

# Campo de pressão em sistemas de alto vácuo e ultra alto vácuo tubulares em função da velocidade de bombeamento

Pressure field in high vacuum and ultra-high vacuum tubular systems as a function of pumping speed

Francisco Tadeu Degasperi<sup>1,2\*</sup>, Eduardo Acedo Barbosa<sup>1</sup>

## RESUMO

O alto vácuo e o ultra-alto vácuo estão presentes em muitos dispositivos e equipamentos com as mais variadas formas geométricas. Sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo de grande interesse apresentam geometria tubular. Esses sistemas de vácuo têm aplicações tanto na indústria como em pesquisa básica, assim como em pesquisa tecnológica. Os dispositivos e equipamentos mais importantes, predominantemente tubulares, são: aceleradores de partículas elementares, anéis de armazenagem de feixe, estruturas para a colisão de feixes de partículas, válvulas elétricas de potência como as válvulas *klystrons* e *gyrotrons*, fotomultiplicadoras, microscópios eletrônicos e espectrômetros de massa. Para que esses equipamentos tenham bom desempenho, eles devem operar em condições de alto vácuo e alguns deles em condições de ultra-alto vácuo. Neste trabalho são estudados o campo de pressão e o campo gradiente de pressão em sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo tubulares. Em particular é apresentada a dependência do campo de pressão em função da velocidade de bombeamento nas extremidades do tubo, mostrando também a importância da condutância específica do tubo e da sua taxa de degaseificação específica.

**Palavras-chave:** Sistemas de alto vácuo; Sistemas de ultra-alto vácuo; Campo de pressão.

## ABSTRACT

High vacuum and ultra-high vacuum are present in many devices and equipment with the most varied geometric shapes. High and ultra-high vacuum systems of great interest have tubular geometry. These vacuum systems have applications both in industry and in basic research, as well as in technological research. The most important devices and equipment, predominantly tubular, are: elementary particle accelerators, beam storage rings, structures for the collision of particle beams (colliders), electric power valves such as klystrons and gyrotrons valves, photomultipliers, electron microscopes, and mass spectrometers. For these devices to perform well, they must operate in high vacuum conditions and some of them in ultra high vacuum conditions. In this work, the pressure field and the pressure gradient field are studied in tubular high vacuum and ultra-high vacuum systems. In particular, the dependence of the pressure field as a function of the pumping speed at the ends of the tube is shown. Also showing the importance of the specific conductance of the tube and its specific degassing rate.

**Keywords:** High vacuum systems; Ultra-high vacuum systems; Pressure field.

1. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza - Faculdade de Tecnologia de São Paulo – São Paulo (SP) – Brasil

2. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza - Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – São Paulo (SP) – Brasil

\*Autor correspondente: [ftd@fatecsp.br](mailto:ftd@fatecsp.br)

Recebido: 05/02/2020 Aprovado: 27/02/2020

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de vácuo são extensamente utilizados tanto nos processos industriais como nos arranjos científicos, assim como na aplicação da ciência na tecnologia. Os sistemas de vácuo, em todos os intervalos de pressão – vácuo grosseiro, vácuo médio, alto vácuo, ultra-alto vácuo e extremo alto vácuo – devem ser devidamente calculados para que tanto o projeto mecânico da câmara de vácuo quanto o projeto de sistemas de bombeamento possam municiar a escolha e a especificação adequadas da instrumentação envolvida, evitando assim o retrabalho e o desperdício de recursos financeiros. Em geral, os equipamentos usados nos sistemas de vácuo são dispendiosos. Para que o cálculo represente bem a realidade física do sistema de vácuo, uma modelagem bem elaborada deve ser realizada. Para se alcançar um bom modelo do sistema de vácuo, deve-se levar em conta uma série de aspectos da realidade física do processo de bombeamento dos gases e vapores. Entre eles, podem ser citados:

- As dimensões e a forma da linha de bombeamento;
- A taxa de desgaseificação dos materiais expostos ao vácuo;
- A velocidade de bombeamento em função da pressão das bombas de vácuo;
- O volume ocupado pelo gás (em geral é parte do volume da câmara de vácuo);
- As várias fontes de gases e vapores que participam do processo realizado em vácuo.

Cabe mencionar que a obtenção dos requisitos exposto logo acima, em geral, não é uma tarefa simples, exigindo um conhecimento profundo tanto da física envolvida no processo em vácuo a ser realizado como dos detalhes da instrumentação necessária. Ainda, o formato e as dimensões da linha de bombeamento, além do tipo de gás e sua temperatura, são o que definem a importante grandeza chamada de condutância da linha de bombeamento. A condutância da linha de bombeamento e a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo definem a velocidade efetiva de bombeamento, esta que de fato bombeia a câmara de vácuo. A linha de bombeamento conecta a câmara de vácuo à bomba de vácuo. É nela que os gases e vapores realizam o seu transporte. Assim, deve-se ter especial atenção no projeto da linha de bombeamento do sistema de vácuo para se obter o bom aproveitamento das bombas de vácuo no processo de bombeamento dos gases. Se a linha de bombeamento tiver uma condutância aquém do valor necessário, somente parte da capacidade de bombeamento da bomba de vácuo (a sua velocidade de bombeamento) será aproveitada.

Em particular, neste trabalho, são apresentadas as considerações mínimas necessárias para um eficaz projeto de um sistema de alto vácuo ou de ultra-alto vácuo, cuja região a ser bombeada tem geometria tubular, qualquer que seja a forma da seção transversal do tubo. Pretende-se com este trabalho deixar claro que a velocidade de bombeamento da bomba de alto vácuo certamente influi na pressão alcançada na câmara de vácuo do sistema de vácuo. Vê-se, porém, que há limites quanto ao

incremento da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo para diminuir a pressão na câmara de vácuo. Deve ficar claro que a pressão alcançada ao longo do tubo depende do processo de bombeamento como um todo, dependendo da velocidade de bombeamento das bombas de vácuo usadas, das dimensões da câmara de vácuo tubular (forma da seção transversal e do comprimento), do tipo do gás e de sua temperatura, além da limpeza e do condicionamento do material do tubo. Com isso, pretende-se mostrar como é fundamental a grandeza referente à condutância específica do tubo (que neste caso em estudo é a região do sistema de vácuo a ser bombeada, ou seja, ela é a câmara de vácuo). Ainda, a limpeza e condicionamento da parede interna deste tubo, que definem a taxa de desgaseificação específica da parede do tubo. O comprimento do tubo também impõe a sua importância na pressão alcançada ao longo da câmara de vácuo tubular.

Os sistemas de alto vácuo (intervalo de pressão de  $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-7}$  mbar ou  $1 \times 10^{-1}$  a  $1 \times 10^{-5}$  Pa) e ultra-alto vácuo (intervalo de pressão de  $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-11}$  mbar ou  $1 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-9}$  Pa). É importante notar que os resultados alcançados neste trabalho podem ser aplicados também aos sistemas de extremo alto vácuo (pressão menor que  $1 \times 10^{-11}$  mbar ou menor que  $1 \times 10^{-9}$  Pa). Cabe mencionar que também tem os sistemas de vácuo grosseiro (intervalo de pressão de  $1 \times 10^3$  a 1 mbar ou  $1 \times 10^5$  Pa a  $1 \times 10^2$  Pa) e vácuo médio (intervalo de pressão de 1 a  $1 \times 10^{-3}$  mbar ou  $1 \times 10^2$  a  $1 \times 10^{-1}$  Pa). Não obstante a importância dos sistemas de vácuo grosseiro e de vácuo médio, eles não foram considerados neste trabalho.

Os regimes de transporte dos gases e vapores dos sistemas de vácuo grosseiro e de vácuo médio são diferentes do regime de transporte dos gases e vapores nos sistemas de alto vácuo, ultra-alto vácuo e extremo alto vácuo. No caso dos três últimos tipos de sistemas de vácuo, o regime de transporte dos gases é o regime molecular. Este se dá quando o livre caminho médio das moléculas é maior que o diâmetro da câmara de vácuo tubular (tomada como a dimensão típica do sistema de vácuo). Em termos matemáticos, o número de *Knudsen* é maior que um ( $Kn > 1$ ).

Muitos sistemas de alto vácuo e de ultra-alto vácuo de grande interesse apresentam geometria tubular. Esses sistemas de vácuo têm aplicações tanto na indústria como em pesquisa. Pode-se citar que os dispositivos e equipamentos, com geometria principal tubular, mais importantes são: aceleradores de partículas, anéis de armazenagem de feixe de partículas elementares, estruturas para a colisão de feixes de partículas, dispositivos elétricos de potência como as válvulas *klystron* e *gyrotrons*, tubos eletrônicos fotomultiplicadoras, microscópios eletrônicos e partes dos espectrômetros de massa. Para que esses equipamentos tenham bom desempenho, alguns devem operar em condições de alto vácuo e outros em ultra-alto vácuo.

Neste trabalho são estudados também o campo de pressão e o campo gradiente de pressão em sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo com geometria predominantemente tubular. Em

particular é apresentada a dependência do campo de pressão em função da velocidade de bombeamento das bombas de vácuo instaladas nas extremidades do tubo (câmara de vácuo tubular). São apresentadas em detalhe a equação diferencial que modela o campo de pressão ao longo do tubo, assim como a sua solução – o campo de pressão – no tubo, em função da sua posição. Outro aspecto importante na modelagem dos sistemas de vácuo, com sua câmara de vácuo com geometria essencialmente tubular, é que a sistemática de cálculo baseada nas três partes bem especificadas (a câmara de vácuo, a linha de bombeamento e a bomba de vácuo) não pode ser aplicada. O motivo é que existe um intenso gradiente de pressão na câmara de vácuo tubular, principalmente nos sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo, ou seja, a pressão varia muito na câmara de vácuo tubular. Dessa forma, há a necessidade de aplicar um modelo cuja variação de pressão na câmara de vácuo seja considerada. A formulação matemática nesse caso é realizada por meio de uma equação diferencial parcial, considerando o transporte de gases no regime molecular como sendo um fenômeno de difusão.

## DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E MODELAGEM DO SISTEMA DE VÁCUO

Apesar de os dispositivos baseados em estrutura tubulares, como mencionados, apresentarem detalhes construtivos, que introduzem complicações em suas superfícies expostas ao vácuo, podem-se fazer aproximações para realizar uma modelagem viável de solução matemática. Algumas estruturas de sistemas de vácuo, em boa aproximação, podem-se modelar fazendo uma aproximação com geometria basicamente tubular. Por meio da formulação contínua (baseada em uma equação diferencial parcial, cuja variação de pressão em cada ponto da câmara de vácuo é observada), os sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo com geometria em forma de tubo podem ser considerados problemas matemáticos apresentando apenas uma dimensão espacial, caso unidimensional<sup>1-3</sup>.

Uma vez que se tem disponível a equação de difusão para o caso unidimensional, pode-se aplicá-la à geometria tubular e estudar os casos em que as extremidades dos tubos são bombeadas com bombas de alto vácuo. É fundamental observar que o regime de transporte dos gases seja o molecular. Esta última exigência é fundamental para que se possa aplicar a equação de difusão. Um sistema de alto vácuo em forma tubular está esquematizado na Fig. 1.

A equação de difusão unidimensional dependente do tempo é dada pela Eq. 1:

$$c \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = -q(x,t) + A \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

sendo:  $p = p(x,t)$  o campo de pressão ao longo do comprimento do tubo,  $c = C \cdot L$  a condutância por unidade de comprimento

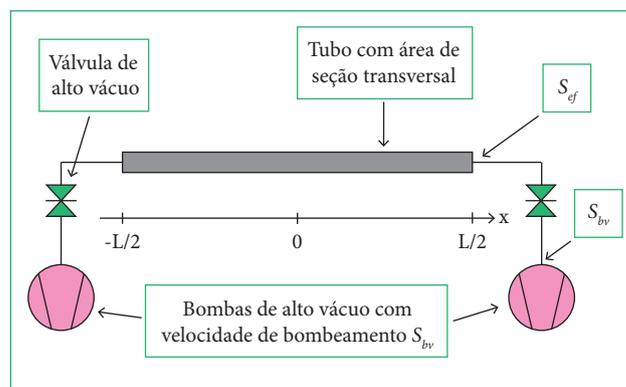


Figura 1: Estrutura geral de um sistema de alto vácuo ou ultra-alto vácuo com geometria tubular.

do tubo, chamada de condutância específica. A grandeza  $C$  representa a condutância do tubo de seção transversal circular com comprimento  $L$ , com a seção transversal do tubo dada, e também, o tipo do gás e sua temperatura especificados. Ainda,  $A = V/L$  o quociente do volume do tubo pelo seu comprimento, ou seja, a área transversal do tubo. Tem-se também  $q = q(x,t)$ , como sendo o termo que representa o conjunto das fontes de gás ou vapor que podem ocorrer ao longo do tubo.

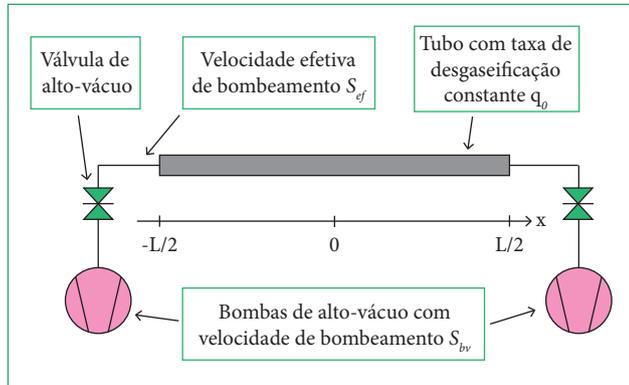
No caso específico deste trabalho, considera-se que o gás seja exclusivamente o que desgaseifica da parede do tubo. A função  $q = q(x,t)$  deve ser dada como sendo a taxa de transferência de gás (*throughput*) por unidade de comprimento do tubo, para cada fonte de gás considerada. Quando o estado estacionário for atingido, isto é, a pressão em cada ponto do sistema de vácuo não varia mais no tempo, tem-se a condição para . Dessa forma, para os instantes posteriores a  $t'$  o sistema de vácuo pode ser modelado pela equação de difusão unidimensional estacionária dada pela expressão a seguir na Eq. 2:

$$c \cdot \frac{d^2 p(x)}{dx^2} = -q(x) \Rightarrow \frac{d^2 p(x)}{dx^2} = -\frac{q(x)}{c} \quad (2)$$

Os problemas matemáticos do tipo tratado acima constituem os problemas de valores de contorno. As equações diferenciais parciais de segunda ordem, do tipo da equação de difusão, precisam da especificação de duas condições de contorno e uma condição inicial para a obtenção da solução do problema fisicamente aceitável. Considera-se que a taxa de desgaseificação do tubo seja constante, assim,  $q = q(x,t) = q_0$ . Dessa forma, esta função deve ser dada como sendo a taxa de desgaseificação por unidade de comprimento do tubo<sup>4</sup>. Como a modelagem construída assume o problema estacionário, isto é, independente do tempo, tem-se a necessidade de especificar somente as duas condições de contorno. Adota-se a direção definida pela reta  $x$  como sendo a orientação do sistema de vácuo tubular, com uma extremidade do tubo em  $x = -L/2$  e a outra extremidade em  $x = L/2$ .

Resumindo, neste trabalho foi estudado o caso de um tubo com taxa de desgaseificação constante com velocidades efetivas de

bombeamento iguais nas extremidades do tubo, assim, o campo de pressão em estado estacionário pode ser determinado pela solução da Eq. 2. Esquemáticamente o sistema de alto vácuo ou ultra-alto vácuo tubular é mostrado na Fig. 2, com as grandezas importantes sendo exibidas<sup>5,6</sup>.



**Figura 2:** Sistema de alto vácuo como geometria tubular, cuja taxa de desgaseificação do material é constante em toda a extensão do tubo e bombas de alto vácuo com igual velocidade de bombeamento nas extremidades do tubo. A condutância específica adotada é constante.

Para a obtenção da solução do problema estacionário, deve-se impor duas condições de contorno. Uma condição de contorno vem do fato de o bombeamento nas extremidades do tubo garantir uma pressão, que pode ser determinada em função da taxa de transferência total do gás desgaseificado do tubo. A outra condição de contorno pode ser imposta devido à simetria do problema, ou seja, no ponto médio do tubo a pressão é máxima, assim a derivada da pressão em função da posição deve ser zero. Matematicamente tem-se que as duas condições de contorno são dadas pelas Eqs. 3 e 4:

$$p\left(-\frac{L}{2}\right) = p\left(+\frac{L}{2}\right) = \frac{q_0 \cdot L}{2 \cdot S_{ef}} = \frac{Q_T}{2 \cdot S_{ef}} \quad (3)$$

$$\left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

Assim, encontrou-se a solução da equação de difusão para o caso estacionário com as grandezas físicas impostas, dada pela Eq. 5:

$$p(x) = -\frac{q_0}{2c} x^2 + \frac{Q_T}{2} \left( \frac{1}{S_{ef}} + \frac{L}{4c} \right) \quad (5)$$

sendo  $Q_T$  a taxa de transferência total de gás desgaseificado do tubo, dada por  $Q_T = q_0 \cdot L$  e  $S_{ef}$  a velocidade efetiva de bombeamento em cada extremidade do tubo. A Eq. 5 mostra que o perfil de pressão estacionário ao longo do tubo é de forma parabólica. É interessante e importante mencionar que muitos sistemas de alto

vácuo e ultra-alto vácuo podem ser, pelo menos em primeira aproximação, modelados na forma tubular, determinando dessa forma as suas características relevantes.

Ainda, na mesma linha de raciocínio, podem-se fazer algumas variações na configuração do sistema de alto vácuo tubular – com o propósito de simplificação – e obter soluções dos problemas de interesse. Por exemplo, considerar uma das extremidades do tubo fechada, isto é, sem bombeamento. Nesse caso, preserva-se o perfil parabólico de pressão, somente que o máximo de pressão estará localizado na extremidade do tubo fechada, ou seja, sem bombeamento. Em muitas situações de interesse, além da determinação do campo de pressão ao longo do tubo, pretende-se determinar a quantidade de gás – em termos de taxa de transferência de gás (*throughput*) – que chega às extremidades do tubo, assim bombeada pelas bombas de vácuo. Uma vez que, em geral, nas extremidades dos tubos têm-se as bombas de vácuo, por meio dessa modelagem, pode-se determinar a distância entre elas para garantir um campo de pressão adequado ao eficaz funcionamento do sistema de vácuo. No caso da necessidade do cálculo da taxa de transferência de gás, em qualquer posição do tubo, ela pode ser alcançada por meio da Eq. 6:

$$Q(x) = -c \cdot \frac{dp(x)}{dx} \quad (6)$$

A Eq. 6 pode ser particularizada para o caso do perfil parabólico obtido, conforme Eq. 7:

$$Q(x) = -c \cdot \frac{dp(x)}{dx} = -c \cdot \frac{d}{dx} \left[ -\frac{q_0}{2c} x^2 + \frac{Q_T}{2} \left( \frac{1}{S_{ef}} + \frac{L}{4c} \right) \right] \Rightarrow Q(x) = q_0 \cdot x \quad (7)$$

Em particular, pode-se aplicar a Eq. 7 nos extremos do tubo onde estão instaladas as linhas de bombeamento com as bombas de vácuo. Com isso, pode-se determinar a quantidade total de gás a ser bombeada por uma particular bomba de vácuo. No caso de se utilizar bomba de alto vácuo e ultra-alto vácuo do tipo iônica, pode-se avaliar o tempo de operação dessas bombas de vácuo, junto ao específico sistema de vácuo tubular.

A bomba de vácuo iônica é uma bomba de vácuo do tipo de aprisionamento de gás, com isso, ela tem uma duração por tempo limitado. Esse modelo simples pode também ser aplicado, por exemplo, em uma linha de bombeamento, a fim de determinar a distância que as bombas de alto vácuo devem ficar, de forma a garantir um campo de pressão adequado para o bom funcionamento do equipamento. Esse é um dado importante para o projeto de sistemas de alto vácuo ou ultra-alto vácuo tubulares. Antes de mostrar os resultados obtidos, ou seja, os gráficos dos campos de pressão ao longo do tubo, em função da velocidade

efetiva de bombeamento, pode-se ver a forma do campo de pressão para um particular caso de sistema de alto vácuo tubular.

## RESULTADOS

Será estudado a seguir como o campo de pressão de um sistema de alto vácuo tubular com taxa de desgaseificação constante depende da velocidade de bombeamento das bombas de vácuo instaladas nas extremidades do tubo e da condutância específica desse tubo.

Os resultados obtidos para vários valores de velocidade de bombeamento, fixando as dimensões do tubo, são bastante interessantes. O estudo de casos como este, mais uma vez, mostrará que pode-se aprender muito sobre o comportamento de sistemas de vácuo, em particular da importância fundamental da condutância – do próprio sistema de vácuo com sua linha de bombeamento – comparada à velocidade de bombeamento das bombas de vácuo.

A análise adotando a abordagem contínua é bastante simples de realizar e está mostrada a seguir, realizada utilizando o programa computacional MathCAD (para obter redundância nos cálculos, foi também utilizado o programa computacional Maple). A câmara de vácuo tubular tem seção transversal circular (tubo cilíndrico). Mantém-se constante a taxa de desgaseificação específica ao longo do tubo. As grandezas físicas que participam na modelagem para a obtenção do campo de pressão e do campo gradiente de pressão ao longo do tubo são as seguintes:

Comprimento:  $L = 400$  cm,

Diâmetro:  $D = 3$  cm,

Condutância total:  $C = 0,81$  L·s<sup>-1</sup>,

Condutância específica:  $c = 324$  L·cm·s<sup>-1</sup>,

Taxa de desgaseificação por unidade de comprimento:  $q_0 = 4,7 \times 10^{-8}$  mbar·L·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>, e velocidade efetiva de bombeamento da bomba de vácuo:  $S_{ef} = 100$  L·s<sup>-1</sup>.

É mostrado na Fig. 3 o campo de pressão ao longo do tubo e com as grandezas físicas especificadas, para o caso de velocidade efetiva de  $S_{ef} = 100$  L·s<sup>-1</sup>.

A pressão nas extremidades do tubo é de  $p(-200) = p(+200) = 9,4 \times 10^{-8}$  mbar. Na Fig. 4 tem-se a taxa de transferência do gás em função da posição no tubo, calculada pela Eq. 7. A taxa de transferência de gás (*throughput*) na extremidade tubo com  $x = -200$  cm é de  $Q(-200) = -9,4 \times 10^{-6}$  mbar·L·s<sup>-1</sup>. A taxa de transferência de gás (*throughput*) na extremidade do tubo com  $x = +200$  cm é de  $Q(+200) = 9,4 \times 10^{-6}$  mbar·L·s<sup>-1</sup>. O sinal negativo da taxa de transferência de gás em  $x = -200$  cm significa que o gás tem o seu transporte no sentido contrário à orientação da reta x.

A coerência do valor obtido da taxa de transferência do gás na extremidade do tubo pode ser verificada por meio do cálculo de  $Q(+200) = S_{ef} \times p(200) = 100 \times 9,4 \times 10^{-8} = 9,4 \times 10^{-6}$  mbar·L·s<sup>-1</sup>. O gráfico da taxa de transferência de gás (*throughput*) em toda a extensão do tubo é mostrado na Figura 4. Verifica-se na Fig. 3 que em  $x = 0$  cm a pressão atinge o valor máximo de

$p(0) = 3 \times 10^{-6}$  mbar. Pode-se verificar que em  $x = 0$  cm a taxa de transferência de gás é de  $Q(x) = 0$  mbar·L·s<sup>-1</sup>. Deve-se observar que o problema tem uma simetria na posição da metade do tubo ( $x = 0$  cm).

Continuando, tem-se a seguir uma análise realizada do sistema de alto vácuo tubular apresentando resultados de interesse para projeto desse tipo de sistema de vácuo. Ainda, os resultados são bastante reveladores e expõem claramente o seu comportamento quando varia-se a velocidade efetiva de bombeamento nas extremidades do tubo. Mais ainda, é digno de nota como as grandezas condutância específica, velocidade efetiva de bombeamento e taxa de desgaseificação específica do material do tubo são importantes e determinantes. Assim, para uma mesma configuração geométrica e fixando a taxa de desgaseificação específica por unidade de comprimento, o perfil de pressão é fundamentalmente dependente da relação entre a condutância do trecho do tubo considerado e a velocidade efetiva de bombeamento na extremidade do tubo.

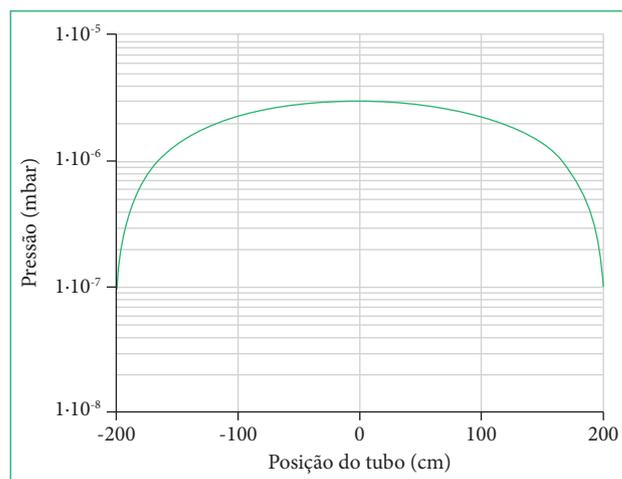


Figura 3: Campo de pressão ao longo do sistema de alto vácuo tubular (com velocidade efetiva de bombeamento de  $S_{ef} = 100$  L·s<sup>-1</sup> nas extremidades do tubo).

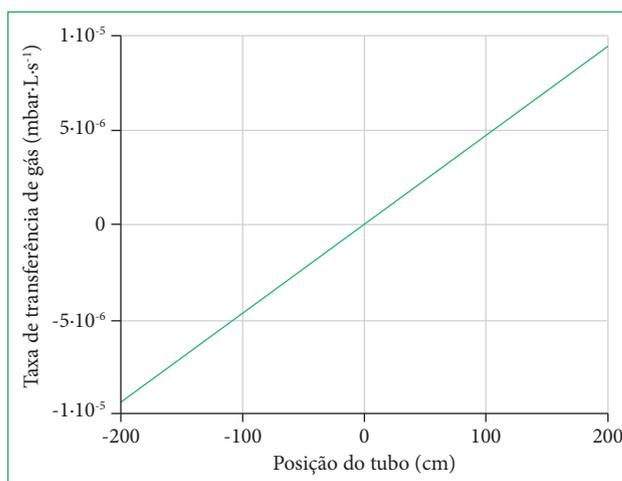
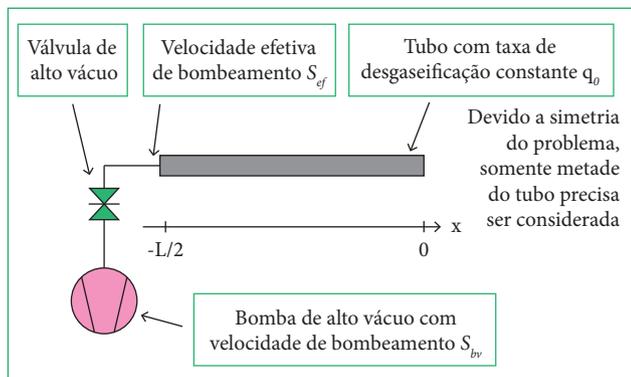


Figura 4: Campo de pressão ao longo do sistema de alto vácuo tubular (com velocidade efetiva de bombeamento de  $S_{ef} = 100$  L·s<sup>-1</sup> nas extremidades do tubo).

A seguir tem-se a construção da modelagem para a obtenção dos campos de pressão considerando a variação da velocidade efetiva de bombeamento nas extremidades do tubo. As grandezas relativas ao tipo de gás e a sua temperatura, as dimensões do tubo de seção transversal circular, a taxa específica de desgaseificação do material do tubo são as mesmas utilizadas no caso tratado anteriormente. Na Fig. 5 é mostrado esquematicamente o sistema de alto vácuo tratado. Vê-se que somente metade do tubo é mostrada devido à simetria do problema em questão. É de se notar que o problema de tubo inteiro, com bombeamento sendo realizado em ambas as extremidades (com igual valor de velocidade efetiva de bombeamento), é idêntico, do ponto de vista físico e matemático, ao problema de metade do tubo, fechado em uma das extremidades e velocidade efetiva de bombeamento igual ao problema anterior. Em suma: o problema de tubo inteiro com igual velocidade efetiva de bombeamento em suas duas extremidades é idêntico a aquele com metade do tubo (fechado em uma das extremidades) com bomba de vácuo, com velocidade efetiva de bombeamento igual ao do problema de tubo inteiro. Cabe mencionar que é sempre desejável, antes de resolver o problema matemático da modelagem, analisar se é possível encontrar alguma simetria no problema. Em geral, a solução matemática é facilitada e o esforço computacional é minorado. Não se deve perder de vista que a construção de uma modelagem é sempre uma tentativa de representar o problema em termos físicos (certamente também em termos matemáticos, uma vez que a linguagem da física é a matemática!).

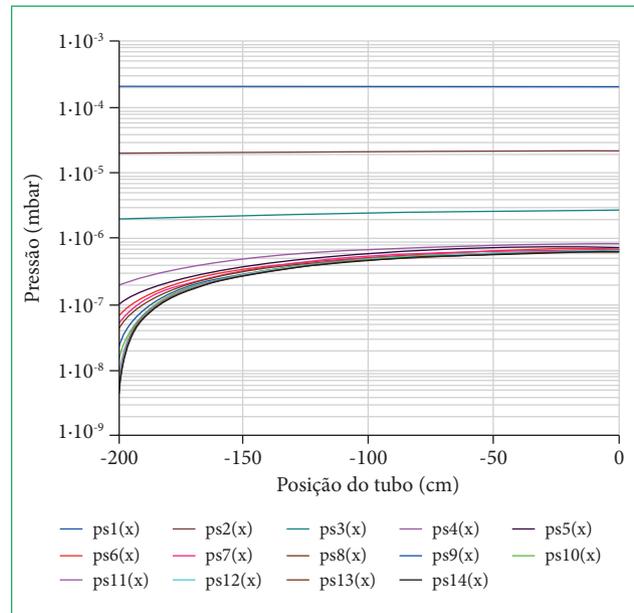
Tem-se a seguir as velocidades efetivas de bombeamento consideradas na análise realizada, a fim de se obter os respectivos campos de pressão. Assim, têm-se as velocidades efetivas de bombeamento:  $S1 = 0,01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S2 = 0,1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S3 = 1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S4 = 10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S5 = 20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S6 = 30 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S7 = 40 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S8 = 50 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S9 = 100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S10 = 200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S11 = 500 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S12 = 1000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $S13 = 5000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , e  $S14 = 10000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na Fig. 6 é possível ver os campos de pressão ao longo do comprimento do tubo em função da velocidade efetiva de bombeamento em suas extremidades. Vê-se que o campo de pressão, devido à velocidade efetiva de bombeamento  $S1$ , é



**Figura 5:** Sistema de alto vácuo tubular com taxa de desgaseificação constante. Considerando somente metade do tubo, devido a simetria do problema modelado.

nomeado como  $ps1 = ps1(x)$ , e assim por diante. Para cada velocidade efetiva de bombeamento tem-se o perfil parabólico de pressão. Por simetria, foi somente considerada metade do tubo, no caso o intervalo de  $-L/2 \leq x \leq 0$ .



**Figura 6:** Campo de pressão ao longo do sistema de alto vácuo tubular, considerando a variação da velocidade efetiva de bombeamento nas suas extremidades.

Há três situações identificadas na modelagem do tubo com várias velocidades efetivas de bombeamento, cujos comportamentos são bem distintos entre si. A primeira situação ocorre quando  $S_{bv} \ll C_{tubo}$ ; sendo  $C_{tubo}$  a condutância total do tubo, que pode ser escrita como sendo  $c = L \cdot C_{tubo}$ . Apesar de os campos de pressão serem parabólicos, o campo de pressão é praticamente constante ao longo de toda a extensão do tubo. Tem-se como um dos resultados mais importantes da análise de sistemas de vácuo, quando a condutância da câmara de vácuo é muito grande comparada à velocidade efetiva de bombeamento, a pressão na câmara de vácuo é praticamente constante em todas as suas partes. É possível constatar este fato nos campos de pressão,  $ps1 = ps1(x)$  e  $ps2 = ps2(x)$ . Neste caso, a abordagem discreta é suficiente para modelar o problema. A explicação física, para o fato de o campo de pressão ser praticamente constante, está no fato de o transporte dos gases ser dominado pela velocidade de bombeamento na extremidade do tubo, a condutância do tubo não é o fator limitante no transporte dos gases.

A segunda situação ocorre quando  $S_{bv} \approx C_{tubo}$ : tem-se neste caso que os campos de pressão, apesar de continuarem sendo de forma parabólica, as pressões ao longo do tubo não variam acentuadamente, pode-se constatar na curva  $ps3 = ps3(x)$ .

A terceira situação ocorre quando  $S_{bv} \gg C_{tubo}$ : tem-se que são obtidos campos de pressão parabólicos bem acentuados nas pressões nas extremidades do tubo, variando em função da velocidade efetiva de bombeamento, como visto nas curvas

representadas pelas funções de  $ps4 = ps4(x)$  até  $ps14 = ps14(x)$ . As pressões nas extremidades variam inversamente à velocidade de bombeamento. Mas, ao se afastar da extremidade do tubo, vê-se que as pressões praticamente não mudam de forma acentuada. Ainda, verifica-se que a pressão no ponto médio do tubo – isto é, em  $x = 0 \text{ cm}$  – tende a um valor limite de pressão, quando a velocidade efetiva de bombeamento  $S_{ef}$  tende a valores muito grandes (matematicamente,  $S_{ef}$  tende ao infinito). Esse valor é determinado por meio da Eq. 8,

$$\lim_{S_{ef} \rightarrow +\infty} p(0) = \lim_{S_{ef} \rightarrow +\infty} \frac{q_0 \cdot L}{2} \left( \frac{1}{S_{ef}} + \frac{L}{4 \cdot c} \right) = \frac{q_0 \cdot L^2}{8 \cdot c} \quad (8)$$

No caso do sistema de alto vácuo em estudo, o valor da pressão limite (mínima) atingida – em  $x = 0 \text{ cm}$  – é igual a  $p(0) = 6,2 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ . Esse é um resultado muito importante como dado de projeto. Talvez seja mesmo o mais expressivo, ele expõe claramente o papel da condutância no processo de bombeamento dos gases. Vê-se que, por mais que aumente a velocidade efetiva de bombeamento das bombas de vácuo – satisfazendo  $S_{bv} \gg C_{tubo}$  –, o campo de pressão não se altera expressivamente, exceto bem próximo às extremidades do tubo. Esse é um resultado geral em tecnologia do vácuo e constata-se o mesmo comportamento em sistemas de vácuo modelados pela abordagem discreta, cujo equivalente está contido na Eq. 9:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{Total}} \quad (9)$$

A qual mostra que mesmo aumentando muito a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo ( $S_{bv}$ ) a velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ ) estará limitada pela condutância da linha de bombeamento ( $C_{Total}$ ).

Este resultado é importante não somente do ponto de vista teórico-conceitual, exibindo claramente o papel da condutância no processo de bombeamento em sistema de vácuo em geral, mas também tem importância do ponto de vista de projeto. Com isso, pode-se dizer que, para um dado sistema de vácuo, tubular ou qualquer outra geometria, a diminuição de pressão muitas vezes não será conseguida aumentando a velocidade de bombeamento das bombas de vácuo, mas aumentando a condutância da linha de bombeamento. Em transporte de gases rarefeitos, deve-se ter sempre presente o fato de que, por mais capacidade de bombeamento que uma bomba de vácuo possa ter, o gás deverá chegar até a bomba de vácuo. A bomba de vácuo não tem poder de atrair as moléculas até ela. É o movimento caótico e perpétuo das moléculas que faz com elas atinjam a bomba de vácuo. Isso não se pode perder de vista. Nesse caso, a responsabilidade recai na linha de bombeamento, assim ela deverá ter uma condutância

condizente com a capacidade de bombeamento das bombas de vácuo. Cabe mencionar que a grandeza condutância específica é função do regime de transporte do gás (no caso considerado é o regime molecular), do tipo de gás (no caso considerado foi adotado o nitrogênio molecular –  $N_2$ ), da temperatura do gás (no caso considerado foi adotada a temperatura de  $20^\circ\text{C} - 293 \text{ K}$ ).

Pode-se ter a distância máxima que se deve instalar as bombas de vácuo como resultado da modelagem do sistema de alto vácuo tubular, a fim de alcançar o campo de pressão aceitável, ou seja, qual o distanciamento das bombas de vácuo em um sistema de vácuo tubular para se alcançar o perfil de pressão aceitável. A condutância depende da temperatura e aumenta com o seu aumento. Aumentado-se a temperatura do tubo, e assim, a temperatura do gás, por exemplo, por meio de uma fita aquecedora envolvendo a superfície externa do tubo, ocorrerá o aumento da condutância específica do tubo. Ocorrerá também uma desgaseificação mais intensa no início do processo de bombeamento e em seguida diminuirá a taxa de desgaseificação específica do material do tubo. Em geral, o aquecimento do sistema de alto vácuo, principalmente o do sistema de ultra-alto vácuo, é uma exigência para se diminuir a pressão, é o chamado condicionamento do sistema de vácuo.

## CONCLUSÃO

Pode-se concluir que é possível determinar o campo de pressão de sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo (e também de sistemas de extremo alto vácuo) tubulares por meio de uma modelagem bem realista. Foi possível determinar os campos de pressão e do seu gradiente para o caso de um tubo com bombeamento em suas extremidades. Pôde-se determinar a distância máxima que se devem instalar as bombas de vácuo na modelagem do sistema de alto vácuo tubular, a fim de alcançar o campo de pressão aceitável. Foram determinados os campos de pressão ao longo do tubo em função da velocidade efetiva de bombeamento. Como resultado, conseguiu-se verificar o limite intrínseco à natureza do aumento da velocidade efetiva de bombeamento e a diminuição de pressão ao longo do tubo.

## REFERÊNCIAS

1. Mammana VP, Degasperri FT, Monteiro OR, Vuolo JH, Salvadori MC, Brown IG. New field-emission device with improved vacuum features. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2000;18:1818. <https://doi.org/10.1116/1.582430>
2. Degasperri FT, Martins MN, Takahashi J, Verardi SLL. Time Dependence of the pressure profile in a tube with axially-dependent degassing. PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 01CH37268), Chicago (IL): IEEE. 2001;3:2203. <https://doi.org/10.1109/PAC.2001.987324>

3. Degasperi FT, Martins MN, Takahashi J, Verardi SLL. Pressure Field Along the Axis of an Accelerating Structure. Paris (FR): Proceedings of EPAC. 2002.
4. Degasperi FT, Martins MN, Takahashi J, Verardi SLL. Pressure field in a tube with a general and arbitrary time- and position-dependent gas source. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2004;22:2022-2026. <https://doi.org/10.1116/1.1778408>
5. Degasperi FT. Modelagem e Análise Detalhada de Sistemas de Vácuo. Dissertação [Mestrado em Engenharia Elétrica]. Campinas (SP): Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas; 2002.
6. Degasperi FT. Contribuições para Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo. Tese [Doutorado em Engenharia Elétrica]. Campinas (SP): Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas; 2006.