específico do PPT, sendo a principal causa para a baixa eficiência do mesmo.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

OpenFOAM é uma biblioteca C++ de código aberto criada para resolução de problemas envolvendo a dinâmica de fluidos computacional (CFD); tendo capacidades, porém, de resolver equações diferenciais parciais (PDE) gerais e realizar a simulação de diversos problemas multifísicos. Sabendo-se da falta de uma ferramenta de simulação aberta, de fácil acesso e adequada para a simulação de PPT, propõe-se o desenvolvimento de um código numérico, baseado na biblioteca OpenFOAM 4.1, que permita a simulação de aspectos básicos de um propulsor PPT retangular sem vela de ignição.

Várias características indicam que a biblioteca OpenFOAM é adequada para o desenvolvimento do código numérico, entre as quais [6; 7]:

- Biblioteca aberta, gratuita e robusta;
- Escrita em C++;
- Modelo MHD simples já implementado;
- Documentação ampla sobre a biblioteca;
- Trabalhos envolvendo simulação MHD já realizados.

O fato da biblioteca OpenFOAM ser escrita em C++ permite o uso de compiladores otimizados para simulação computacional. Além disso, as características de orientação a objeto da linguagem permitem o uso de sobrecarga de operadores e uma maior organização e reciclagem do código.

Diversos trabalhos envolvendo eletromagnetismo e simulação MHD já foram desenvolvidos utilizando-se a biblioteca OpenFOAM. Huang[8] implementou duas formulações diferentes (A-V e A-J) para cálculo de campo magnetostático em materiais como cobre, aço linear e ímãs permanentes. Além disso, realizou cálculos de força magnética utilizando o Método de Força de Lorenz e o Método do Tensor de Estresse de Maxwell.

Roghair et. al [9] implementaram um modelo eletro-hidrodinâmico para simulação de interface fluido-fluido sob a presença de um campo elétrico. A Lei de Gauss e a equação de transporte de carga foram incorporadas no modelo de

Volume de Fluido (VOF), já existente por padrão na distribuição OpenFOAM. A interface entre dois fluidos dielétricos e a interface entre um fluido condutor e outro dielétrico foram simuladas, com boa concordância com as relações teóricas.

Ferroni [10] utilizou a biblioteca OpenFOAM para desenvolver um código numérico de escoamento MHD. O programa desenvolvido se mostrou eficaz em simular escoamento de metais líquidos, usados na refrigeração de reatores de fusão nuclear.

Sass-Tisovskaya [11] desenvolveu uma aplicação baseada em OpenFOAM para simulação de solda com arco de plasma. A parte eletromagnética foi testada separadamente para validação. A ferramenta de simulação completa foi avaliada usando um problema de solda de arco com gás tungstênio.

3. MODELO MATEMÁTICO

Devido ao princípio de funcionamento do PPT, pode-se destacar quatro processos básicos que ocorrem no mesmo: a propagação de corrente elétrica na descarga elétrica e a geração de campo magnético devido a corrente elétrica circulante; a transferência de calor entre a descarga elétrica e o propelente; o escoamento do fluido sob a ação de forças de corpo devido ao gradiente de pressão e a força de Lorentz.

As equações usadas para simular estes processos físicos são as equações de conservação de massa, momento e energia; juntamente com as equações de Maxwell, das quais são derivadas a equação de indução magnética e a expressão alternativa para a força de Lorentz. Estas equações formam o conjunto matemático necessário para simulação magneto-hidrodinâmica compressível do PPT.

As equações de Maxwell, utilizadas para derivação da equação de indução magnética, são dadas pelas Eq. (1-4).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

Onde $\mathbf{H}$ é intensidade do campo magnético, $\mathbf{B}$ é o campo magnético, $\mathbf{D}$ é o campo de deslocamento elétrico, que é desconsiderado para cálculos envolvendo plasma não relativístico; $\mathbf{E}$ é o campo elétrico e $\mathbf{J}$ a densidade de corrente. A relação entre intensidade de campo magnético e o campo magnético em si é dada por $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$, sendo μ_0 a permeabilidade elétrica do vácuo.

As equações de conservação da massa e do momento são dadas pelas Eq. 5 e 6, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p \mathbf{I} + \nabla \cdot \tau_{visc} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

Onde ρ é a densidade, $\mathbf{U}$ é a velocidade, τ_{visc} é o tensor de estresse viscoso e $\mathbf{I}$ é o tensor identidade. O último termo do lado direito da equação do momento, $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, é a força de Lorentz.

Usando as equações de Maxwell, Eq. (1-4), a força de Lorentz pode ser substituída por um conjunto de estresses, dados pela Eq. (7):

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{B}\mathbf{B}}{\mu_0} - \frac{B^2}{2\mu_0} \mathbf{I} \right) \quad (7)$$

Resultando na Eq. (8) abaixo:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla \left(p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) + \nabla \cdot \tau_{visc} + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{B}\mathbf{B}}{\mu_0} \right) \quad (8)$$

A pressão total é dada pela Eq. (9), na qual a segunda contribuição corresponde a pressão magnética.

$$P_{tot} = p + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (9)$$

Combinando a lei de Faraday, Eq. (2), com a lei de Ohm, dada pela Eq. (10).

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \quad (10)$$

Chega-se a equação de indução magnética, Eq. (11).

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \frac{\nabla^2 \mathbf{B}}{\mu_0 \sigma} \quad (11)$$

Onde σ é a condutividade elétrica do meio. A equação de conservação da energia é dada pela Eq. (12):

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{U}) + \nabla \cdot (P_{tot} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot (\mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{U})) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{B} \times \mathbf{J}}{\mu_0 \sigma} \right) = \dot{q}_v \quad (12)$$

Onde e é a energia interna específica, T é a temperatura, κ é condutividade térmica e $\dot{q}_v$ é o calor por unidade de volume. Na parte sólida do domínio(propelente) esta equação reduz-se a equação de condução do calor, Eq. (13):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \dot{q}_v \quad (13)$$

Cada um dos processos físicos acontecendo no PPT será resolvido separadamente, através de um código numérico próprio. Não será simulada a vela de ignição devido à complexidade de funcionamento da mesma, além do fato de ter pouca influência no desempenho do propulsor.

Depois que cada um dos processos for simulado separadamente, haverá a integração de cada um deles ao código numérico completo do PPT. Este método de desenvolvimento modular permite maior segurança e agilidade no desenvolvimento da aplicação. Como já existem diversos código numéricos disponíveis no OpenFOAM, o desenvolvimento de cada código numérico se dará conforme fluxograma da Fig. 3.

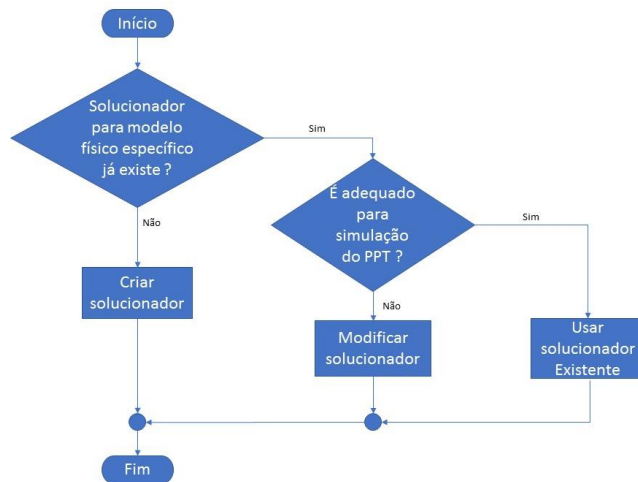


Figura 3. Passos para o desenvolvimento de um código numérico.

A validação de cada código numérico será feita através de resultados teóricos e simulações disponíveis na literatura. Uma vez que a simulação completa esteja rodando adequadamente, será realizada a alteração dos seguintes parâmetros do propulsor: espaçamento entre eletrodos, largura dos eletrodos/teflon e energia do capacitor de descarga. O código numérico completo será validado através comparação dos resultados numéricos obtidos com dados experimentais, disponíveis na literatura, de PPTs retangulares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para testar as funcionalidades da biblioteca, foi utilizado um código numérico já pronto e dois foram criados para avaliar a dificuldade de criação de novos códigos numéricos. Todos os códigos feitos e testados neste artigo utilização a versão OpenFOAM 4.1 no ambiente Ubuntu 16.04. O computador utilizado é um i7 de terceira geração com 8GB de memória RAM. A geometria a ser utilizada para simulação do propulsor é apresentada no final.

4.1. Código mhdFoam

O escoamento de um fluido sob ação de um campo magnético constante e uniforme externo foi simulada com o código numérico *mhdFoam*, presente por padrão na biblioteca. A malha utilizada para simulação é apresentada na Figura 4 abaixo. Ela é um retângulo de 20x2x0.1 metros com 100x40x1 células.

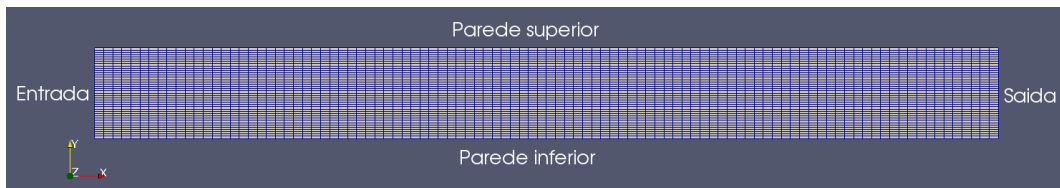


Figura 4. Malha usada na simulação.

As condições de contorno são dadas na Tab. 1.

Tabela 1. Condições de contorno para o código mhdFoam.

Contorno	U (m/s)	B (T)	p (Pa)
Entrada	fixedValue (1 0 0)	zeroGradient	zeroGradient
Saída	zeroGradient	zeroGradient	fixedValue (0)
Parede superior	noSlip	fixedValue (0 20 0)	zeroGradient
Parede inferior	noSlip	fixedValue (0 20 0)	zeroGradient
Frente e Atrás	empty	empty	empty

As condições iniciais são: $U=0$ m/s, $p=100$ Pa, $B=(0, 20, 0)$ T. As propriedades físicas usadas são dada na Tab. 2.

Tabela 2. Constantes físicas usadas no código mhdFoam.

Viscosidade cinemática ν	1 Pa
Densidade ρ	1 Kg.m/s
Condutividade Elétrica σ	1 ($\Omega.m$) ⁻¹
Permeabilidade μ	1 H/m

O código *mhdFoam* é validado em comparação com o problema de Hartmann que apresenta solução analítica dada por:

$$\frac{U_x(y)}{U_x(0)} = \frac{\cosh(20) - \cosh(20y)}{\cosh(20) - 1} \quad (14)$$

A Fig. 5 mostra o perfil da componente de velocidade U_x (m/s), ao longo do eixo Y comparado com a solução analítica, para campos magnéticos na direção do eixo Y de 20 Teslas.

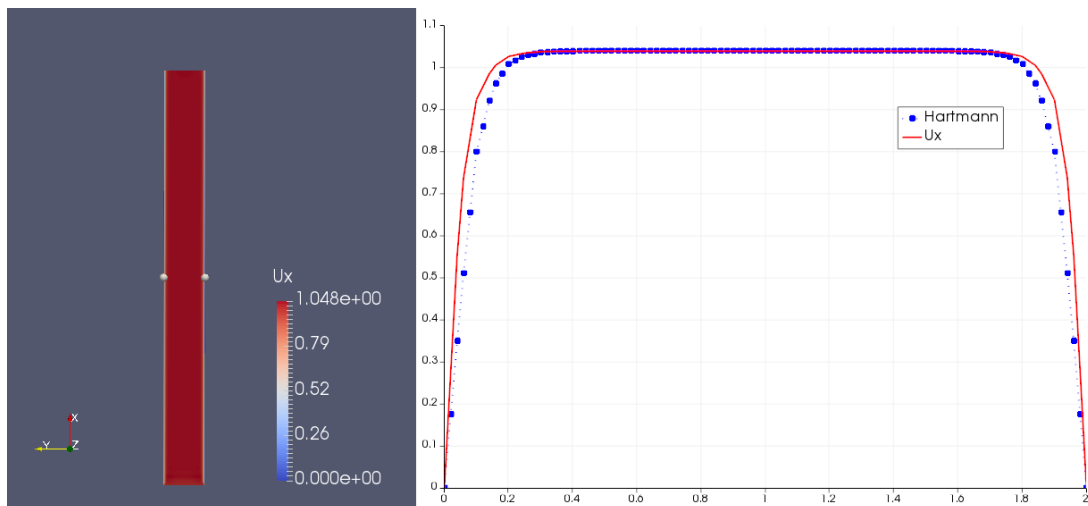


Figura 5. Distribuição de velocidade U_x com campo de 20 T.

4.2. Código HeatPropagation

O código numérico *HeatPropagation* foi criado para avaliar a dificuldade de criação de um novo código no OpenFOAM, além de ser utilizado para calcular a propagação de calor no propelente durante uma descarga elétrica na superfície. A geometria simulada é uma barra fina de 1x60x0.1 mm com 50x20x1 células. As condições de contorno são dadas na Tab. 3.

Tabela 3. Condições de contorno para o código *HeatPropagation*.

Contorno	T (K)
Esquerda	fixedValue (300)
Direita	fixedValue (900)
Topo	zeroGradient
Embaixo	zeroGradient
Frente e Atrás	empty

A condições inicial é: $T(0, x) = 300$ K. A única propriedade física usada é a difusividade térmica $D = 1.28e-7$ m²/s. O código *HeatPropagation* resolve a Eq. (15) abaixo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T \quad (15)$$

Nas Fig. de 6 a 8 abaixo são apresentados um trecho da barra e o perfil de temperatura na mesma. Devido a configuração do caso a variação de temperatura ocorre ao longo do eixo X.

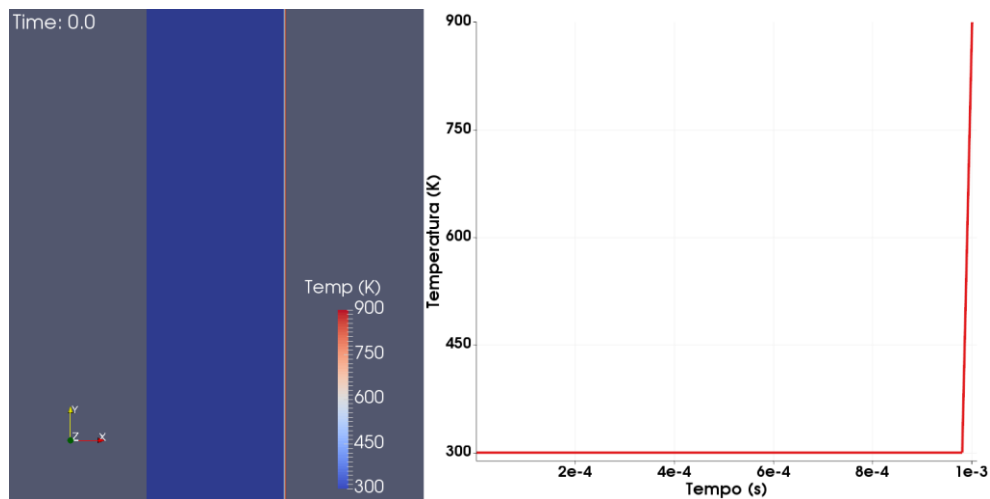


Figura 6. Distribuição de temperatura no tempo $t = 0.0s$.

No tempo final de simulação ($t = 5.0s$) a distribuição de temperatura segue a inclinação dada pela Eq. (16):

$$T(x) = (T_{direita} - T_{esquerda}) \cdot \frac{x}{L} + T_{direita} = [T(0.001) - T(0)] \cdot \frac{x}{0.001} + T(0) = \frac{600}{0.001} \cdot x + 300 \quad (16)$$

Com a posição no eixo X dada em metros. Para $x = 0.0005$, $T(0.0005) = 600$ K. Conforme pode ser visto na Fig. 8.

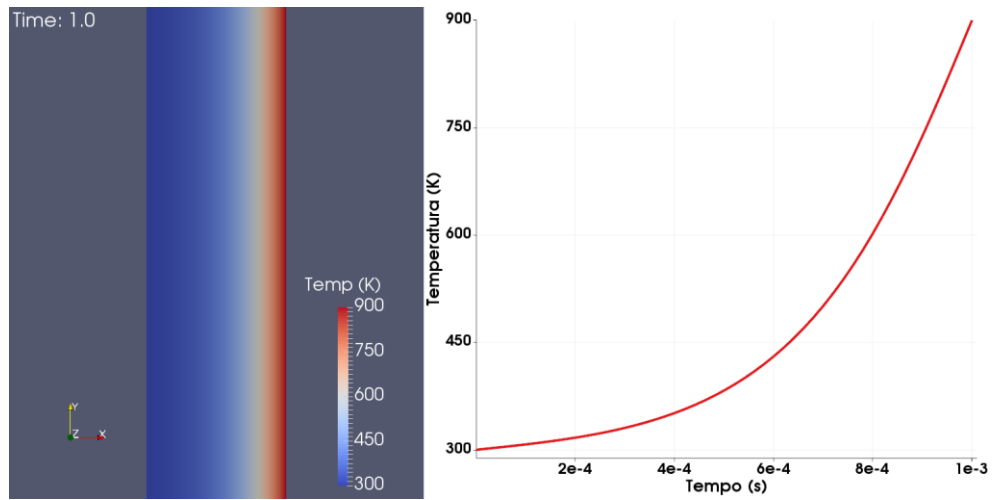


Figura 7. Distribuição de temperatura no tempo $t = 1.0$ s.

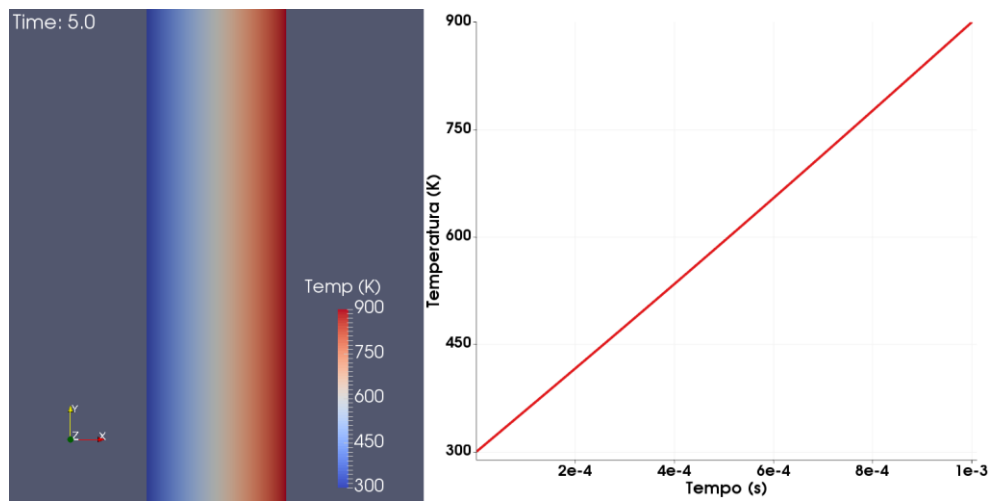


Figura 8: Distribuição de temperatura no tempo $t = 5.0$ s.

4.3. Código RLC_Foam

Como um passo inicial para simular a descarga elétrica sobre a superfície do PTFE, foi criado o código numérico *RLC_Foam*. Este código simula um circuito série composto por um resistência, um indutor e um capacitor. O esquema elétrico do circuito é apresentado na Fig. 9.

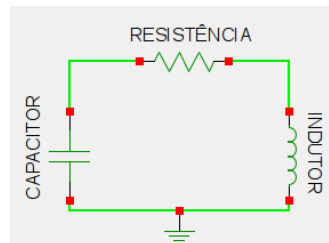


Figura 9: Circuito simulado pelo código *RLC_Foam*.

Os parâmetros utilizados para a simulação são dados na Tab. 4.

Tabela 4. Constantes físicas usadas no código *RLC_Foam*.

Indutância L	34 nH
Resistência R	30 m Ω
Capacitância C	2 μ F

A variável para o qual se resolve é a carga Q do capacitor. Portanto, as condições iniciais utilizadas no problema são a carga inicial do capacitor $Q(t=0) = 2.72e-3$ C e a derivada da carga, ou seja, a corrente $I = Q'(t=0) = 0$. A equação diferencial que descreve este circuito é a Eq. (17):

$$L \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + R \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (17)$$

Como o código resolve apenas uma equação diferencial ordinária dependente do tempo, a malha usada é composta por um única célula, com condições de contorno empty em todas as faces. Esta é uma exigência do OpenFOAM, pois o mesmo utiliza o Método dos Volumes Finitos (FVM, na sigla em inglês) para resolução de equações e, assim sendo, há necessidade de criação de um volume com o qual as variáveis estejam associadas. A solução obtida com o OpenFOAM é apresentada na Fig. 10.

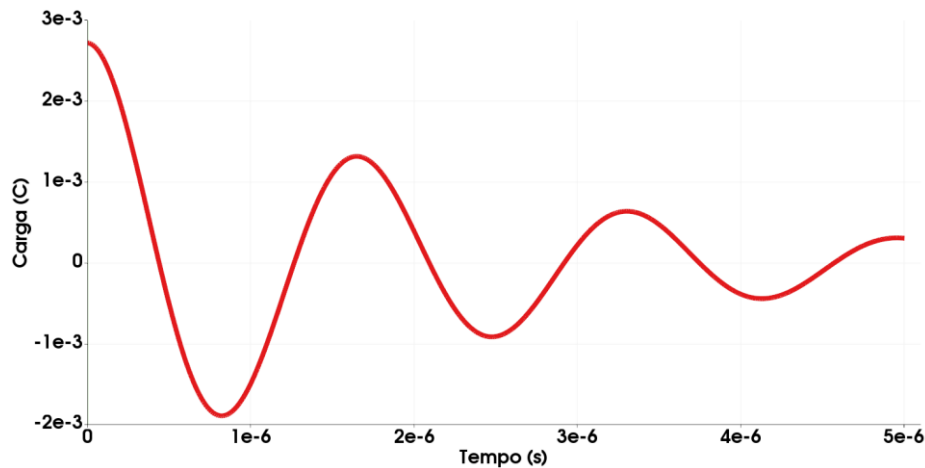


Figura 10. Evolução da carga no capacitor com o tempo.

O aquecimento da superfície do PTFE, através do efeito Joule, é gerado pela corrente elétrica que circula na mesma. Logo, é necessário calcular a corrente elétrica que circula no capacitor na simulação acima. Isto pode ser feito facilmente derivando-se a curva de carga. A Fig. 11 mostra a corrente calculada a partir da curva de carga.

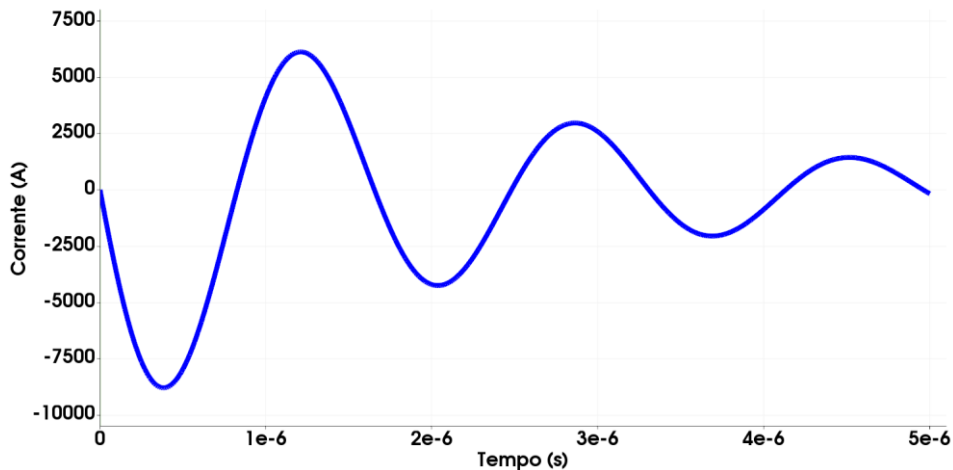


Figura 11. Evolução da corrente no capacitor com o tempo.

4.4. Geometria e Malha de Simulação

A Fig. 12 mostra a geometria que será usada para simular o propulsor PPT, depois que o código numérico estiver pronto. A barra de teflon (PTFE) que fornece o material a ser ejetado, está representada em cinza. A câmara do propulsor, onde se encontra o plasma a ser ejetado, é representada em vermelho. Por fim, parte da câmara de vácuo (onde o propulsor opera) está representada em verde. A inclusão da câmara de vácuo na simulação serve para visualizar a expansão da pluma de exaustão do propulsor. Na Fig. 13 temos a malha que será usada na simulação do propulsor. As condições de contorno ainda não estão definidas.

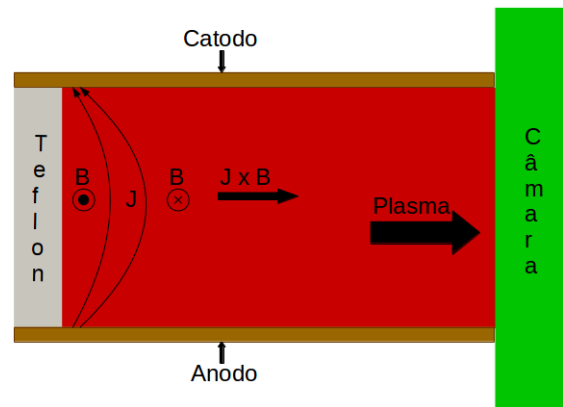


Figura 12. Geometria usada na simulação do propulsor. cinza(teflon); vermelho(plasma); verde(câmara de vácuo).

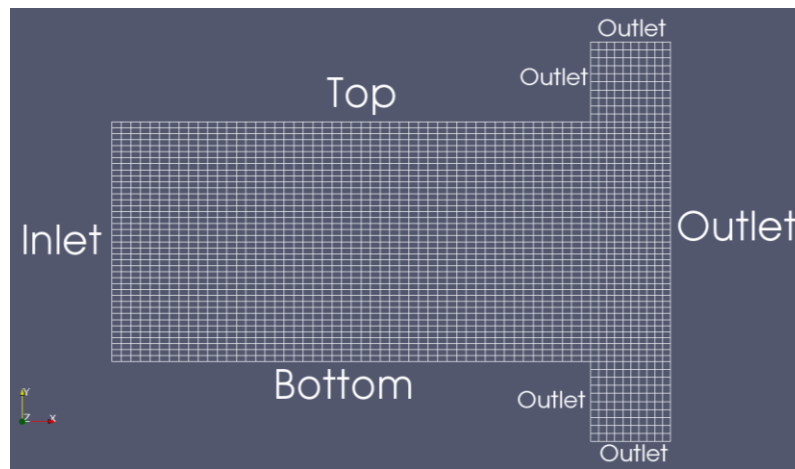


Figura 13. Malha usada na simulação do propulsor.

O código numérico criado deverá ser capaz de calcular, principalmente, a velocidade e impulse bit do propulsor PPT simulado, com valores semelhantes aos encontrados na literatura. Os códigos desenvolvidos (*HeatPropagation* e *RLC_Foam*) permitiram avaliar a dificuldade de criação de novos códigos no OpenFOAM, servindo também como ponto de partida para implemetação do código completo. Além disso, o código numérico deverá simular PPTs com diferentes parâmetros de operação, permitindo a análise do comportamento dos propulsores em função destas variações. Por fim, espera-se criar uma ferramenta poderosa o suficiente para auxílio ao projeto e análise de novos propulsores.

5. AGRADECIMENTOS

CAPES pelo apoio financeiro e concessão de bolsa.

6. REFERÊNCIAS

- R. M. Intini, 2009, "A Mechanism to Accelerate the Late Ablation in Pulsed Plasma Thruster", in 2009. 192f. Tese (PhD in ENGINEERING SCIENCES), University of Southampton - Faculty of Engineering, Science & Mathematics - School of Engineering Sciences.
- R. L. Burton and P. J. Turchi, 1998, "Pulsed Plasma Thruster", Journal of Propulsion and Power.
- L. F. C. Marin, 2014, "Análise do desempenho de um propulsor a plasma pulsado de dupla descarga através da variação da distribuição de energia entre os seus dois estágios", São José dos Campos: INPE.
- R. J. Cassidy, 2000, "A Micro Pulsed Plasma Thruster (PPT) for the "Dawgstar" Spacecraft", in IEEE Aerospace Conference, 2000.
- R. G. Jahn, 2006, Physics of Electric Propulsion, Mineola, New York: Dover Publications, INC.
- "OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox: Tutorial Guide"
- "OpenFOAM– The Open Source CFD Toolbox: User Guide"
- Z. Huang, 2010, "OpenFOAM Simulation for Electromagnetic Problems", in 2010, Tese (Master in Electric Power Engineering), CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - Division of Electric Power Engineering - Department of Energy and Environment.

- I. Roghair et. Al, 2013, “An OpenFOAM-based electro-hydrodynamical model”, 8th International Conference on Multiphase Flow.
- F. Ferroni, 2012, “Magneto-hydrodynamic Simulations of Liquid Metal Flows in Fusion Reactors”, Imperial College London - Department of Mechanical Engineering.
- M. Sass-Tisovskaya, 2009, “Plasma ArcWelding Simulation with OpenFOAM”, in 2009, Tese (Licentiate of Engineering), CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - Department of Applied Mechanics.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

PROGRESS IN NUMERICAL MODELING OF A RECTANGULAR PPT

L.V. Souza, lvs.vinicius@gmail.com¹
R. Intini Marques, intini@lcp.inpe.br²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Pres. Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP Brasil CEP 12630-000,

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Pres. Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP Brasil CEP 12630-000,

Abstract. *The pulsed plasma propeller (PPT) is a space vehicle engine that generates thrust from high voltage electrical discharges. It was developed and used early in space programs in the 1960s. Its analysis and refinement has since been based primarily on experimental measurements and empirical laws derived from such measurements. The complexity of phenomena occurring in a PPT is not captured by empirical laws and electric circuit models, and more comprehensive analysis tools are needed. To solve this problem, the present work aims to develop a numerical code that allows the numerical analysis of plasma flow in the PPT, at least at the level of the magnetohydrodynamics (MHD). The program will be based on the OpenFOAM open source C ++ library, developed primarily for computational fluid dynamics (CFD) simulations.*

Keywords: PPT, MHD, OpenFOAM, C++