

MÉTODO DE MONTE CARLO NA MODELAGEM DE SISTEMA DE ALTO VÁCUO TUBULAR CÔNICO

Samuel da Silva Lima¹

samuellima0919@gmail.com

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Francisco Tadeu Degasperi

ftd@fatecsp.br

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

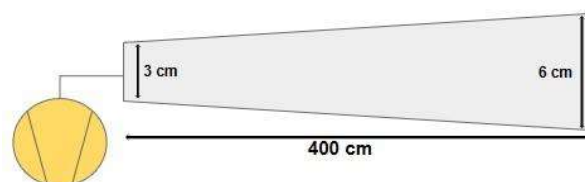
1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de alto vácuo são utilizados em diversos dispositivos tecnológicos, no entanto, são sistemas complexos e de alto custo, necessitando de um conhecimento preliminar para construção desses sistemas. Uma das formas de projetar e conhecer um sistema de alto vácuo é a modelagem matemática analítica, porém podem ser muito complexas dependendo do sistema, nessa situação, surge o Método de Monte Carlo (MMC) que propõe maior praticidade na modelagem desses sistemas [2]. O MMC é um método estatístico que pode ser aplicado de forma computacional, reduzindo de forma significativa a complexidade na modelagem.

2. METODOLOGIA

O trabalho começou com a modelagem do sistema de alto vácuo tubular cônico com uma bomba de alto vácuo na extremidade esquerda no programa computacional *Molflow+*, que se utiliza do MMC para a simulação de sistemas de alto vácuo. A figura 01 demonstra a geometria do sistema de alto vácuo e a tabela 01 apresenta as condições adotadas para a construção do sistema de alto vácuo tubular cônico, definindo as principais grandezas que são a taxa de desgaseificação, a temperatura, o comprimento e os diâmetros.

Figura 01 – Sistema de alto vácuo tubular cônico.



Fonte: Lima, S. (2025).

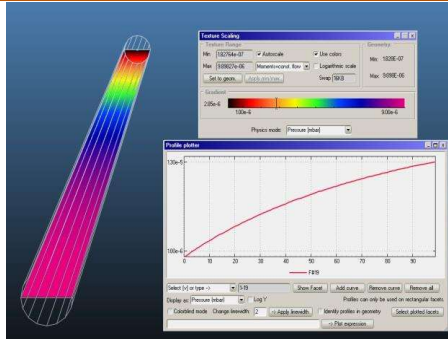
Tabela 01 – Condições de construção do sistema

Características do sistema	Valores
Taxa de desgaseificação	5×10^{-9} mbar.l.s ⁻¹ 1.cm-2
Temperatura	293,15 K
Comprimento do tubo	400 cm
Diâmetro maior	6 cm
Diâmetro menor	3 cm

Fonte: Lima, S. (2025).

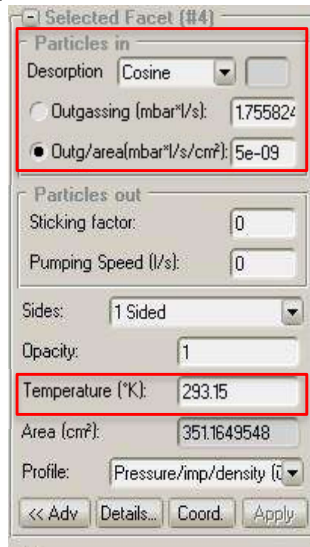
A utilização do programa é intuitiva, sendo necessário apenas a criação da geometria e a definição das condições de contorno, como taxa de desgaseificação, posição da bomba de vácuo, temperatura, etc. Na figura 02 é demonstrado a geometria simulada no programa *Molflow+* e a figura 03 demonstra as condições de contorno colocadas no programa.

Figura 02 – Simulação no *Molflow+*.



Fonte: Lima, S. (2025).

Figura 03 – Condições de contorno para a simulação no Molflow+.



Fonte: Lima, S. (2025).

A modelagem analítica foi realizada utilizando-se de uma adaptação da equação de difusão para ambientes de vácuo, a mesma é apresentada na equação 1.

$$c(x) \frac{d^2 p(x)}{dx^2} + \frac{dc(x)}{dx} \cdot \frac{dp(x)}{dx} = -q(x) \quad (1)$$

O sistema tubular cônico não possui condutância ($c(x)$) e nem taxa de desgaseificação ($q(x)$) constante, portanto, é necessário descrever essas grandezas, que podem ser vistas nas equações 2 e 3.

$$c(x) = \frac{2\pi}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{\frac{1}{2}} f^3(x) \quad (2)$$

$$q(x) = q_0 \cdot A(x) \quad (3)$$

Onde $f(x)$ e A , são respectivamente, o raio do tubo cônico em uma posição x e a área de superfície por unidade de comprimento. Suas equações, são:

$$f(x) = \left(\frac{D_M - D_m}{2L} \right) \cdot x + \frac{D_m}{2} \quad (4)$$

$$A(x) = 2\pi f(x) \sqrt{1 + \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^2} \quad (5)$$

Com essas informações é possível resolver a equação 1, que deve ficar da seguinte forma,

$$p(x) = \frac{\beta}{4\alpha a} \left(C1 - \frac{b^2}{a} \right) \frac{1}{(ax + b)^2} - \frac{\beta}{2\alpha a^2} \ln(ax + b) + C2 \quad (6)$$

Onde

$$a = \left(\frac{D_M - D_m}{2L} \right), \quad b = \frac{D_m}{2}, \quad \alpha = \frac{2\pi}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \beta = q_0 \cdot 2\pi \sqrt{1 + a^2}$$

Para determinar as constantes $C1$ e $C2$, são utilizadas as seguintes condições de contorno:

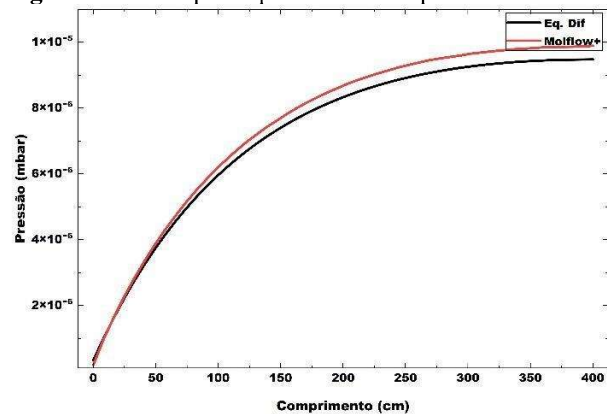
$$c(0) \left| \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0} = +S_0 p(0) \quad \text{e} \quad \left| \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0$$

O sistema tubular cônico não possui condutância ($c(x)$) e nem taxa de desgaseificação ($q(x)$) constante, portanto, é necessário descrever essas grandezas, que podem ser vistas nas equações 2 e 3.

3. RESULTADOS

A figura 04 apresenta a comparação do campo de pressão obtido pelas duas diferentes formas, MMC com o Molflow+ e modelagem analítica com a equação de difusão.

Figura 04 – Campo de pressão obtido pelos métodos.

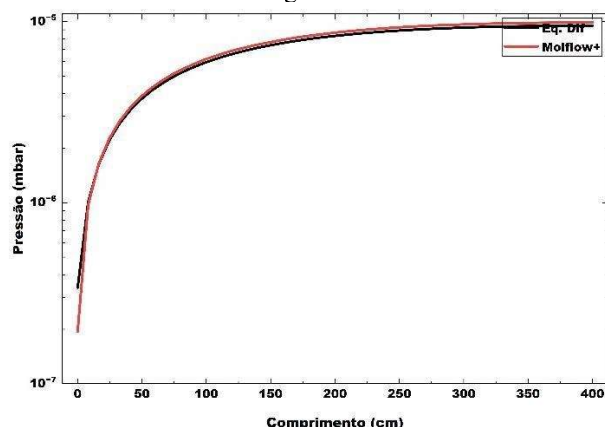


Fonte: Lima, S. (2025).

Ambos os métodos são distintos, mas apresentaram uma coerência entre os resultados. A diferença percentual média tomando a curva obtida com o método analítico como a referência é de aproximadamente 4,73%.

Na figura 05, é apresentado o gráfico do campo de pressão com o eixo Y em escala logarítmica para melhor comparação entre os resultados, pois em alto vácuo os valores absolutos são muito pequenos. A maior diferença é vista na região de menor pressão, na proximidade da bomba de vácuo, essa diferença surge devido a diferença dos métodos e a forma de considerar a geometria e a bomba de vácuo.

Figura 05 – Campo de pressão obtido pelos métodos com o eixo Y em escala logarítmica.



Fonte: Lima, S. (2025).

4. CONCLUSÕES

A diferença apresentada não é significativa dentro da experiência real de

vácuo. Portanto, é possível afirmar que o Método de Monte Carlo é capaz de modelar o sistema tubular cônico, oferecendo maior praticidade, agilidade e reduzindo custos. Dessa forma, o MMC surge de forma significativa como uma alternativa para os métodos de modelagem tradicionais.

REFERÊNCIAS

DEGASPERI, Francisco Tadeu; RICOTTA, Regina Maria. High and Ultra-high Vacuum Pressure Profile and Its Gradient of the Conic Tube. **Brazilian Journal of Physics**, v. 53, n. 2, p. 44, 2023.

DEGASPERI, Francisco Tadeu. Contribuições para a Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo. Orientador: Dr. Vitor Baranauskas. **FEEC-UNICAMP**. Campinas, SP-Brasil, 2006.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, ao professor Dr. Francisco Tadeu Degasperi e aos colegas do laboratório de tecnologia do vácuo (LTV) da Fatec SP.

¹ Aluno de IC da PIBIC-CNPq.