

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – FATEC-SP
CURSO DE MATERIAIS, PROCESSOS E COMPONENTES
ELETRÔNICOS

ALAN RIBEIRO CERQUEIRA

MODELAGEM, CÁLCULO DETALHADO COM AQUISIÇÃO DE
DADOS EXPERIMENTAIS DE SISTEMAS DE PRÉ-VÁCUO
APLICÁVEIS NA INDÚSTRIA

SÃO PAULO

2013

ALAN RIBEIRO CERQUEIRA

**MODELAGEM, CÁLCULO DETALHADO COM AQUISIÇÃO DE
DADOS EXPERIMENTAIS DE SISTEMAS DE PRÉ-VÁCUO
APLICÁVEIS NA INDÚSTRIA**

Trabalho de conclusão do Curso, apresentado para
obtenção do grau de TECNÓLOGO no Curso de
Tecnologia em Materiais, Processos e Componentes
Eletrônicos da Faculdade de Tecnologia de São
Paulo, FATEC-SP.

Orientador. Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

SÃO PAULO

2013

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus que é quem me dá força em todas as atividades da minha vida e a minha família pelo apoio e atenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador por ter dado apoio na execução desse trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Tecnologia de Vácuo – LTV por tudo que utilizei para terminar meu trabalho.

Agradeço as estudantes do curso de materiais pelo apoio e motivação.

Agradeço a todos os meus amigos que conheci na faculdade pelo apoio e motivação, sobretudo os estudantes do LTV que me ajudaram na montagem dos arranjos experimentais desse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho.

Nada substitui a persistência. Há talento sem sucesso, gênio sem recompensa e formação acadêmica mal sucedida, mas a persistência é onipotente. O slogan 'siga em frente' solucionou e sempre solucionará os problemas da raça humana.

CALVIN COOLIDGE, *republicano, presidente dos EUA (1923-1929)*.

RESUMO

As aplicações da tecnologia do vácuo são bastante amplas e se estendem a diversos setores industriais, tais como embalagem e processamento de alimentos, produção de vacina, fabricação de dispositivos eletrônicos, etc. A qualidade do vácuo aplicada em cada setor industrial depende da exigência do que os materiais e produtos têm para serem produzidos. Quanto menor a pressão em que um sistema de vácuo se encontra, menor é a quantidade de partículas contidas nesse sistema, dessa forma menor será a interação com o que se quer realmente produzir com agentes externos que são as impurezas do sistema.

Os sistemas de vácuo industriais operam em sua maioria na região de pré-vácuo que parte da pressão atmosférica local e vai até pressões da ordem de 10^{-3} mbar. Esses sistemas geralmente contêm tubulações utilizadas para os processos de bombeamento, além de vários outros componentes como válvulas, fole metálico entre outros. O fato é que se pode encontrar sistemas de vácuo de vários aspectos no que se refere a quantidade, dimensão e variedade de componentes utilizados.

Modelar um sistema de vácuo se trata de construir um modelo matemático que o represente. Nesse trabalho, os sistemas foram modelados utilizando como ferramenta o *software Mathcad* que permite obter resultados gráficos utilizando para isso expressões matemáticas. Tendo os resultados oriundos dessa ferramenta computacional, por meio das expressões, foi realizada uma comparação com os gráficos tirados dos dados experimentais. O quão complicado um sistema pode ser está aliado a várias características desse sistema. Parâmetros como velocidade de bombeamento, fonte de gases, valor da condutância da tubulação, entre outras características são as que tornam a modelagem mais complexas que é o explorado nesse trabalho.

ABSTRACT

The applications of vacuum technology are quite broad and extend to various industries such as packaging and food processing, production of vaccine manufacturing electronic devices, etc. The quality of the vacuum applied to each industrial sector depends on the requirement that materials and products have to be produced. The lower the pressure at which a vacuum system is found, the smaller the amount of particles in this system, thus is less interaction with that really want to make external agents that are impurities in the system.

Industrial vacuum systems operate mostly in region pre- vacuum of the local atmospheric pressure and until pressures on the order of 10^{-3} mbar. These systems usually contain tubes used for pumping processes, besides various other components like valves, metal bellows among others. The fact that vacuum can be found in several aspects with regard to quantity, size and number of components used systems.

Model a vacuum system it is building a mathematical model to represent In this work, the systems were modeled using Mathcad software as a tool that allows to graph results using mathematical expressions. Having the results originated from this computational tool, through expressions, a comparison with graphics taken from experimental data was performed. How complicated a system is can be combined with several characteristics of this system. The pumping speed of a vacuum pump varies in time , the sources of gases , calculation of the conductance of the tubes among other characteristics that make more complex modeling that is the explored in this work .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 Ilustração de um tubo e partículas..... | 11 |
| Figura 2 Conexões entre a bomba de vácuo disposta em série (DEGASPERI, FRANCISCO T.)..... | 16 |
| Figura 3 Conexões entre a bomba de vácuo e a câmara de vácuo disposta em paralelo (DEGASPERI, FRANCISCO T.)..... | 16 |
| Figura 4 Fluxo em um tubo do diâmetro maior para o menor (SILVA, SIMONE F.)..... | 17 |
| Figura 5 Ilustração do regime de escoamento viscoso turbulento (SILVA, SIMONE F.)..... | 18 |
| Figura 6 Ilustração do regime de escoamento viscoso laminar (SILVA, SIMONE F.)..... | 19 |
| Figura 7 Ilustração do regime de escoamento molecular (SILVA, SIMONE F.)..... | 20 |
| Figura 8 Ilustração do regime de escoamento intermediário ou de Knudsen (SILVA, SIMONE F.)..... | 21 |
| Figura 9 Medidor de membrana capacitiva CERAVAC com fundo de escala de 100 torr e 1000 torr, resolução de 0,003 % F.S. e precisão de 0,15 % da leitura. (CORTESIA DA LEYBOLD). | 23 |
| Figura 10 Medidor de membrana capacitiva BARATRON com fundo de escala de 1000 torr, resolução de 0,001 % F.S. e precisão de 0,25 % da leitura. (CORTESIA DA MKS). | 24 |
| Figura 11 Medidor vacustat..... | 25 |
| Figura 12 Tubo feito de polietileno com 30 m de comprimento e 4,35 mm de diâmetro..... | 25 |
| Figura 13 Fole metálico com 30 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro. | 26 |
| Figura 14 Multímetro Minipa modelo ET-2076A conectado a unidade controladora dos manômetros de membrana capacitiva CERAVAC. | 27 |
| Figura 15 Multímetro de bancada da Minipa modelo MDM-8165(em cima da bancada) fonte da Minipa modelo MPC 3003D (em cima da câmara de vácuo)..... | 27 |
| Figura 16 Câmara de vácuo de (56 ± 1) L feita com aço inoxidável. | 28 |
| Figura 17 Câmara de vácuo de $(48,0 \pm 0,5)$ L feita com aço inoxidável. | 28 |
| Figura 18 Bomba de pré-vácuo Pascal 2010, SD version, 1-phase motor, 180-254 V, 50 Hz/60 Hz com velocidade de bombeamento de $2,92 \text{ l.s}^{-1}$ | 29 |
| Figura 19 Desenho do sistema de vácuo1. | 31 |
| Figura 20 Foto do sistema de vácuo 1..... | 32 |
| Figura 21 Foto do sistema de vácuo 2..... | 40 |
| Figura 22 Desenho esquemático do sistema de vácuo 3..... | 47 |
| Figura 23 Foto da câmara de vácuo 1 e dos componentes para aquisição eletrônica dos dados de pressão e tempo do sistema de vácuo 3. | 48 |
| Figura 24 Foto da câmara de vácuo 2 e dos componentes para aquisição eletrônica dos dados de pressão e tempo do sistema de vácuo 3..... | 48 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 Comparação entre o vacustat e os manômetros de membrana capacitiva. | 30 |
| Gráfico 2 Curvas da velocidade de bombeamento da bomba mecânica, velocidade efetiva de bombeamento e da condutância do tubo obtidas no Mathcad para o sistema de vácuo 1..... | 33 |
| Gráfico 3 Pressão na câmara de vácuo em função do tempo considerando a bomba mecânica conectada diretamente e interligada a câmara pelo tubo. | 34 |
| Gráfico 4 Curva experimental dos dados do sistema de vácuo 1..... | 35 |
| Gráfico 5 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo 1. | 36 |
| Gráfico 6 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo 1 com o throughput ajustado. | 37 |
| Gráfico 7 Curva experimental ajustada por uma exponencial. | 38 |
| Gráfico 8 Curvas da pressão pelo tempo obtidas no catálogo da Pfeiffer. | 39 |
| Gráfico 9 Curvas da velocidade de bombeamento da bomba mecânica, velocidade efetiva de bombeamento e da condutância do tubo obtidas no Mathcad para o sistema de vácuo 2..... | 41 |
| Gráfico 10 Curva da pressão pelo tempo no sistema de vácuo 2. | 42 |
| Gráfico 11 Curva experimental do sistema de vácuo 2..... | 43 |
| Gráfico 12 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo 2. | 44 |
| Gráfico 13 Curva experimental ajustada para um polinômio de nona ordem..... | 45 |
| Gráfico 14 Curvas das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 no sistema de vácuo 3..... | 49 |
| Gráfico 15 Curvas com dados experimentais das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 do primeiro experimento do sistema de vácuo 3. | 51 |
| Gráfico 16 Curvas com dados experimentais das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 do segundo experimento do sistema de vácuo 3. | 52 |
| Gráfico 17 Curvas experimentais e modeladas das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2. | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabela 1</i> Nomenclaturas para as faixas de pressões. | 7 |
| <i>Tabela 2</i> Regime de escoamento e número de Knudsen (MOUTINHO, A. M. C. - TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA) | 13 |
| <i>Tabela 3</i> Resultados para a velocidade de bombeamento. | 38 |
| <i>Tabela 4</i> Ajuste polinomial..... | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | 11 |
| ABSTRACT | 12 |
| 1 INTRODUÇÃO | 6 |
| 1.1 OBJETIVO | 6 |
| 1.2 APRESENTAÇÃO | 7 |
| 2 EMBASAMENTO TEÓRICO..... | 9 |
| 2.1 TEORIA CINÉTICA DOS GASES | 9 |
| 2.1.1 Número de Avogadro..... | 9 |
| 2.1.2 Gases Ideais | 9 |
| 2.2 THROUGHPUT | 10 |
| 2.3 LIVRE CAMINHO MÉDIO | 11 |
| 2.4 NÚMERO DE KNUDSEN | 12 |
| 2.5 NÚMERO DE REYNOLDS | 13 |
| 2.6 CONDUTÂNCIA..... | 14 |
| 2.6.1 Condutância em Série e em Paralelo | 15 |
| 2.6.2 Condutância em um Orifício de Seção Circular | 17 |
| 2.7 REGIMES DE ESCOAMENTO | 18 |
| 2.7.1 Regime Viscoso Turbulento | 18 |
| 2.7.2 Regime Viscoso Laminar..... | 19 |
| 2.7.3 Regime de Escoamento Molecular | 20 |
| 2.7.4 Regime Intermediário ou de Knudsen | 20 |
| 2.8 EQUAÇÃO FUNDAMENTAL PARA BOMBEAMENTO EM VÁCUO | 21 |
| 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS | 23 |
| 3.1 MANÔMETROS..... | 23 |
| 3.2 TUBOS | 25 |
| 3.3 INSTRUMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS | 26 |
| 3.4 CÂMARAS DE VÁCUO | 28 |
| 3.5 BOMBA DE PRÉ-VÁCUO | 29 |
| 4 RESULTADOS..... | 29 |
| 4.1 SISTEMA DE VÁCUO 1 | 29 |
| 4.1.1 Comparação entre manômetros | 29 |

| | |
|--|----|
| 4.1.2 Resultados obtidos no Mathcad - Sistema de Vácuo 1 | 30 |
| 4.1.3 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 1 | 35 |
| 4.2 SISTEMA DE VÁCUO 2 | 39 |
| 4.2.1 Resultados obtidos no Mathcad – Sistema de Vácuo 2 | 39 |
| 4.2.2 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 2 | 42 |
| 4.3 SISTEMA DE VÁCUO 3 | 46 |
| 4.3.1 Resultados obtidos no Mathcad – Sistema de Vácuo 3 | 46 |
| 4.3.2 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 3 | 50 |
| 5 CONCLUSÃO | 54 |
| 6 REFERÊNCIAS | 56 |
| 7 ANEXOS | 57 |
| Anexo A – Modelagem do Sistema de vácuo 1 e 2 | 57 |
| Anexo B – Modelagem do Sistema de vácuo 3 | 73 |
| Anexo C – Gráficos obtidos com os dados experimentais | 79 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo a modelagem de sistemas complexos de pré-vácuo utilizados nas indústrias com o auxílio do software *Mathcad* na resolução das expressões que não possuem resolução analítica. Os sistemas são complexos devido à dificuldade de se obter expressões matemáticas que os descrevam, sendo assim a partir dos resultados obtidos com o *Mathcad* pretende-se chegar aos resultados experimentais.

1.2 APRESENTAÇÃO

A palavra vácuo é empregada quando se quer indicar a ausência de matéria em um meio, isto é, o vazio ou o nada. No dicionário ela está definida como um lugar onde não contém nada, mas na realidade não é bem assim. Na tecnologia do vácuo essa palavra é utilizada para indicar que determinado ambiente se encontra a uma pressão abaixo da pressão atmosférica local. Sendo que, por mais que se diminua a pressão, temos uma limitação no processo que impossibilita a retirada de todas as partículas de uma câmara de vácuo, devido a fenômenos físicos como desgaseificação e pressão de vapor dos materiais.

Em geral, na tecnologia do vácuo as pressões variam em 15 ordens de grandezas partindo de 1013 mbar ou 760 torr, até cerca de 10^{-12} mbar ou 10^{-13} torr, contudo já se alcançou pressões da ordem de 10^{-14} mbar em laboratórios. A qualidade do vácuo é dada pela pressão que depende dentre outros fatores das condições do sistema, tais como os materiais utilizados, condutâncias e bombas que tem a função de bombear o sistema e assim atingir as pressões desejadas. Para que se chegue a pressões extremamente baixas é necessário um sistema com alto grau de limpeza que seja composto por materiais resistentes à força imposta pela atmosfera, devido à grande diferença de pressão, e que não apresente alta taxa de desgaseificação facilmente, pois isto servirá de barreira para que se chegue às condições desejadas. Dessa maneira, temos as seguintes faixas de pressões que utilizam as seguintes nomenclaturas:

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| Pré – vácuo | 760 Torr a 10^{-3} Torr |
| Alto – vácuo | 10^{-4} Torr a 10^{-7} Torr |
| Ultra – alto – vácuo | 10^{-8} Torr a 10^{-11} Torr |
| Extremo – alto – vácuo | Abaixo de 10^{-12} Torr |

Tabela 1 Nomenclaturas para as faixas de pressões.

Dependendo das dimensões das tubulações e da pressão, o fluxo dos gases ocorrerá de formas diferentes. Considerando essas variáveis, que estão ligadas ao livre caminho médio de uma partícula, teremos os regimes de escoamento viscoso turbulento, no qual a

velocidade varia bastante de um ponto para o outro, o viscoso laminar, onde a velocidade dos gases é maior nas regiões centrais e nula próxima as paredes, o molecular em que as partículas tendem a se chocar preferencialmente com as paredes, e por último o regime intermediário ou de Knudsen que corresponde a transição do regime viscoso para o molecular.

Esse trabalho tem como intuito a modelagem e análise de sistemas de vácuo complexos utilizados nas indústrias que têm cerca de 80% das aplicações na região de pré-vácuo, como exemplo, indústrias de alimentos, metalização entre outras. Nessa região podemos encontrar o regime de escoamento turbulento, viscoso ou laminar e o intermediário ou Knudsen, dependendo das características do sistema. Entende-se por complexo os sistemas em que há dificuldade de realizar a modelagem devido à variação do bombeamento com a pressão, além disso, temos os casos em que as fontes de gases são difíceis de determinar, os gases e vapores têm viscosidades diferentes, a câmara é bombeada por bombas em vários pontos, uma ou mais bombas são interligadas por condutâncias além de inúmeras outras complexidades. A modelagem desses sistemas, em geral, resulta em equações diferenciais ordinárias não lineares. Por conseguinte, os cálculos nesses sistemas são complicados, isto é, impossíveis de se resolverem analiticamente, sendo exigido o uso de métodos numéricos de cálculo ou ferramentas computacionais como o *Mathcad*, ferramenta utilizada na resolução das expressões desse trabalho [1].

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 TEORIA CINÉTICA DOS GASES

2.1.1 Número de Avogadro

O mol é definido como o número de átomos existentes em uma amostra de 12g do carbono-12, sendo o número de átomos ou moléculas contidos em um mol igual a $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (Número de Avogadro). Constante essa que recebeu o nome em homenagem a Amadeo Avogadro (1776-1856). Tal valor sugere que todos os gases que ocupem um mesmo volume sob as mesmas condições de temperatura e pressão, possuem números de átomos ou moléculas iguais [5].

A quantidade de mols contidas numa amostra pode ser obtida pela razão entre o número de moléculas, N , e o de Avogadro:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad \text{Equação 1}$$

Resultado que também é obtido pela razão da massa da amostra, M_{am} , e massa molar, M , que é dada pelo produto entre a massa m de uma molécula e o número de moléculas em um mol, N_A :

$$n = \frac{M_{am}}{M} = \frac{M_{am}}{mN_A} \quad \text{Equação 2}$$

2.1.2 Gases Ideais

O termo gases ideais é dado aos gases que têm suas propriedades macroscópicas, tais como pressão e temperatura regida pela equação abaixo, conhecida como lei dos gases ideais que é válida para densidades baixas dos gases onde p é a pressão, V o volume, $R(8,31 \text{ J/mol.K})$ a constante dos gases ideais e T a temperatura. Se diferentes gases forem colocados em recipientes de mesmo volume, de maneira que as densidades sejam baixas uma pequena diferença na pressão de cada um deles é notada, porém à medida que se diminui mais a densidade dos gases a diferença de pressão tende a desaparecer.

$$pV = nRT \quad \text{Equação 3}$$

Outro modo de escrever a equação acima é utilizando a constante de Boltzmann, k :

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,31J/mol.K}{6,02.10^{23}mol^{-1}} = 1,38.10^{-23}J/K \quad \text{Equação 4}$$

Substituindo o valor de R e n (equação 1) na equação 3 temos que:

$$pV = NkT \quad \text{Equação 5}$$

2.2 THROUGHPUT

O fluxo dos gases ocorre devido a uma variação na pressão ou volume. Considerando um tubo com determinado comprimento e pressões p_1 e p_2 em suas extremidades, sendo $p_1 > p_2$ temos que o deslocamento da massa de um gás qualquer vai de p_1 para p_2 . Nesse pequeno exemplo, sem se ater aos detalhes do regime de escoamento, se insere um dos conceitos mais importantes na tecnologia do vácuo que é o *throughput* (Q), definido como a quantidade de massa que passa por uma determinada seção por unidade de tempo [6].

Admitindo uma determinada pressão numa seção do tubo, o *throughput* é obtido por meio do produto desta pressão pela variação do volume no tempo, isto é:

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt} \quad \text{Equação 6}$$

Conhecendo a lei dos gases ideais.

$$PV = nRT \quad \text{Equação 7}$$

E que:

$$n = \frac{W}{M} \quad \text{Equação 8}$$

Se W a massa de certa quantidade de moléculas e M a massa de um mol. Derivando em relação ao tempo, se obtém:

$$P \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{dW}{dt} \cdot \frac{RT}{M} \quad \text{Equação 9}$$

No regime estacionário com volume constante o termo $\frac{dV}{dt}$ resulta em zero, o que reduz a equação (9) que define o *throughput*:

$$V \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{dW}{dt} \cdot \frac{RT}{M} \quad \text{Equação 10}$$

2.3 LIVRE CAMINHO MÉDIO

As moléculas contidas num sistema de vácuo são as responsáveis pela pressão, sendo que esta é determinada pela quantidade de choques dessas com as paredes da câmara e quanto maior a quantidade de choques, a pressão será mais elevada, ou seja, para que se tenha uma pressão baixa é preciso diminuir a quantidade de moléculas.



Figura 1 Ilustração de um tubo e partículas.

Em casos onde se têm pressões altas as colisões entre as partículas do sistema são bastante frequentes, e neste contexto se insere o conceito do livre caminho médio que é a distância média percorrida pela molécula entre duas colisões sucessivas [4]. Na **Figura 1** é representado um tubo com diâmetro d_1 e com moléculas de diâmetros d_2 e d_3 , $d_3 > d_2$, para que haja colisão entre elas a distância entre os centros das moléculas deve ser de $d = \frac{d_2 + d_3}{2}$. A seção efetiva de choque é definida por:

$$\sigma = \pi d^2 \quad \text{Equação 11}$$

O livre caminho médio é o inverso do produto da seção efetiva de choque pela densidade de moléculas(n), o que resulta em:

$$\lambda = \frac{1}{\pi d^2 n}$$

Equação 12

A equação (12) não leva em consideração os diferentes tipos de colisões existentes, a expressão que prevê esses choques é:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

Equação 13

Quando se tem o livre caminho médio em função da temperatura e da pressão a expressão é dada por:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

Equação 14

Por fim, com o ar à temperatura ambiente de 20°C, levando-se em conta o diâmetro médio das moléculas, é feita uma aproximação que resulta em:

$$\lambda \cong \frac{7 \cdot 10^{-3}}{p_{mbar}} \text{cm}$$

Equação 15

2.4 NÚMERO DE KNUDSEN

As moléculas contidas numa tubulação de um sistema estão em constante movimento aleatório, e dependendo da densidade e da pressão, ocorre preferencialmente uma maior quantidade de choques entre si ou com as paredes. A relação do livre caminho médio com o diâmetro da tubulação é usada para determinar o regime de escoamento em que se encontra o sistema ao atingir sua pressão final, recebendo o nome de número de Knudsen:

$$Kn = \frac{\lambda}{D}$$

Equação 16

Na **Tabela 2** aparece o número de Knudsen correspondente a cada regime de escoamento.

| Regime de escoamento | Número de Knudsen |
|----------------------|-------------------|
| Turbulento | $Kn < 0,01$ |
| Viscoso | $Kn < 0,01$ |
| Intermediário | $0,01 < Kn < 1$ |
| Molecular | $Kn > 1$ |

Tabela 2 Regime de escoamento e número de Knudsen (MOUTINHO, A. M. C. - TECNOLOGIA DE VÁCUO – UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA)

No caso do ar à temperatura ambiente o livre caminho médio é dado pela expressão (15), dessa forma se o produto da pressão média da tubulação (p_m) pelo diâmetro da seção for $< 7.10^{-1}$ mbar.cm se caracteriza regime viscoso e se for $> 7.10^{-3}$ mbar.cm regime molecular.

2.5 NÚMERO DE REYNOLDS

Por meio do número de Knudsen, como já visto, é possível determinar o regime de escoamento. O regime viscoso e o turbulento ocorrem para $Kn < 0,01$, para saber em qual regime o sistema se encontra é utilizado o número de Reynolds, obtido pela equação abaixo, onde D é o diâmetro da tubulação, v a velocidade média do fluxo do gás que atravessa a seção transversal do tubo, ρ a densidade do gás e η o coeficiente de viscosidade do gás.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\eta} \quad \text{Equação 17}$$

Para a temperatura de 20°C o número de Reynolds é dado pela equação 18, na qual Q corresponde ao fluxo em milibar litros por segundo e D ao diâmetro em centímetros.

$$Re = 8,3 \cdot D^{-1}Q \quad \text{Equação 18}$$

Para um resultado menor que 1000 o sistema se encontra no regime de escoamento viscoso e estará no regime de escoamento turbulento quando o número de Reynolds for

maior que 2000. Para valores entre 1000 e 2000 o regime de escoamento é viscoso ou turbulento.

2.6 CONDUTÂNCIA

A ligação entre uma câmara e uma bomba de vácuo pode ser direta, isto é, a bomba é conectada direto na câmara, ou por meio de tubulações que é o caso mais frequente. No primeiro caso a velocidade efetiva de bombeamento é considerada igual a da bomba, visto que a massa de gás bombeada não sofre quase nenhuma resistência em seu percurso até a bomba, ou seja, a condutância é infinita, o que não acontece em sistemas em que há conexões entre a bomba e a câmara, já que se tem uma resistência que inibe de certa forma, o fluxo da massa gasosa. Com a bomba em funcionamento, a pressão em suas proximidades é menor que dentro da câmara e devido a essa diferença de pressão, surge o fluxo dos gases. O inverso da resistência recebe o nome de condutância que tem como unidade volume por tempo, geralmente usa-se l.s^{-1} .

$$C = \frac{1}{Z} \quad \text{Equação 19}$$

Em circuitos elétricos as grandezas elétricas envolvidas são tensão, resistência e corrente e, como as três possuem uma relação entre si, é possível calcular seus valores. Fazendo uma comparação com os sistemas de vácuo, se obtém determinada equivalência entre as grandezas. A diferença de pressão no sistema equivale a uma tensão aplicada num circuito elétrico, o *throughput* a corrente e a condutância o inverso da resistência como observado na expressão (19). Então a partir disso se tem:

$$Q = C(p_1 - p_2) \quad \text{Equação 20}$$

Em uma câmara com conexões, o inverso da velocidade de bombeamento é:

$$\frac{1}{S} = \frac{p_1}{Q} \quad \text{Equação 21}$$

Isolando p_1 que é a pressão na câmara na equação (20) se tem:

$$p_1 = \frac{Q}{C} + p_2 \quad \text{Equação 22}$$

Substituindo a equação (21) na (22) o resultado é:

$$\frac{1}{s_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{s_b} \quad \text{Equação 23}$$

Em que s_b é velocidade da bomba. Analisando a expressão 23, se o sistema possuir uma condutância com valor muito maior que a velocidade de bombeamento da bomba a velocidade de bombeamento se aproximará a da bomba, do contrário, se a condutância for muito menor, a velocidade de bombeamento será limitada pelo valor da condutância [3].

2.6.1 Condutância em Série e em Paralelo

Comparando o cálculo da resistência equivalente de uma associação com a da condutância equivalente percebe-se que o procedimento é o mesmo, porém invertido, isto é, no cálculo da resistência equivalente de uma associação em série as resistências são somadas, já as condutâncias neste mesmo tipo de associação tem como método na obtenção da condutância equivalente o mesmo da resistência equivalente numa associação em paralelo, que é obtida pela soma de todas as resistências da associação. Então, para calcular a condutância equivalente de uma associação em série (**Figura 2**) e em paralelo (**Figura 3**), usam-se respectivamente as expressões (23) e (24).

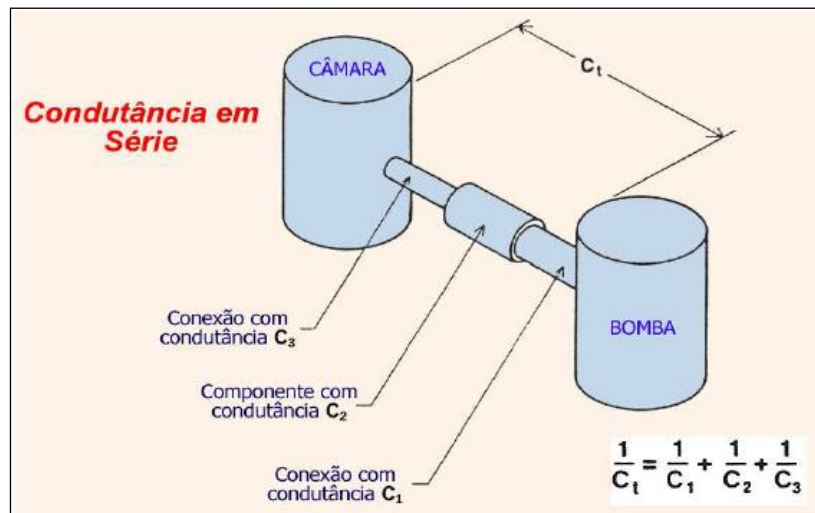


Figura 2 Conexões entre a bomba de vácuo disposta em série (DEGASPERI, FRANCISCO T.)

Expressão para associação de condutâncias em série:

$$\frac{1}{C_{\text{série}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Equação 24

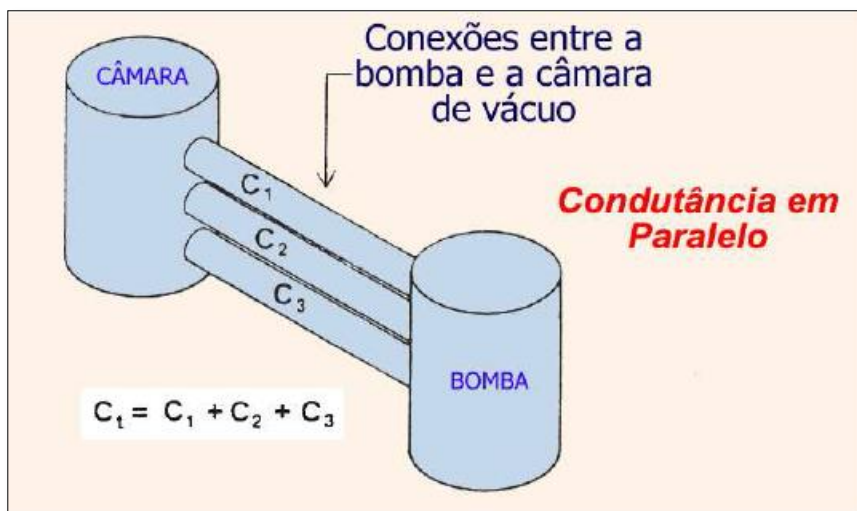


Figura 3 Conexões entre a bomba de vácuo e a câmara de vácuo disposta em paralelo (DEGASPERI, FRANCISCO T.).

Associação de condutâncias em paralelo:

$$C_{paralelo} = C_1 + C_2 + C_3$$

Equação 25

2.6.2 Condutância em um Orifício de Seção Circular

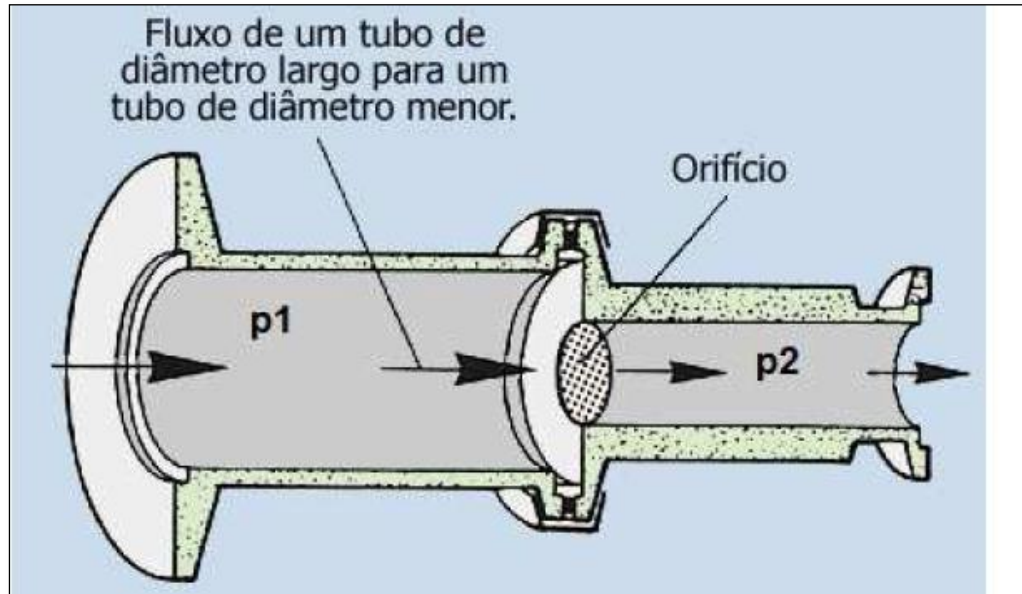


Figura 4 Fluxo em um tubo do diâmetro maior para o menor (SILVA, SIMONE F.)

Na **Figura 4** a massa de gás que passa do orifício com diâmetro maior para outro menor sofre certa dificuldade para escoar e nesse caso são utilizadas determinadas expressões conforme o regime de escoamento. No regime viscoso laminar para o nitrogênio a 20°C a equação é:

$$C_{ori}\left(\frac{l}{s}\right) = 20 \frac{A}{(1-p_2/p_1)} \quad \text{para } \frac{p_2}{p_1} \leq 0,52. \quad \text{Equação 26}$$

Para o regime molecular, a condutância do orifício pequeno é dada por:

$$C_{ori}\left(\frac{l}{s}\right) = 3,64 \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2} \cdot A \quad \text{Equação 27}$$

Onde T é a temperatura, M é o peso molecular do gás e A é a área.

2.7 REGIMES DE ESCOAMENTO

A determinação do regime de escoamento é de suma importância nos sistema de vácuo, visto que os cálculos da condutância e consequentemente da velocidade efetiva de bombeamento variam bastante conforme o regime de escoamento.

Por meio do número de Knudsen e do número de Reynolds consegue-se determinar o regime de escoamento que é dependente da pressão e da velocidade de bombeamento. São eles: regime turbulento, viscoso laminar, molecular e intermediário [2].

2.7.1 Regime Viscoso Turbulento

O regime se caracteriza pela alta pressão e velocidade de bombeamento do sistema, sendo que há muitas oscilações e redemoinhos e a velocidade do gás varia de um ponto para outro. Como se pode observar na **Figura 5** apesar do movimento aleatório da massa gasosa, o movimento relativo ocorre da esquerda para a direita, ponto de alta pressão pra outro de pressão mais baixa.

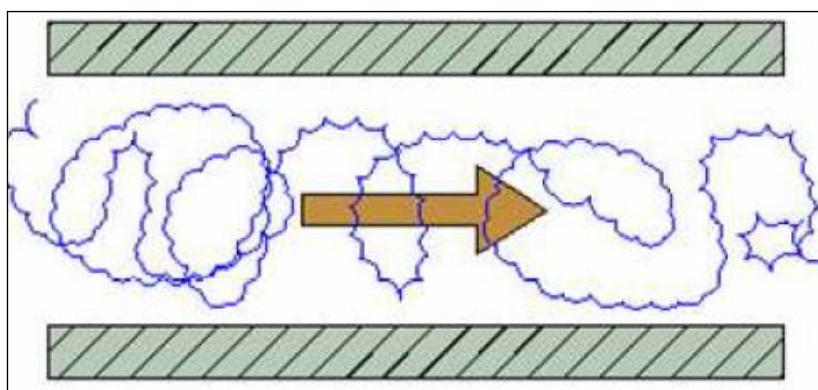


Figura 5 Ilustração do regime de escoamento viscoso turbulento (SILVA, SIMONE F.)

2.7.2 Regime Viscoso Laminar

Neste regime há a sobreposição das massas gasosas, como ilustrado na **Figura 6**, de maneira que a velocidade é maior nas camadas mais próximas do centro e praticamente nula à medida que se aproxima da parede.

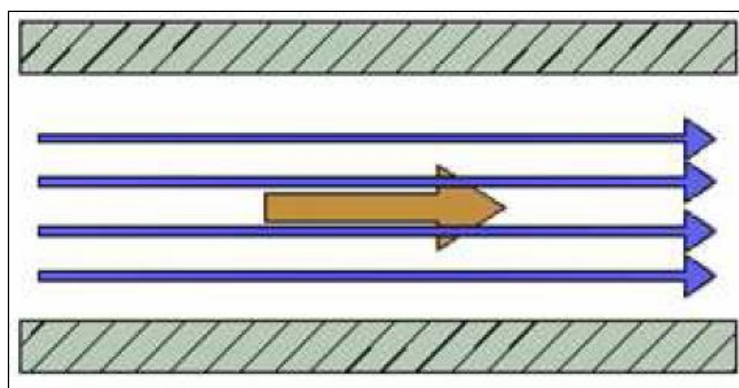


Figura 6 Ilustração do regime de escoamento viscoso laminar (SILVA, SIMONE F.)

Para calcular a condutância neste regime utiliza-se a expressão abaixo, em que D é o diâmetro do tubo cilíndrico, L o comprimento do mesmo, p_m pressão média e η a viscosidade do gás.

$$C_{\text{lam}}(\text{l s}^{-1}) = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{D^4}{\eta \cdot L} \cdot p_m \quad \text{Equação 28}$$

Com o gás N_2 a 20°C ($\eta=1,829 \cdot 10^{-4}$) se tem:

$$C_{\text{lam}}(\text{l s}^{-1}) = 134 \cdot \frac{D^4}{L} \cdot p_m \quad \text{Equação 29}$$

2.7.3 Regime de Escoamento Molecular

Quando o sistema se estabiliza em pressões bem baixas e o livre caminho médio das moléculas é maior que o diâmetro da tubulação, o sistema se encontra no regime molecular. Neste, as moléculas que antes se chocavam constantemente entre si agora passam a colidir apenas com as paredes da tubulação, conforme ilustra a **Figura 7**.

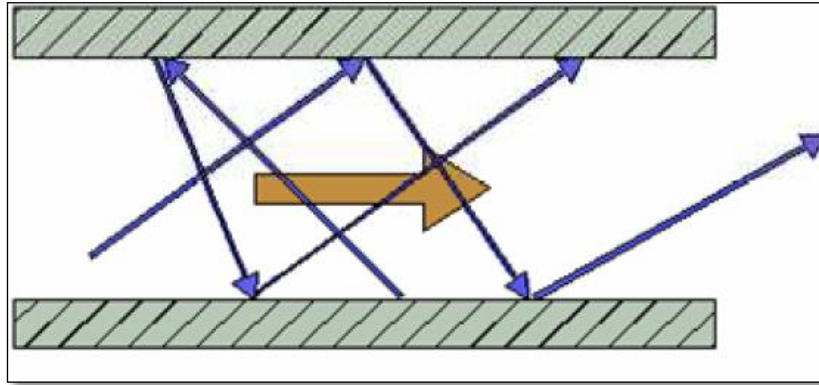


Figura 7 Ilustração do regime de escoamento molecular (SILVA, SIMONE F.)

Para calcular a condutância de forma geral nesse regime usa-se:

$$C_{mol}(l\ s^{-1}) = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{2kT}{m}} \cdot D^3 \quad \text{Equação 30}$$

Considerando o gás N₂ a 20° C o resultado se aproxima de:

$$C_{mol}(l\ s^{-1}) = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \quad \text{Equação 31}$$

2.7.4 Regime Intermediário ou de Knudsen

O regime intermediário ou de Knudsen possui características tanto do regime viscoso quanto do molecular, conforme a **Figura 8**. As moléculas se chocam entre si e com as paredes, porém próximo a elas a velocidade é diferente de zero, o que não ocorre no regime intermediário.

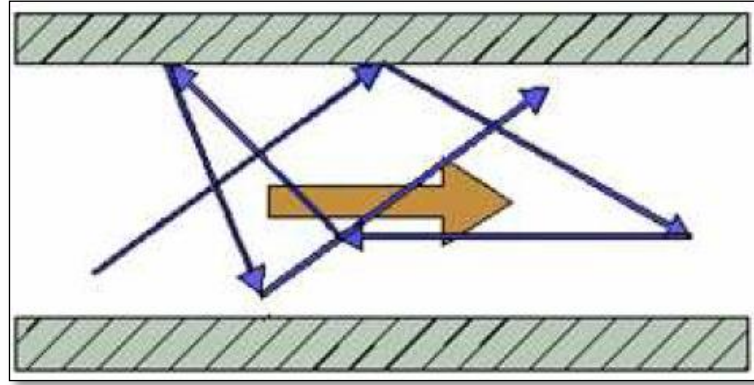


Figura 8 Ilustração do regime de escoamento intermediário ou de Knudsen (SILVA, SIMONE F.)

2.8 EQUAÇÃO FUNDAMENTAL PARA BOMBEAMENTO EM VÁCUO

A equação fundamental para o processo de bombeamento é uma expressão que envolve o volume da câmara de vácuo, a pressão em relação a cada instante do processo de bombeamento, a velocidade da bomba de vácuo e a soma dos *throughputs*.

$$V_{cv} \cdot \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} \cdot p_{cv}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{Equação 32}$$

Na expressão acima temos que V_{cv} é o volume da câmara de vácuo p_{cv} a pressão na câmara de vácuo, S_{ef} a velocidade de bombeamento efetiva do sistema e $\sum_{i=1}^n Q_i$ a soma dos *throughputs* envolvidos que tem origem, por exemplo, na desgaseificação das paredes do sistema e que só é significativa a partir de pressões na faixa da região de alto-vácuo (10^{-4} Torr a 10^{-7} Torr), sendo considerado zero na região de pré-vácuo (760 Torr a 10^{-3} Torr). Abaixo, mostra-se como obter o valor da pressão na câmara em função do tempo.

Como $\sum_{i=1}^n Q_i = 0$, temos que:

$$V_{cv} \cdot \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} \cdot p_{cv}(t) \quad \text{Equação 33}$$

Integrando no tempo e na pressão em cada lado da expressão chega-se a expressão abaixo em que p_0 é a pressão no sistema no tempo zero

$$p_{cv}(t) = p_0 \cdot e^{-\frac{S_{ef}}{V_{cv}}t} \quad \text{Equação 34}$$

Aplicando o logaritmo neperiano nos dois lados da equação 34 se obtém uma equação para o cálculo da velocidade efetiva de bombeamento.

$$-S_{ef} = \ln \left(\frac{p_0}{p_{cv}} \right) \frac{V_{cv}}{t} \quad \text{Equação 35}$$

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 MANÔMETROS

Nos sistemas de vácuo que serão descritos nesse trabalho foram utilizados dois tipos de manômetros: manômetro de membrana capacitiva e vacustat. Apesar de existir uma parte eletrônica no medidor de membrana capacitiva, se trata de um medidor direto que obtém o valor da pressão do sistema por meio da deformação de uma membrana que faz parte de um capacitor. No total, foram utilizados três medidores de membrana capacitiva, dois da fabricante Leybold (**Figura 9**) e um da mks (**Figura 10**). Os dois medidores com fundo de escala de 1000 torr chegam a medir pressões da ordem de 10^{-2} Torr e o com fundo de escala de 100 torr pressões da ordem de 10^{-3} torr.



Figura 9 Medidor de membrana capacitiva CERAVAC com fundo de escala de 100 torr e 1000 torr, resolução de 0,003 % F.S. e precisão de 0,15 % da leitura. (CORTESIA DA LEYBOLD).



Figura 10 Medidor de membrana capacitiva BARATRON com fundo de escala de 1000 torr, resolução de 0,001 % F.S. e precisão de 0,25 % da leitura. (CORTESIA DA MKS).

O *vacustat* (**Figura 11**) também é um medidor direto, porém não possui parte eletrônica. Esse medidor combina os efeitos de um manômetro de coluna de mercúrio com o efeito da compressão dos gases e mede desde a pressão de 5 torr até $5 \cdot 10^{-2}$ torr. Esse medidor não foi usado na aquisição dos dados de pressão no tempo para obter os gráficos e sim para comparar os valores obtidos com os medidores de membrana capacitiva CERA-VAC, conferindo assim uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.



Figura 11 *Medidor vacustat.*

3.2 TUBOS

Os tubos foram utilizados para interligar a bomba de vácuo com a câmara de vácuo ou para interligar duas câmaras de vácuo. Abaixo são mostradas algumas figuras com as dimensões especificadas.



Figura 12 *Tubo feito de polietileno com 30 m de comprimento e 4,35 mm de diâmetro.*

O tubo da **Figura 12** acima foi utilizado para interligar a câmara de vácuo e uma bomba mecânica, o que também foi feito para o fole metálico da **Figura 13**. Também foi utilizado outro tubo do mesmo material e diâmetro do representado na **Figura 12** só que com comprimento de 3,28 m.



Figura 13 Fole metálico com 30 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro.

3.3 INSTRUMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados da pressão pelo tempo nos sistemas de vácuo foram obtidos por meio de um sistema eletrônico ligado nos medidores e em um computador. Os manômetros de membrana capacitiva possuem uma unidade controladora que mostra os valores de pressão medidos, esse equipamento é conectado a um multímetro (**Figura 14**) que coleta as variações de tensão e passa para o computador onde é feita a transformação dos valores de tensão em pressão.

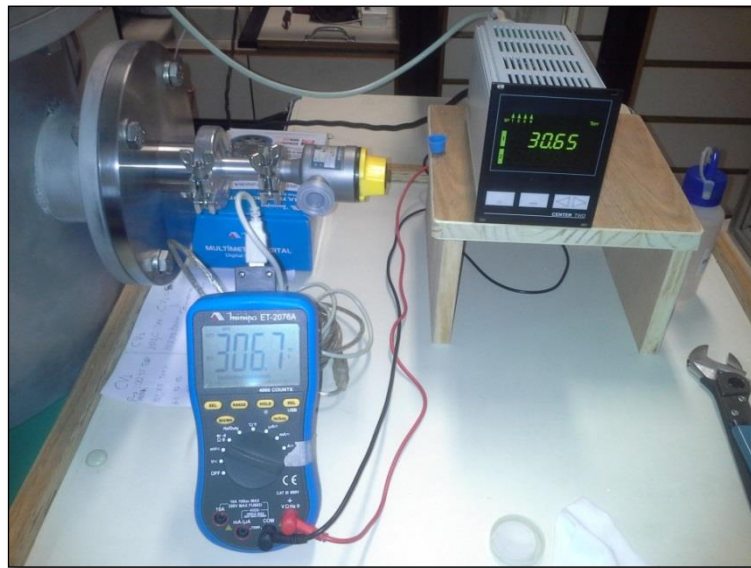


Figura 14 *Multímetro Minipa modelo ET-2076A conectado a unidade controladora dos manômetros de membrana capacitiva CERAVAC.*

Além desse multímetro outro também foi usado da mesma maneira com o medidor BARATRON que é alimentado por uma fonte, conforme ilustra a **Figura 15**.



Figura 15 *Multímetro de bancada da Minipa modelo MDM-8165(em cima da bancada) fonte da Minipa modelo MPC 3003D (em cima da câmara de vácuo)*

3.4 CÂMARAS DE VÁCUO

Os sistemas de vácuo analisados possuem uma ou duas câmaras de vácuo feitas de aço inoxidável. Abaixo, temos uma câmara de (56 ± 1) L e outra de $(48,0 \pm 0,5)$ L, ambas com seus volumes já conhecidos por meio de outros experimentos realizados por outros estudantes no laboratório [7].



Figura 16 *Câmara de vácuo de (56 ± 1) L feita com aço inoxidável.*



Figura 17 *Câmara de vácuo de $(48,0 \pm 0,5)$ L feita com aço inoxidável.*

3.5 BOMBA DE PRÉ-VÁCUO

A bomba de pré-vácuo na figura abaixo foi usada em todos os sistemas de vácuo analisados. Essa bomba trabalha partindo da pressão atmosférica e pode chegar a pressões da ordem de 10^{-2} Torr, dependendo da qualidade dos materiais que compõem o sistema.



Figura 18 Bomba de pré-vácuo Pascal 2010, SD version, 1-phase motor, 180-254 V, 50 Hz/60 Hz com velocidade de bombeamento de $2,92 \text{ l.s}^{-1}$

4 RESULTADOS

4.1 SISTEMA DE VÁCUO 1

4.1.1 Comparação entre manômetros

Os manômetros usados foram os CERA-VAC (**Figura 9**), que antes de iniciar a coleta de dados passaram por um teste comparativo com outro medidor direto, porém sem parte eletrônica que é o *vacustat* (**Figura 11**). Esse teste foi realizado com intuito de trazer

maior confiabilidade nos dados obtidos eletronicamente pelos manômetros de membrana capacitiva e visando isso, bombeou-se o sistema de vácuo até pressões da ordem de 10^{-2} Torr, em seguida foi-se aumentando a pressão, deixando entrar ar na câmara de vácuo, e registrando os valores marcados pelo *vacustat* e pelos dois manômetros de membrana capacitiva (MMC).

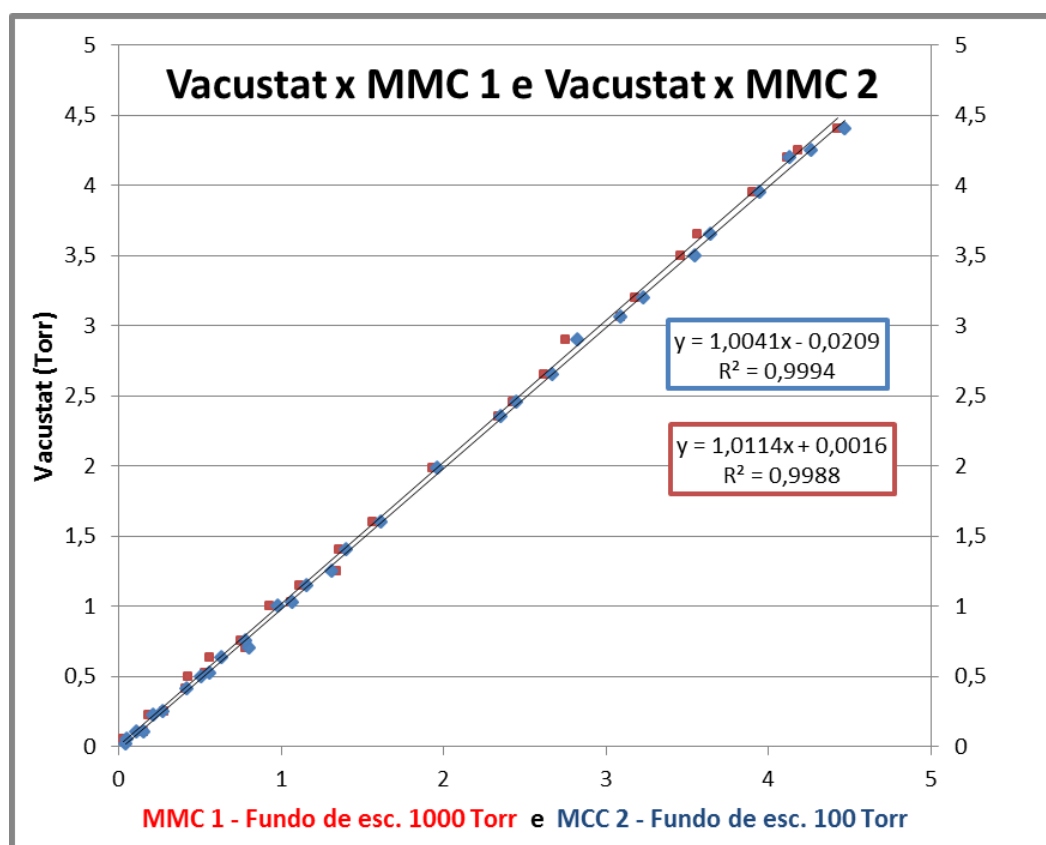


Gráfico 1 Comparação entre o vacustat e os manômetros de membrana capacitiva.

O gráfico acima mostra que os valores dos manômetros são bem próximos, visto que o R^2 possui valor bem próximo nas duas comparações, o que mostra que os manômetros de membrana capacitiva são bem confiáveis.

4.1.2 Resultados obtidos no Mathcad - Sistema de Vácuo 1

Esse primeiro sistema de vácuo a ser analisado (**Figura 19**) é composto por válvulas, uma válvula com acionamento elétrico, *flanges*, manômetros de membrana capacitiva, filtros, uma câmara de vácuo com volume igual $(48 \pm 1)L$, uma bomba de pré-vácuo, um fole metálico de 30 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro e uma bomba mecânica com

velocidade de $2,92 \text{ L.s}^{-1}$. Nesse sistema realizou-se um teste de vazamento em que foi feito vácuo na câmara até atingir a pressão de 4.10^{-2} Torr em seguida a válvula com acionamento elétrico foi acionada, isolando dessa forma a bomba mecânica da câmara de vácuo. Após 1 hora e 52 minutos a pressão registrada foi de $7,95 \times 10^{-1}$ Torr, o que resultou num vazamento de insignificante de $1,12 \times 10^{-4} \text{ Torr.l.s}^{-1}$ considerando a região de trabalho que o sistema opera.

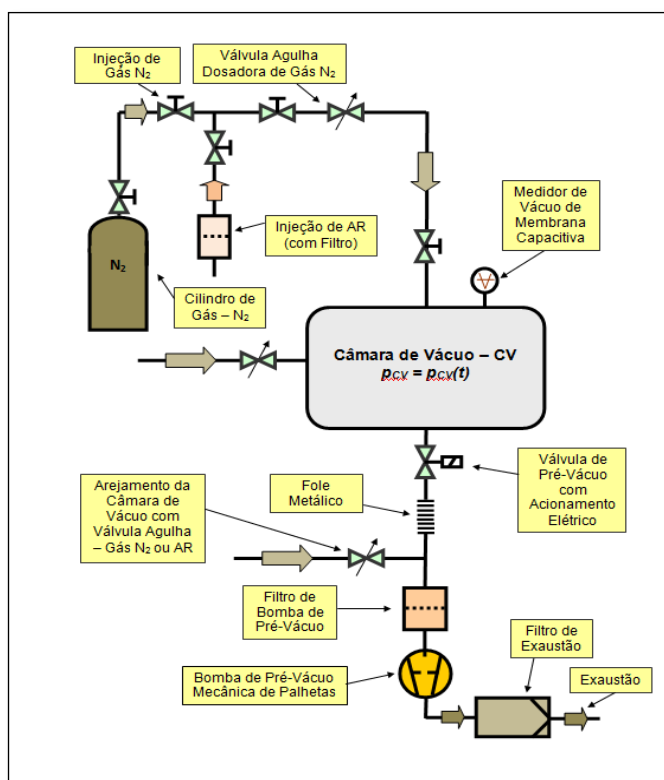


Figura 19 Desenho do sistema de vácuo1.

Na foto do sistema de vácuo abaixo é possível ver melhor os componentes que formam o sistema. Para coletar os dados da pressão no tempo conectou-se a unidade controladora dos manômetros de membrana capacitiva ao multímetro Minipa ET-2076A que transferiu as informações para um computador. Partindo da pressão atmosférica chegou-se a pressões da ordem de 10^{-2} Torr.

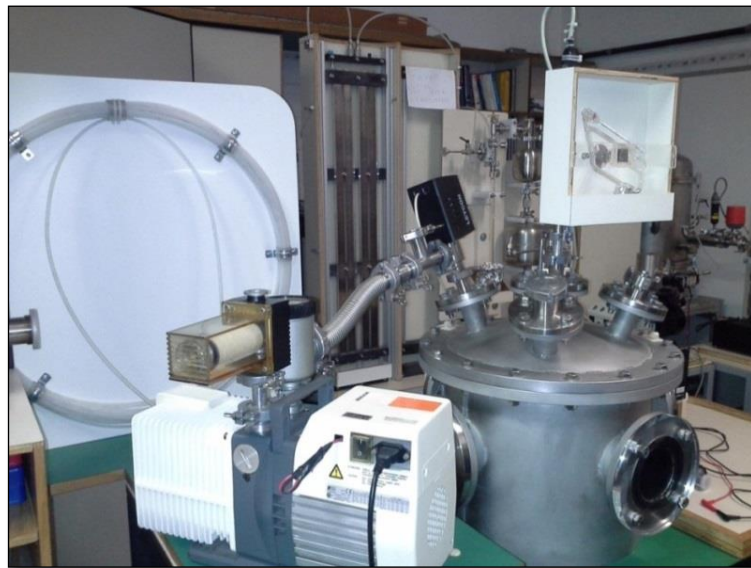


Figura 20 Foto do sistema de vácuo 1

A modelagem desse sistema e dos demais sistemas desse trabalho foi feita utilizando expressões com o auxílio do *Mathcad* que se trata de um *software* muito utilizado para cálculos de expressões das mais simples até as mais complexas. O gráfico abaixo foi obtido por meio de expressões aplicadas nesse *software* (vide anexo A). Analisando as curvas da velocidade de bombeamento da bomba mecânica e a da velocidade efetiva de bombeamento, nota-se que estão sobrepostas, isso significa que a grandeza condutância que se deve ao fole metálico não interfere na velocidade de bombeamento, o que ocorre devido seu alto valor que é mostrado na curva.

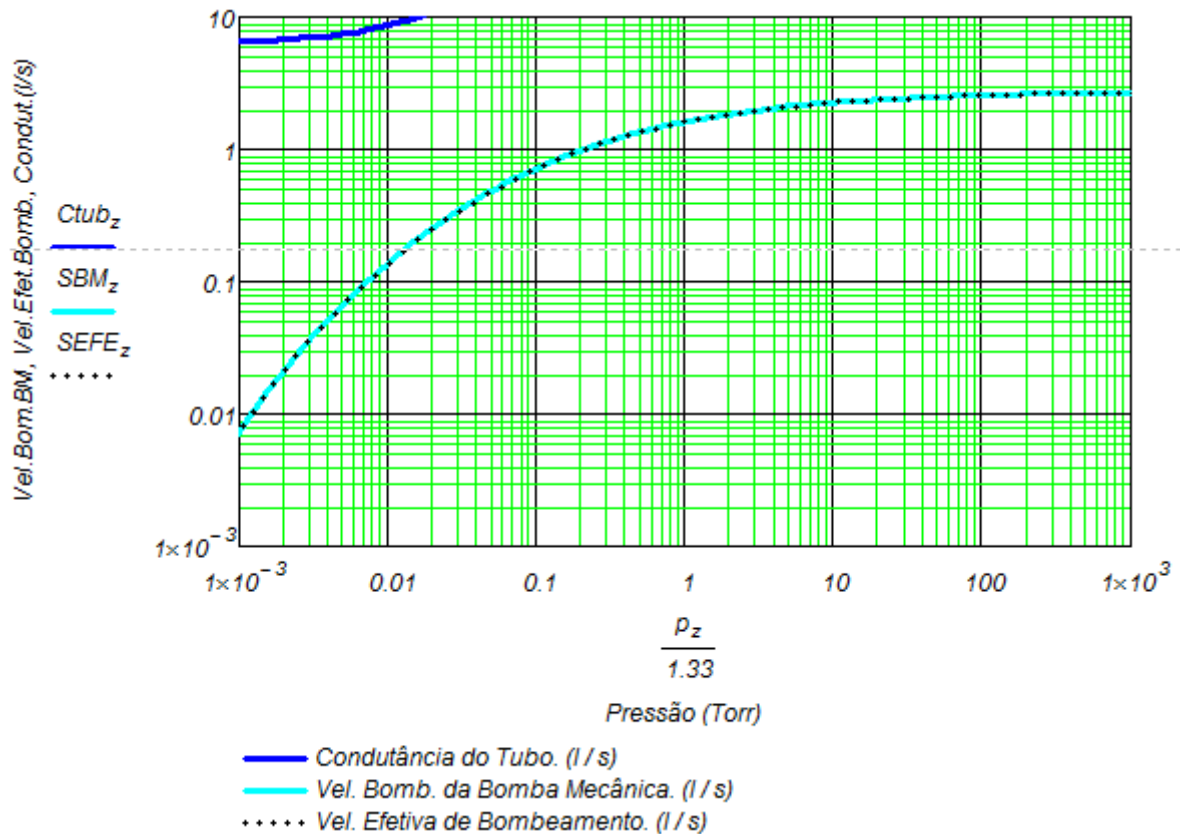


Gráfico 2 Curvas da velocidade de bombeamento da bomba mecânica, velocidade efetiva de bombeamento e da condutância do tubo obtidas no Mathcad para o sistema de vácuo 1.

Analisando o gráfico acima é possível notar que no início do bombeamento, momento em que a pressão no sistema é mais elevada, a velocidade é praticamente constante e começa a cair a partir de 1 Torr.

O **Gráfico 3** mostra as curvas da pressão no tempo para uma bomba ligada diretamente na câmara de vácuo e pelo tubo, confirmando que o valor da condutância, resultante das dimensões do tubo, não interfere na velocidade de bombeamento efetiva. Além disso, o gráfico revela que a pressão no tempo segue uma linearidade no início do bombeamento até a pressão de 1 Torr, região onde a velocidade de bombeamento é praticamente constante.

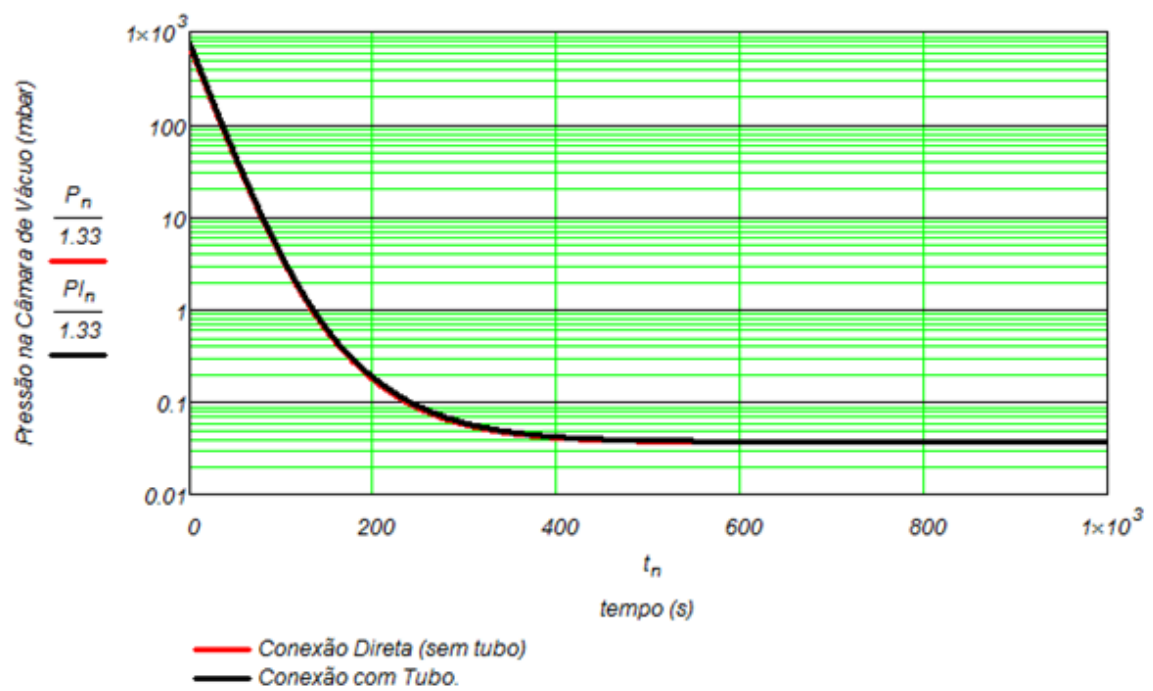


Gráfico 3 Pressão na câmara de vácuo em função do tempo considerando a bomba mecânica conectada diretamente e interligada a câmara pelo tubo.

4.1.3 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 1

Para análise dos dados obtidos nos sistemas de vácuo desse trabalho foi utilizado o *software* de análise gráfica *Origin*. Nesse sistema foram feita três coleta de dados da pressão na câmara de vácuo em função do tempo (vide anexo C), abaixo é mostrado um dos gráficos.

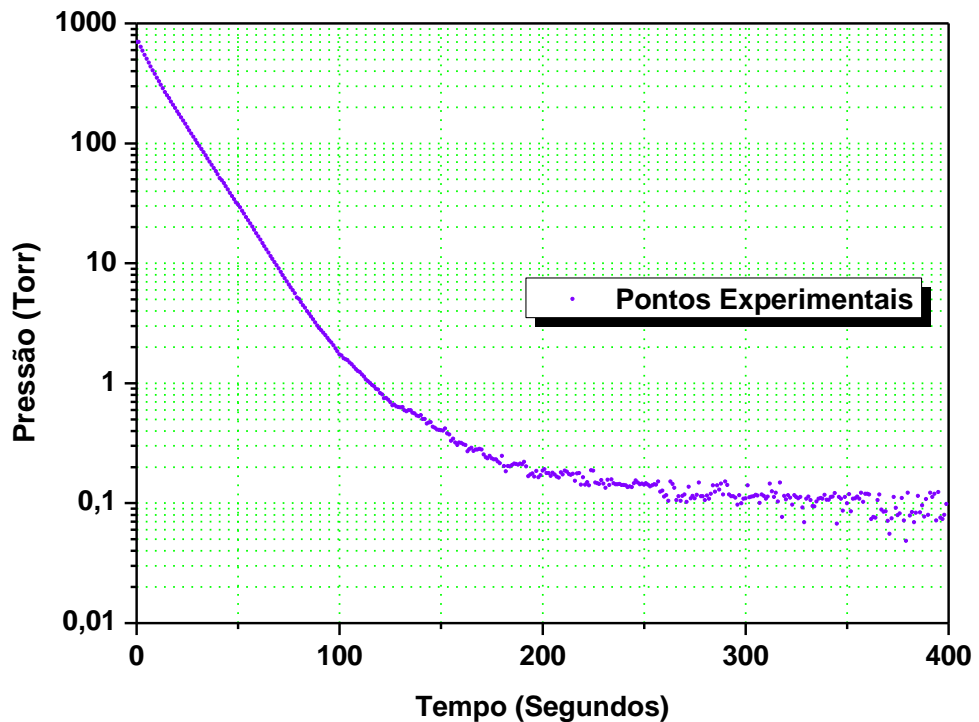


Gráfico 4 Curva experimental dos dados do sistema de vácuo 1.

Comparando o **Gráfico 3**, obtido no *Mathcad*, e o **Gráfico 4**, obtido experimentalmente, são bem próximos, ambos mostram que o sistema atinge pressões da ordem de 10^{-2} Torr e além da comparação de outros pontos aleatório que também são próximos, o que resulta numa maior confiabilidade na modelagem feita no *Mathcad*. Apesar disso, o **Gráfico 4** mostra pontos dispersos para pressões mais baixas que ocorrem devido a resolução do medidor. O *Mathcad* permite gerar uma tabela com os dados da pressão e do tempo, os dados dessa tabela foram importados para o *Origin*, e num mesmo gráfico foram colocadas a curva com os dados experimentais e a curva com os dados obtidos no *Mathcad*.

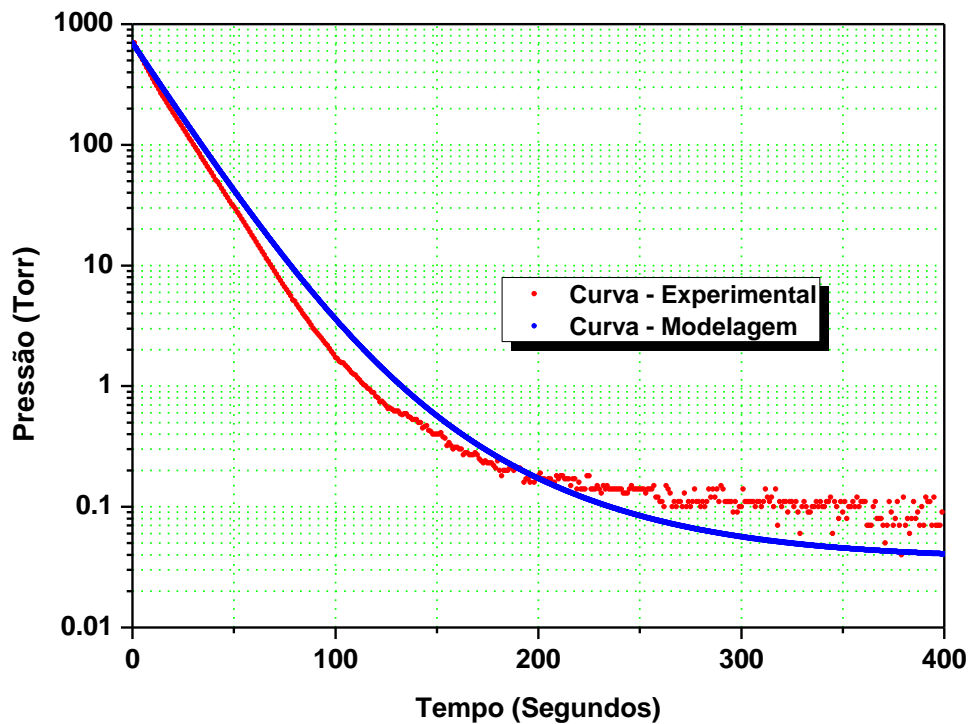


Gráfico 5 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo I.

O gráfico acima mostra que há certa diferença entre a curva experimental e a obtida na modelagem, isso porque na modelagem foi utilizado um *throughput* final arbitrário de 0,015 Torr.L/s. Como no gráfico da modelagem a pressão no tempo de 400 segundos é menor que na experimental para o mesmo tempo significa que o *throughput* real é maior, sendo assim ajustou-se o *throughput* até a pressão no tempo de 400 segundos chegar a 0,01 Torr. Então, a partir do modelo foi possível obter o *throughput* final de 0,06 Torr.L/s que diminui a diferença entre as curvas, como mostrado no gráfico abaixo.

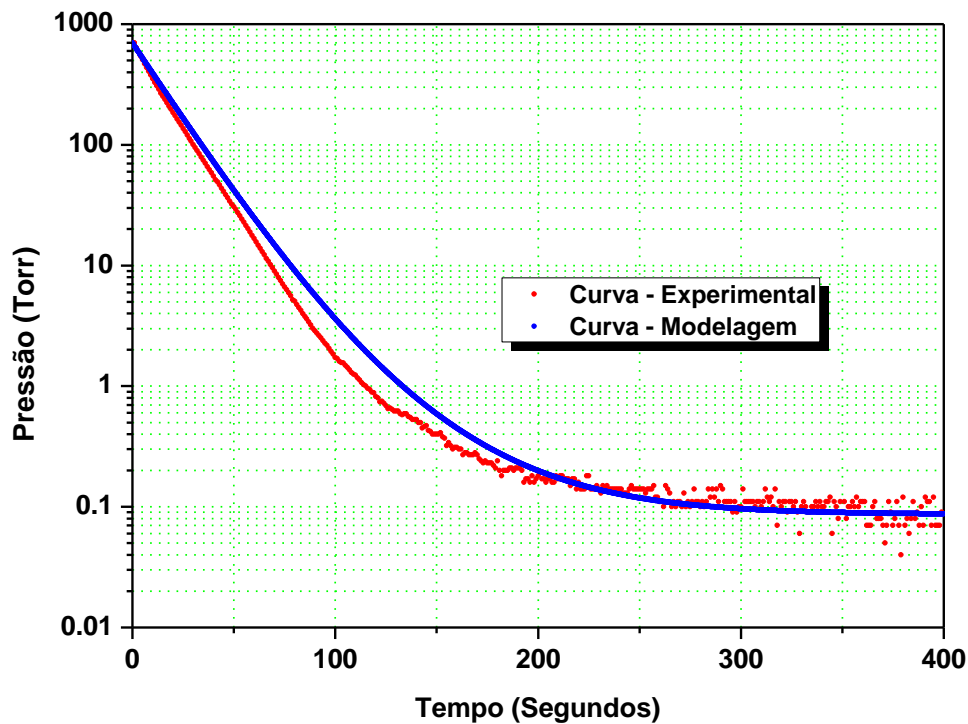


Gráfico 6 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo I com o throughput ajustado.

A partir do **Gráfico 4** é possível obter a velocidade de bombeamento da bomba mecânica. Como mostrado na Equação 34, a pressão em função do tempo segue uma exponencial e como a velocidade de bombeamento efetiva é igual a da bomba mecânica por meio dessa curva consegue-se obter a sua velocidade. No **Gráfico 7** foi feito um ajuste para uma exponencial no trecho que a velocidade da bomba é quase constante, trecho linear que vai até a pressão de 3,02 torr.

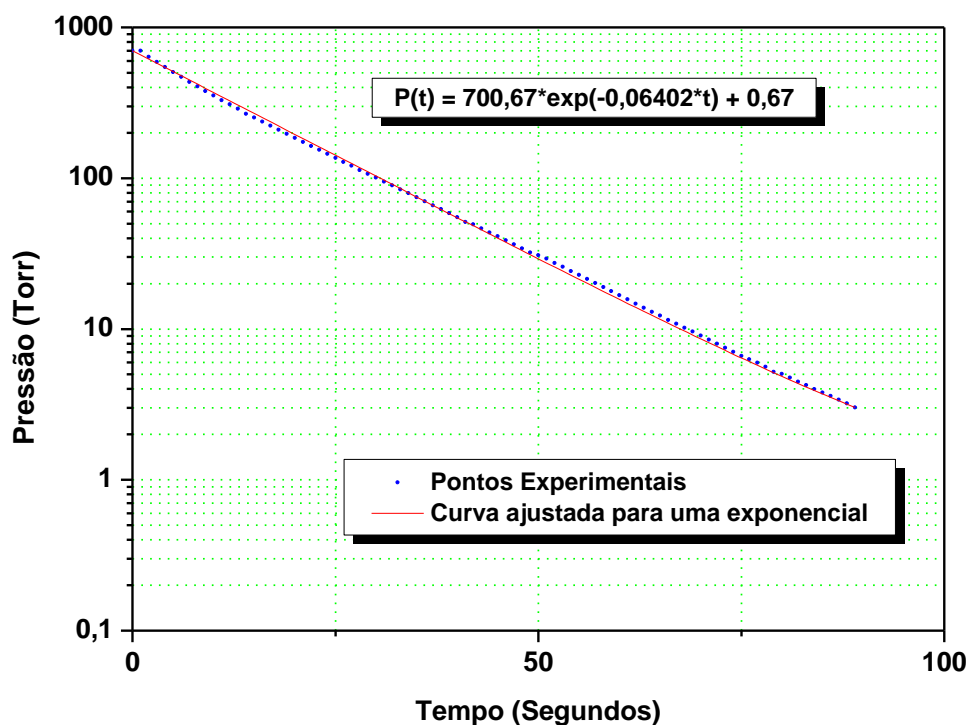


Gráfico 7 Curva experimental ajustada por uma exponencial.

Com os três gráficos experimentais obteve-se três valores, por meio da Equação 35, dos quais se obteve uma média e o desvio padrão. A tabela abaixo mostra os valores.

| Variáveis\Experimentos | Exp. 1 | Exp. 2 | Exp. 3 |
|--|-------------|--------|--------|
| t (s) | 89 | 84 | 86 |
| p ₀ (Torr) | 701,35 | 695,17 | 698,6 |
| p _{cv} | 3,02 | 5,05 | 4,99 |
| S _B (L.s ⁻¹) | 2,94 | 2,82 | 2,76 |
| S _{Bmédio} (L.s ⁻¹) | (2,84±0,09) | | |

Tabela 3 Resultados para a velocidade de bombeamento.

A velocidade teórica para bomba mecânica é de 2,92 l.s⁻¹. A empresa fabricante da bomba mecânica, a Pfeiffer, dispõe em seu catálogo de um gráfico com duas curvas da pressão pelo tempo numa câmara de vácuo de 500 litros.

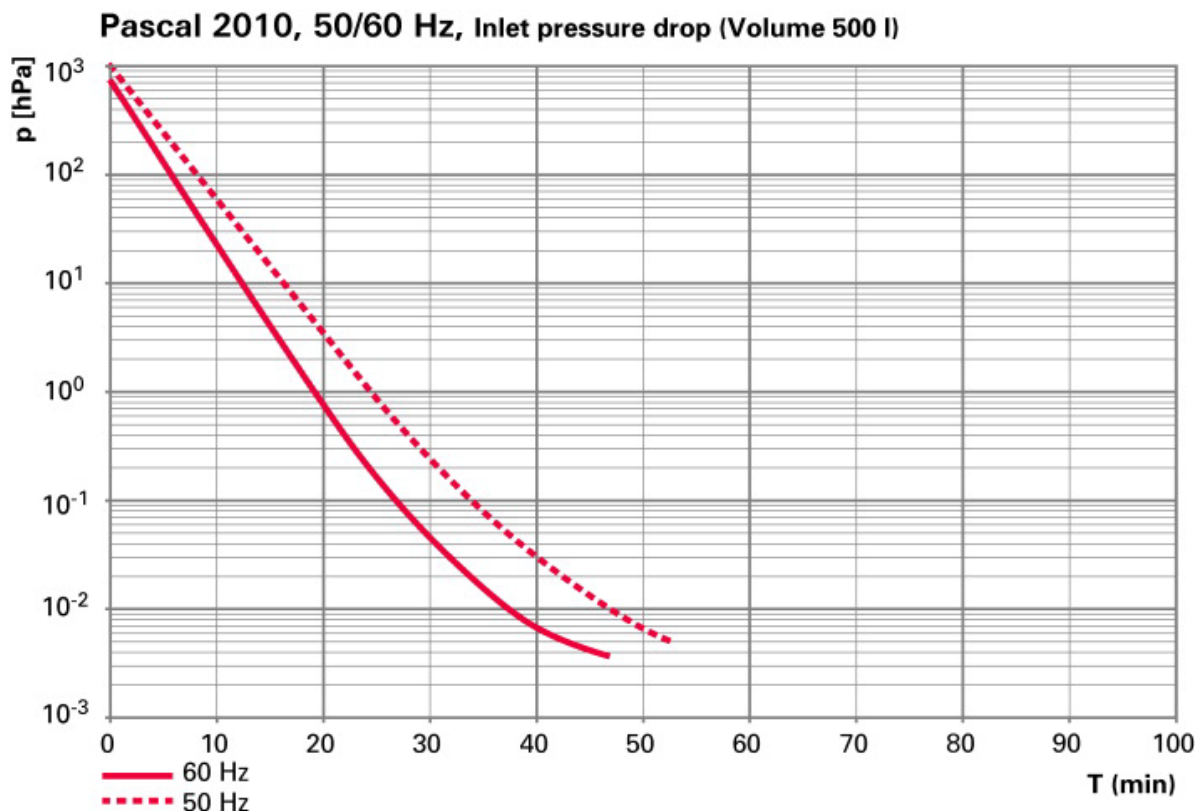


Gráfico 8 *Curvas da pressão pelo tempo obtidas no catálogo da Pfeiffer.*

O **Gráfico 8** mostra que para um país que o fornecimento de tensão alternada é na frequência de 60 Hz a pressão cai mais rapidamente, ou seja, a velocidade da bomba é maior para esta frequência se comparada a um fornecimento de tensão na frequência de 50 Hz. Utilizando essa curva foi calculada a velocidade de bombeamento da bomba mecânica por meio da Equação 35 considerando a frequência de 60 Hz. O resultado obtido foi de $(2,95 \pm 0,05) \text{ l.s}^{-1}$. Esse erro foi obtido considerando a espessura da curva, ou seja, obtiveram-se dois valores para velocidade da bomba mecânica dos quais foi tirada a média. Comparando valor da velocidade de bombeamento da bomba mecânica obtido nesse trabalho com os do **Gráfico 8** o erro percentual é de 3,73 %.

4.2 SISTEMA DE VÁCUO 2

4.2.1 Resultados obtidos no Mathcad – Sistema de Vácuo 2

Esse sistema de vácuo possui os mesmos componentes utilizados no sistema de vácuo 1, a diferença está nas dimensões do tubo que interliga a bomba mecânica a câmara de

vácuo. Trata-se do tubo da **Figura 12** que também pode ser visto na foto do sistema de vácuo abaixo, cujo teste de vazamento também realizado teve resultado de $4,74 \cdot 10^{-5}$ Torr.L.s⁻¹.



Figura 21 Foto do sistema de vácuo 2.

Como o tubo que interliga a bomba mecânica é muito comprido e com diâmetro reduzido a velocidade de bombeamento será bem menor que no sistema de vácuo 1, conseqüentemente a pressão no tempo decaí mais lentamente.

Na modelagem feita no *Mathcad* obteve-se o gráfico abaixo, os detalhes de toda modelagem feita para esse sistema se encontram no anexo A.

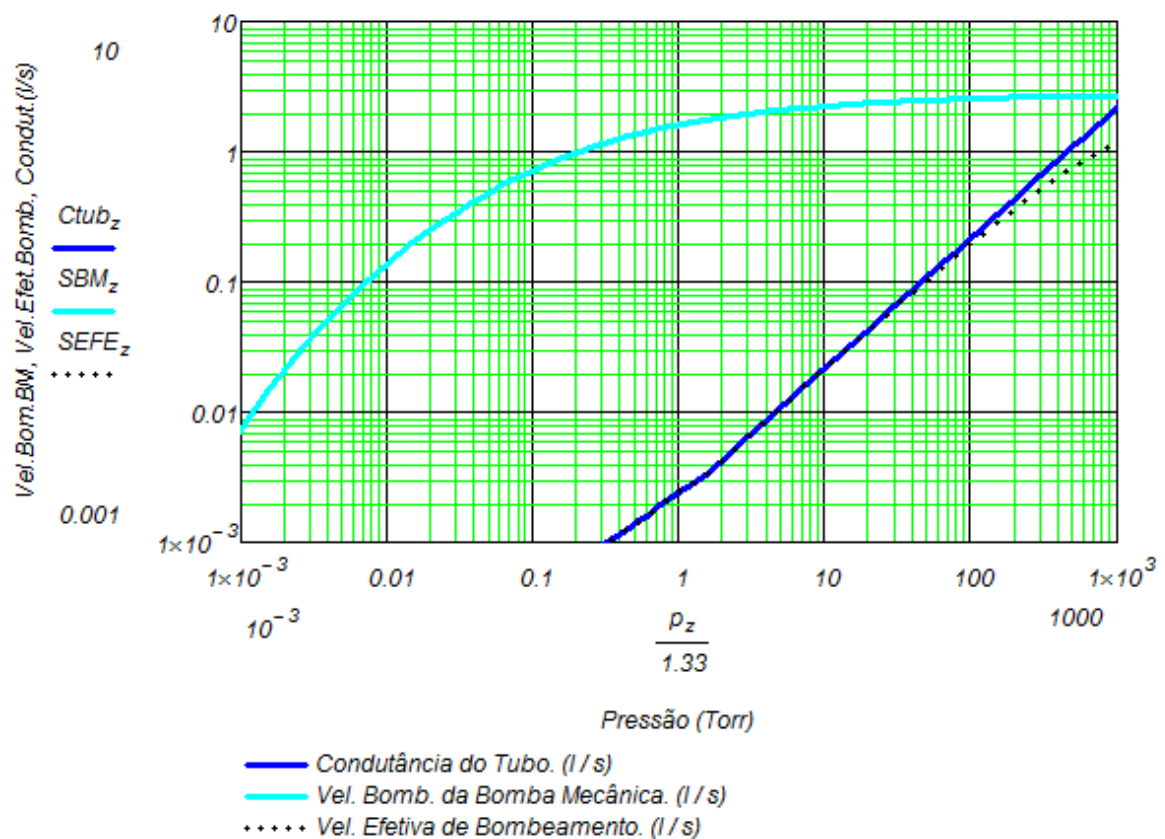


Gráfico 9 Curvas da velocidade de bombeamento da bomba mecânica, velocidade efetiva de bombeamento e da condutância do tubo obtidas no Mathcad para o sistema de vácuo 2.

O gráfico mostra que a velocidade de bombeamento efetiva fica limitada pelo valor da condutância do tubo, bem diferente da curva da velocidade de bombeamento do sistema de vácuo 1 em que o valor da condutância é grande e não interfere na velocidade de bombeamento efetiva que é igual a da bomba.

Como se pode observar no **Gráfico 10** o tempo de bombeamento foi bem maior que no sistema de vácuo 1 considerando um mesmo valor de pressão no tempo, além disso para este sistema a pressão mínima atingida foi de 3 Torr.

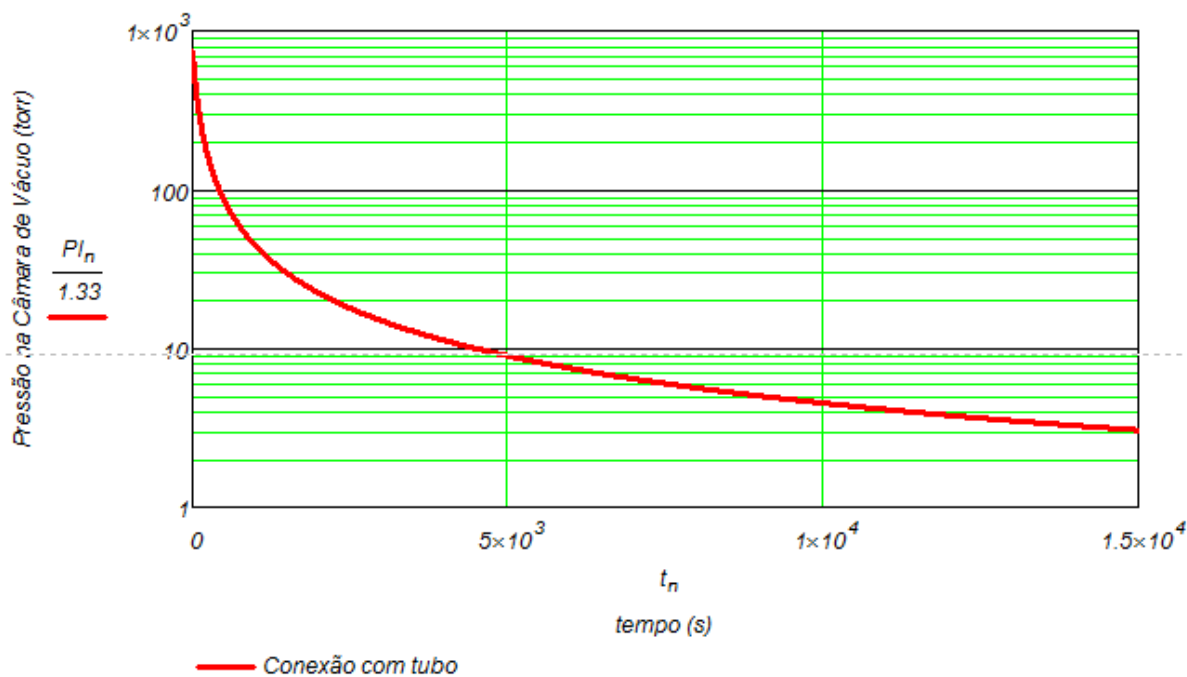


Gráfico 10 Curva da pressão pelo tempo no sistema de vácuo 2.

4.2.2 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 2

Os dados obtidos desse sistema foram coletados eletronicamente pelos manômetros de membrana capacitiva e exportados para o computador, assim como no sistema de vácuo 1. Como resultado dos dados obtidos, temos o gráfico abaixo também feito no *Origin*.

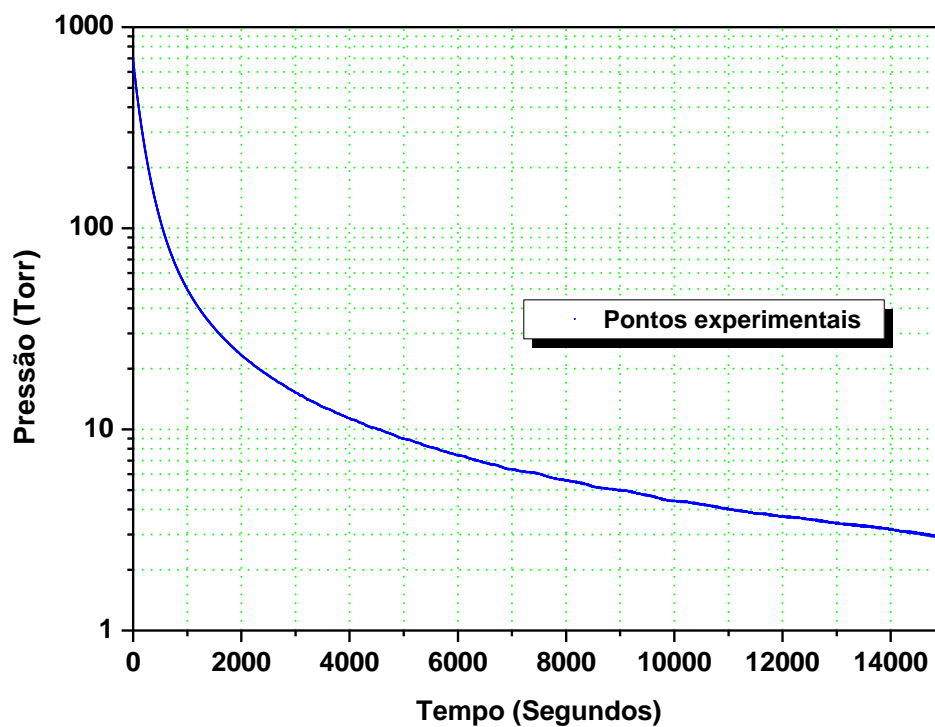


Gráfico 11 Curva experimental do sistema de vácuo 2.

Comparando os gráficos obtidos no *Mathcad* e no *Origin* nota-se que os resultados foram muito próximos e que realmente as dimensões dos tubos nos sistemas de possuem certa relevância. Colocando a curva dos dados experimentais num mesmo gráfico que a curva dos dados da modelagem, obteve-s o gráfico abaixo.

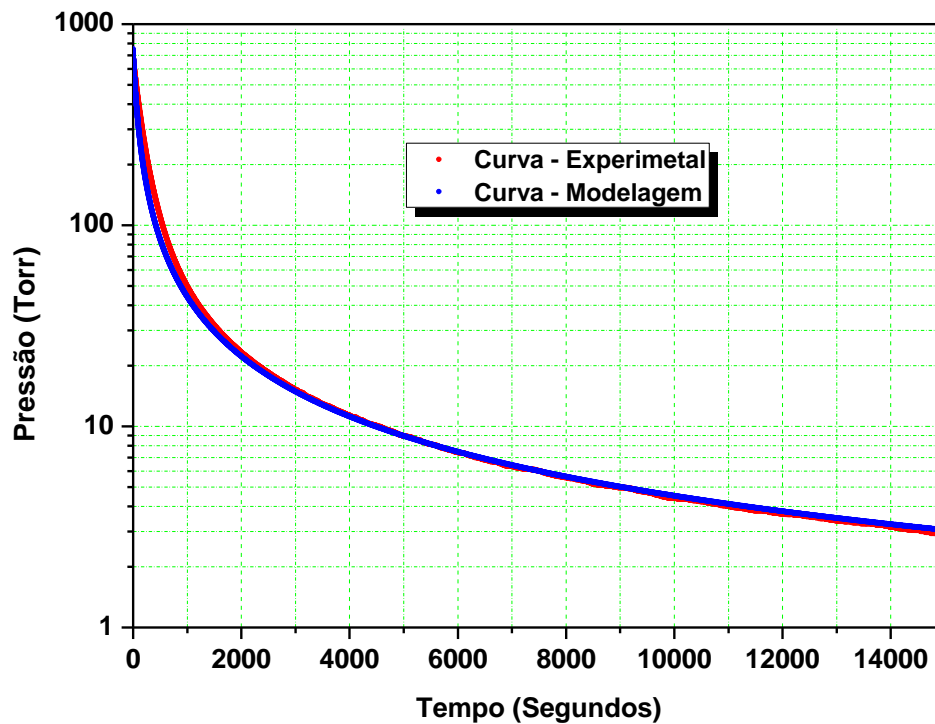


Gráfico 12 Comparação da curva experimental com a obtida na modelagem no Mathcad para o sistema de vácuo 2.

Com o **Gráfico 12** fica mais fácil de comparar a curva experimental e a obtida na modelagem que como se pode ver são muito próximas.

O gráfico da curva experimental pode ser ajustado para um polinômio como mostrado abaixo.

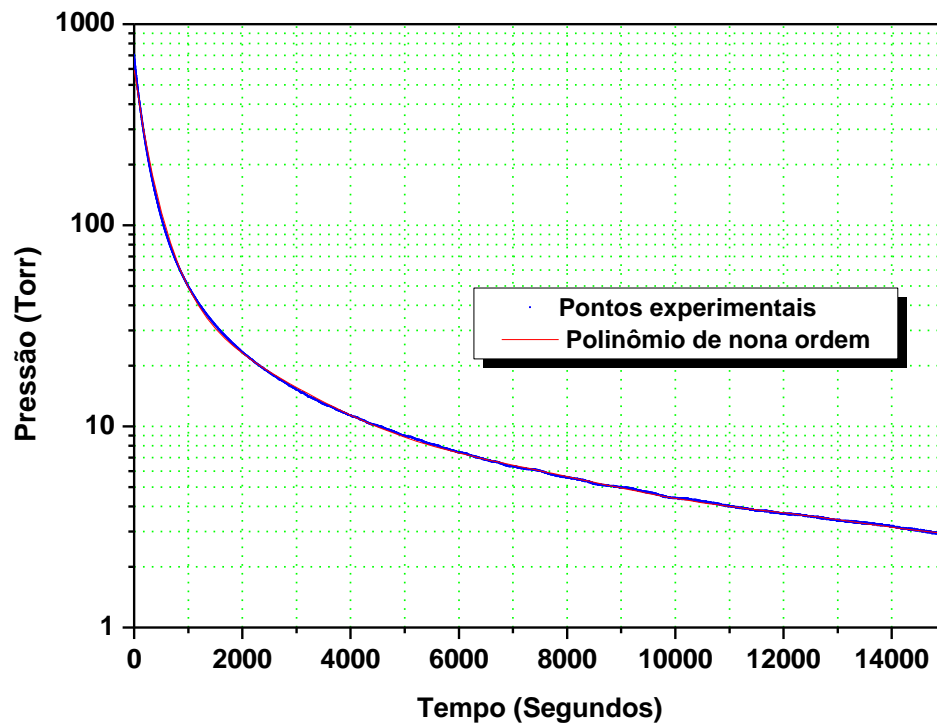


Gráfico 13 Curva experimental ajustada para um polinômio de nona ordem.

O *Origin* permite ajustar uma curva para um polinômio no máximo até a nona ordem que foi o feito para a curva experimental que, como se pode perceber, foi perfeitamente ajustada.

| | | | |
|-------------------------|---|--------------|----------------|
| Equation | $y = \text{Intercept} + B1*x^1 + B2*x^2 + B3*x^3 + B4*x^4 + B5*x^5 + B6*x^6 + B7*x^7 + B8*x^8 + B9*x^9$ | | |
| Weight | No Weighting | | |
| Residual Sum of Squares | 1,74129 | | |
| Adj. R-Square | 0,99947 | | |
| | | Value | Standard Error |
| ?SOP:A=1 | Intercept | 2,77157 | 7,90228E-4 |
| ?SOP:A=1 | B1 | -0,00189 | 2,70914E-6 |
| ?SOP:A=1 | B2 | 1,15068E-8 | 3,02058E-9 |
| ?SOP:A=1 | B3 | -4,25977E-10 | 1,5479E-12 |
| ?SOP:A=1 | B4 | 9,57041E-14 | 4,29757E-16 |
| ?SOP:A=1 | B5 | -1,33881E-17 | 6,99275E-20 |
| ?SOP:A=1 | B6 | 1,17145E-21 | 6,85678E-24 |
| ?SOP:A=1 | B7 | -6,22774E-26 | 3,98368E-28 |
| ?SOP:A=1 | B8 | 1,83839E-30 | 1,26207E-32 |
| ?SOP:A=1 | B9 | -2,3103E-35 | 1,67903E-37 |

Tabela 4 Ajuste polinomial.

A tabela acima foi gerada pelo *software* em que é mostrada a função polinomial ajustada para curva obtida com os dados experimentais. Derivando a curva da pressão em função do tempo se obtém o *throughput* em função do tempo, se tratando de um polinômio fica mais fácil de calcular essa derivada, mas não é o objetivo desse trabalho.

4.3 SISTEMA DE VÁCUO 3

4.3.1 Resultados obtidos no Mathcad – Sistema de Vácuo 3

Esse sistema de vácuo é composto por duas câmaras de vácuo, sendo uma com volume de (56 ± 1) L e a outra $(48,0 \pm 0,5)$ L, respectivamente **Figuras 16 e 17**. Essas duas câmaras foram interligadas por um tubo com 0,435 cm de diâmetro e 328 cm de comprimento feito do mesmo material que o tubo da **Figura 12**. O teste de vazamento foi realizado do mesmo modo que nos sistemas de vácuo 1 e 2 a diferença é que foram utilizados dois manômetros de membrana capacitiva um na câmara de vácuo 1 e o outro na câmara de vácuo 2. O sistema foi bombeado até as duas câmaras registrarem pressões próximas a 100 Torr, feito isso a bomba mecânica foi desligada e registraram-se as pressões nas câmaras de vácuo, 100,97 Torr na câmara de vácuo 1 e 101 Torr na câmara de vácuo 2. Depois de 18 horas e 25 minutos anotou-se novamente os valores das pressões nas câmaras

de vácuo 1 e 2, respectivamente 101,78 Torr e 102 Torr. Tendo esses valores calculou-se o *throughput* na câmara de vácuo 1 e 2, respectivamente $1,22 \cdot 10^{-5}$ Torr.L/s e $1,51 \cdot 10^{-5}$ Torr.L/s. Abaixo temos o desenho esquemático do sistema de vácuo.

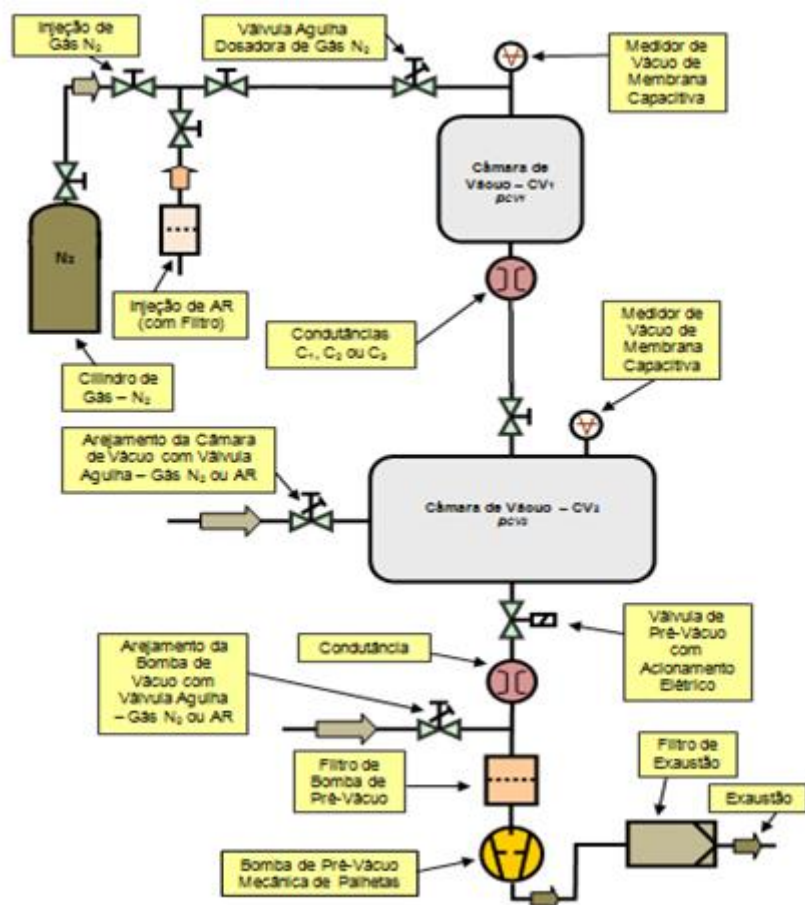


Figura 22 Desenho esquemático do sistema de vácuo 3.

Para a coleta dos dados da pressão foram utilizados os medidores de membrana capacitiva Ceravac (**Figura 9**) e Baratron (**Figura 10**), sendo que o primeiro medidor foi colocado na câmara de vácuo 2 e o segundo a câmara de vácuo 1. Os dados obtidos pelo manômetro colocado na câmara de vácuo 2 foram passados para o multímetro de mão (**Figura 14**) que por sua vez os exportou para um computador enquanto os dados da câmara de vácuo eram coletados por outro sistema de aquisição eletrônica composto por um multímetro de bancada e uma fonte de alimentação (**Figura 15**). Os demais componentes utilizados foram os mesmos dos outros dois sistemas já apresentados. Abaixo temos as fotos

do sistema montado. Como as câmaras estão distantes uma das outra as fotos foram tiradas separadamente.



Figura 23 Foto da câmara de vácuo 1 e dos componentes para aquisição eletrônica dos dados de pressão e tempo do sistema de vácuo 3.



Figura 24 Foto da câmara de vácuo 2 e dos componentes para aquisição eletrônica dos dados de pressão e tempo do sistema de vácuo 3

Entre a bomba mecânica e o fole metálico conectado na câmara de vácuo 2 há um tubo de 0,08 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento. O intuito de utilizar esse tubo é diminuir a velocidade de bombeamento para que não ocorra o efeito de blocagem [7] [8]. Sem esse tubo a velocidade de bombeamento seria alta e a pressão na câmara de vácuo 2 cairia mais rapidamente que na câmara de vácuo 1. Com a razão das pressões entre a segunda câmara sendo maior que dois, acarretaria no efeito de blocagem, no qual o *throughput* se mantém constante no tempo invalidando as equações utilizadas na modelagem desse sistema.

Com essas dimensões foi possível estimar o valor da velocidade de bombeamento efetiva para câmara de vácuo 2 que nesse caso foi um valor constante de $0,03 \text{ l.s}^{-1}$, mais detalhes estão no anexo B. Como se pode ver pelo gráfico abaixo a pressão nas câmaras de vácuo cai igualmente no decorrer do tempo.

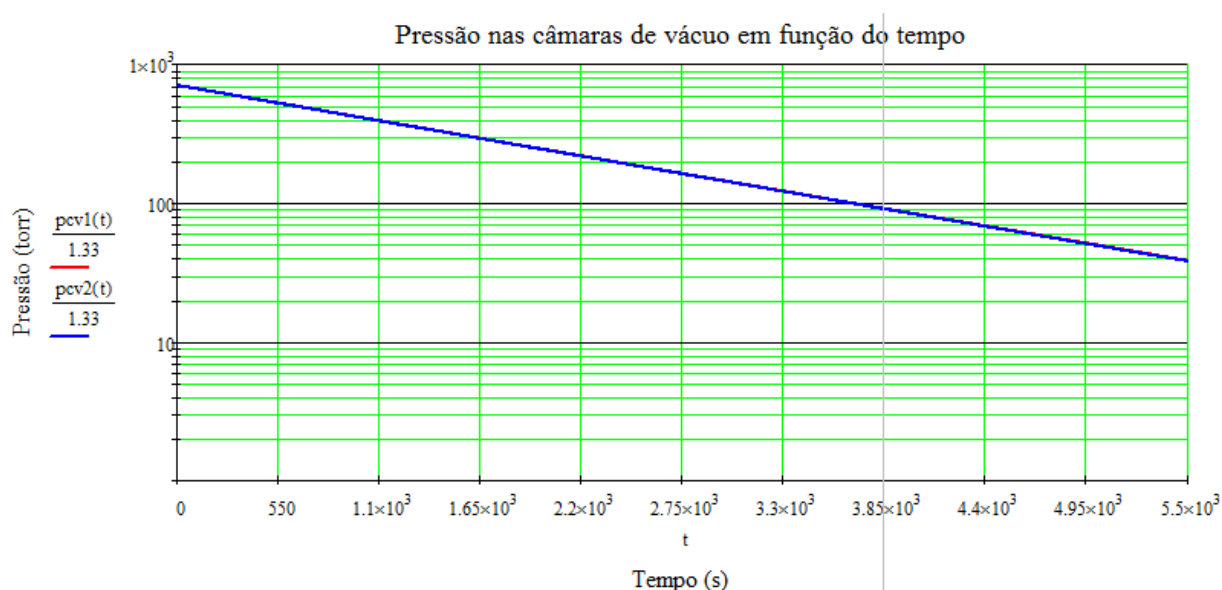


Gráfico 14 Curvas das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 no sistema de vácuo 3.

As curvas das pressões nas câmaras de vácuo caem igualmente, devido a velocidade de bombeamento efetiva ser pequena, caso essa velocidade de bombeamento fosse mais alta que o valor da condutância do tubo que interliga as câmaras de vácuo a pressão na câmara de vácuo 2 seria menor que a da câmara de vácuo 1 após iniciado o processo de

bombeamento, dessa maneira as curvas não estariam sobrepostas como mostradas no gráfico.

4.3.2 Resultados Experimentais – Sistema de Vácuo 3

O *software* utilizado em um dos computadores para coletar os dados do multímetro de bancada (**Figura 15**) permite ajustar o passo para que obtenha um dado de pressão, por padrão, sempre é deixada uma coleta a cada segundo, no *software* utilizado com o multímetro de mão (**Figura 14**) não há como ajustar o passo, desse modo pegou-se o tempo total do experimento e dividiu esse valor pelo número total de pontos coletados para achar de quanto em quanto tempo é coletado um dado.

Foram realizadas duas medidas nesse sistema e pequenos problemas foram registrados após a análise dos dados coletados. No sistema de aquisição da câmara de vácuo 1, em determinado tempo os dados pararam de ser coletados, isso gerou um espaço no gráfico e por conta disso foram considerados os dados até o momento em que houve essa parada, a qual não se sabe o motivo. No sistema de aquisição da câmara de vácuo 2, composto pelo multímetro de mão, houveram cerca de oito pontos que ficaram dispersos e que com certeza tratava-se de flutuações. Desses oito valores dispersos, alguns apresentavam até valores negativos tensão, o que no caso não faz sentido físico algum, pois com a relação da tensão com pressão determinada, acarretaria também num valor negativo da pressão. Tais dados, por serem inconsistentes ou não fazerem sentido físico nenhum foram retirados na apresentação das curvas da pressão pelo tempo.

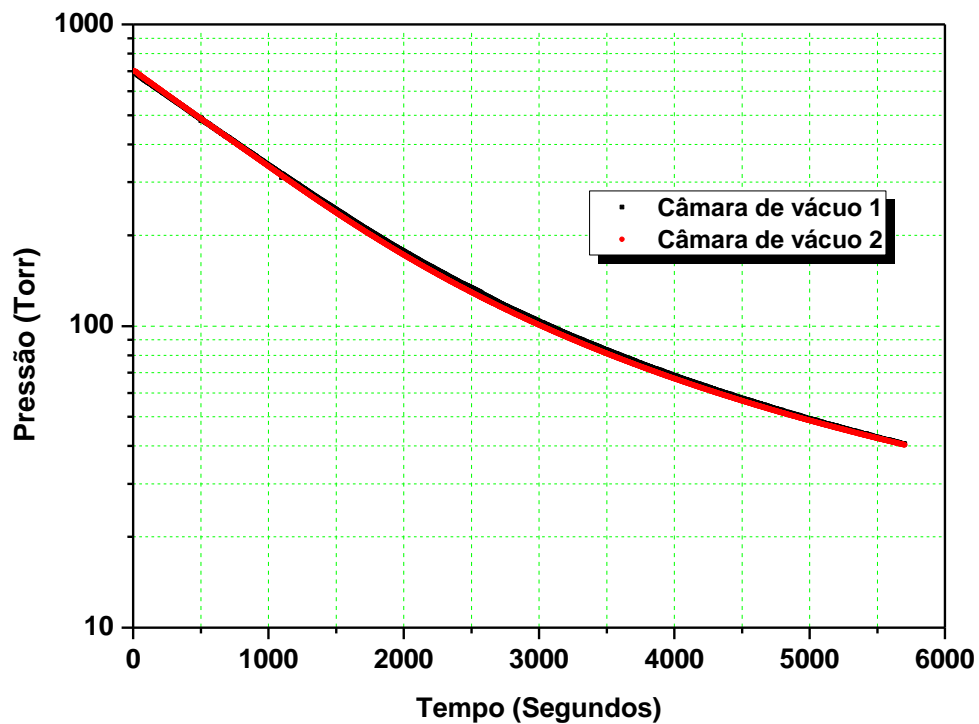


Gráfico 15 *Curvas com dados experimentais das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 do primeiro experimento do sistema de vácuo 3.*

O gráfico com as curvas experimentais mostram que como esperado pelos resultados apresentados na modelagem, as pressões nas câmaras de vácuo caem igualmente no tempo. Abaixo temos o gráfico referente a segunda coleta de dados.

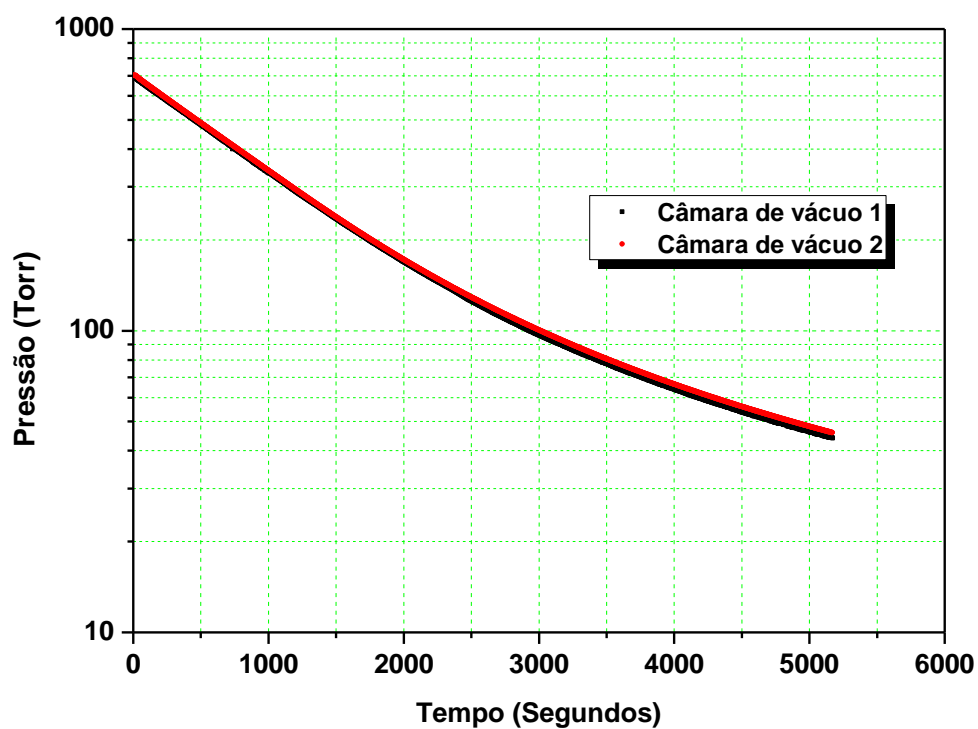


Gráfico 16 *Curvas com dados experimentais das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2 do segundo experimento do sistema de vácuo 3.*

O segundo gráfico confirma os resultados obtidos no primeiro experimento e na modelagem. Abaixo é mostrado o gráfico com os resultados obtidos na modelagem e no primeiro experimento.

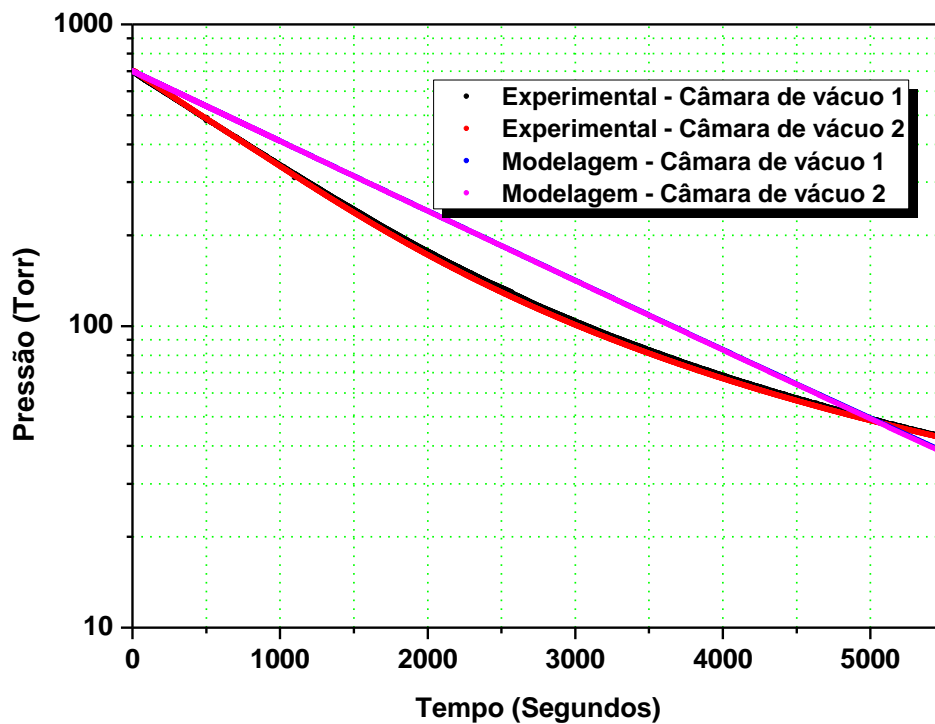


Gráfico 17 Curvas experimentais e modeladas das pressões pelo tempo nas câmaras de vácuo 1 e 2.

Tanto as curvas experimentais quanto as modeladas no *Mathcad* mostram que o decaimento da pressão no tempo é igual nas câmaras de vácuo 1 e 2, porém fica claro que na modelagem as duas curvas estão mais lineares. Apesar da diferença das curvas experimentais e modeladas, os resultados foram satisfatórios, uma vez que se tratando de um modelo não houve uma diferença discrepante entre os resultados.

5 CONCLUSÃO

Os sistemas de vácuo utilizados na indústria operam em sua maioria na região que conhecemos por pré-vácuo, cerca de 80% das aplicações. O intuito da análise dos sistemas de vácuo desse trabalho é de obter um modelo que represente o que foi observado nos dados experimentais. No sistema de vácuo 1 a pressão mínima atingida foi da ordem de 10^{-2} Torr, sendo que a curva obtida com os dados experimentais teve o mesmo comportamento da modelada. Como nesse sistema de vácuo a câmara e a bomba mecânica foram interligadas por um tubo cujo valor da condutância é maior que a velocidade de bombeamento da bomba mecânica, a velocidade de bombeamento efetiva é a mesma que a da bomba mecânica, isto é, o tubo não interferiu no bombeamento do sistema de vácuo sendo este equivale a outro em que a bomba mecânica fosse conectada diretamente na câmara de vácuo.

O *throughput* resultante de um sistema de vácuo se deve a vários fatores tais como: vazamento, permeabilidade do material de que é feito a parede da câmara de vácuo e de todo o sistema, desgaseificação das paredes do sistema e pressão de vapor dos materiais. Esses fatores são muito difíceis de serem obtidos, visto as variáveis a serem considerada como a temperatura o tipo e quantidade de materiais, etc. Sabendo disso, nos sistemas 1 e 2 foram adotados valores de *throughput* arbitrários, como é mostrado no anexo A.

Quando um sistema de vácuo não possui tubo que interligue a bomba ao meio que será bombeado, há um melhor aproveitamento da velocidade de bombeamento da bomba do sistema de vácuo, entretanto é muito provável que seja necessário fazer essa conexão que é o que ocorre nas indústrias, sendo geralmente os tubos conectados em série. Com o uso de um tubo com condutância de valor mais alto que a velocidade de bombeamento, a velocidade de bombeamento efetiva é a mesma da bomba mecânica utilizada que foi o caso para o sistema de vácuo 1 e por meio das informações retiradas dos gráficos experimentais obteve-se a velocidade da bomba mecânica que foi comparada o valor obtido pelo gráfico da fabricante da bomba mecânica.

Com um tubo de valor de condutância pequeno o sistema de vácuo fica com a velocidade de bombeamento limitada, o que implica num maior tempo para atingir as mesmas pressões de um sistema de maior condutância que foi o caso sistema de vácuo 2, em que o tubo utilizada é muito comprido e possui diâmetro reduzido. Além disso, a pressão final atingida por esse sistema de vácuo foi bem menor a do primeiro sistema tratado.

Pequenos problemas enfrentados na aquisição dos dados experimentais, como foi explicado, não interferiram na análise dos resultados do sistema de vácuo 3. Para esse sistema colocou-se um tubo com dimensões reduzidas entre o fole metálico e a bomba mecânica com o objetivo de diminuir a velocidade de bombeamento para que não ocorresse o efeito de bloqueio, pois a modelagem com as expressões utilizadas nesse trabalho não estariam corretas. Com esse tubo a velocidade de bombeamento ficou reduzida e como as pressões nas câmaras de vácuo caíram igualmente no decorrer do tempo, a condutância do tubo que interliga as câmaras é maior que a do tubo com 0,08 mm de diâmetro. O valor da condutância obtido para esse tubo foi um valor aproximado, visto que o cálculo é válido para um capilar. Desse modo, foi feito o ajuste para velocidade de bombeamento efetiva na modelagem para que as curvas da câmara de vácuo 1 e 2 ficassem iguais.

A modelagem dos sistemas de vácuo desse trabalho representaram bem as curvas dos dados experimentais, mas é claro que se tratando de um modelo algumas modelagens ficaram mais próximas da experimental do que a outra, o que não significa que as demais ficaram ruins uma vez que para os três sistemas o comportamento das curvas foi muito semelhante aos obtidos na modelagem. Em suma, a modelagem dos três sistemas de vácuo se mostraram importantes para o enriquecimento na análise e modelagem de sistemas de vácuo industriais.

6 REFERÊNCIAS

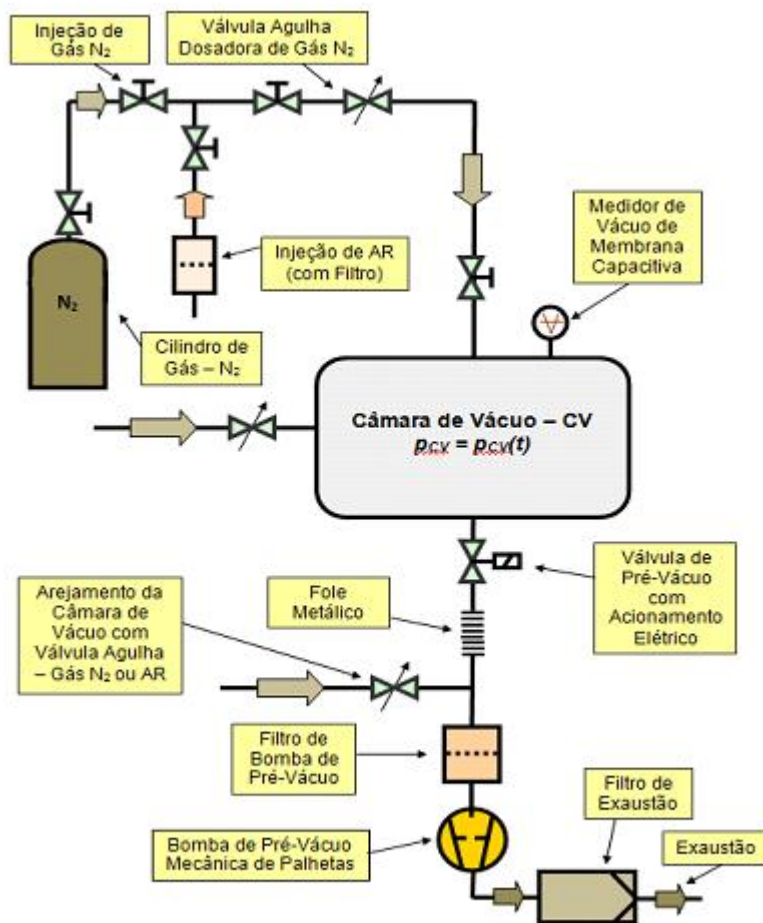
- [1] Degasperi, F. T. – Processo de Bombeamento em Sistemas de Pré-Vácuo Complexos- Texto desenvolvido no LTV, 2012.
- [2] Silva, S. F.; Análise teórico-experimental de condutâncias em Pré-vácuo; Trabalho de Graduação para obtenção de título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos, FATEC – SP, Laboratório de Tecnologia do Vácuo, 2010.
- [3] Sartori, Leandro M.; Medição de Condutâncias no Regime de Escoamento Viscoso-Laminar; Trabalho de Graduação para obtenção de título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos, FATEC – SP, Laboratório de Tecnologia do Vácuo, 2009.
- [4] Moutinho, A. M. C. - Tecnologia de vácuo – Universidade Nova de Lisboa.
- [5] R. Resnick, D. Halliday ; Fundamentos de Física, vol. 2, 7ª ed., Rio de Janeiro, 2006.
- [6] Jousten, Karl; Handbook of Vacuum Technology – WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [7] Venuto, Edelson P.; Modelagem e medição de condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar com gases monoatômicos bloqueados.; Trabalho de Graduação para obtenção de título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos, FATEC – SP, Laboratório de Tecnologia do Vácuo, 2013.
- [8] Degasperi, F. T. - Contribuições para Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo - Tese de Doutorado, Unicamp, 2006.

7 ANEXOS

Anexo A - Sistema de vácuo 1 e 2

Alan R. Cerqueira, Edelson Venuto e
Francisco Tadeu Degasperi.
LTV - DSE - FATEC-SP - CEETEPS
Outubro 2013

- Os sistemas utilizados nesse trabalho operam na região de pré-vácuo, mais especificamente na região de 700 torr a 10^{-2} torr.
- O gás utilizado foi o ar atmosférico a temperatura ambiente, 294 K (21 °C).
- As peças, componentes e conexões foram limpas com detergente e água corrente, após ser feita a secagem realizou-se uma limpeza com álcool isopropílico.
- A bomba de vácuo utilizada no arranjo experimental foi uma bomba mecânica de palhetas de duplo estágio da linha Pascal da marca Alcatel (atual empresa Adixen), modelo 2010SD. A velocidade de bombeamento da bomba mecânica é de 10,5 m³/h, ou ainda, 2,92 l/s.
- Para obter os dados relativos as pressões no sistema foram utilizados os seguintes medidores:
 1. Membrana Capacitiva: Na câmara de vácuo utilizada foram conectados dois medidores de membrana capacitivo modelo Ceravac, fabricados pela Oerlikon-Leybold, sendo um opera na faixa de 1000 torr até 10^{-2} torr e o outro na faixa de 100 torr até 10^{-2} torr.
 2. Vacustat: Esse medidor foi utilizado apenas como comparativo dos resultados obtidos com os medidores de membrana capacitiva, sua faixa de operação vai de 5 torr até 10^{-2} torr.
- A aquisição de dados foi feita eletronicamente, utilizando para isso um multímetro acoplado aos medidores de membrana capacitiva. O multímetro recebe os dados de variação de tensão dos medidores e exporta-os para um computador onde é feita a conversão dos valores de tensão em pressão.
- Abaixo temos o desenho esquemático do sistema de vácuo.



- Para o sistema acima dois casos podem ser estudados um interligando a bomba mecânica a câmara utilizando um fole metálico e o outro um tubo comprido, que foi o realizado nos experimentos. O ideal é que a bomba mecânica seja colocada diretamente na câmara de vácuo, dessa forma a velocidade de bombeamento efetiva é igual a da bomba, ao utilizar tubos para essa conexão a velocidade de bombeamento é menor que a da bomba dependendo do valor da condutância.

Sistema de vácuo utilizando um fole metálico

- O objetivo desse estudo é obter a velocidade de bombeamento efetiva e comparar com a da bomba de vácuo para assim analisarmos o efeito da tubulação que nesse primeiro caso é um fole metálico. Esses resultados também serão comparados com os resultados obtidos experimentalmente, abaixo há uma foto do sistema de vácuo montado no Laboratório de Tecnologia de Vácuo - LTV.



Sistema de Pré-Vácuo Operando da Pressão Atmosférica (700 Torr)
até 0.01 Torr (Sistema de Vácuo de Pequeno Porte).

-Definição da escala das pressões.

$$w := 1..14 \quad c_w := 10^{w-11} \quad z := 1..126 \quad a := 1..9$$

$$\chi := 0,9..117 \quad p_{a+\chi} := a \cdot c_{1+\frac{\chi}{9}}$$

O volume da câmara de vácuo é de 48 litros.

Para o tubo temos:

$V_{cv} := 48$ litros

-comprimento, $l_{tub} := 30$ cm

-diâmetro, $dia := 2.5$ cm

O critério de Knudsen para a determinação do regime de escoamento dos gases e vapores será apresentado abaixo.

$$\lambda_z := \frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{p_z}$$

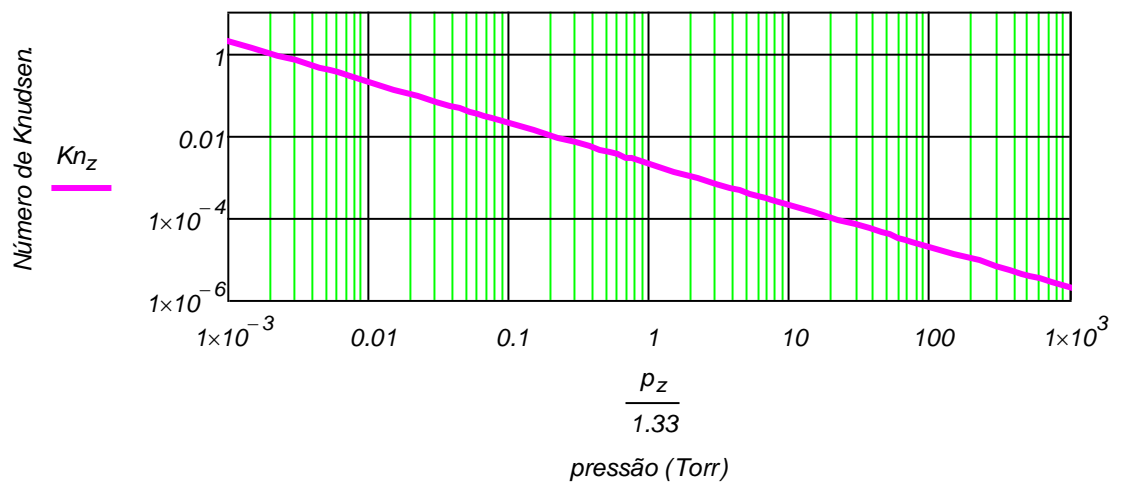
O gás a ser bombeado é nitrogênio
(28 uma) a temperatura ambiente (296 K).

$$Kn_z := \frac{\lambda_z}{dia}$$

ou

$$Kn_z := \frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{dia \cdot p_z}$$

O gráfico do número de Knudsen em função da pressão é mostrado abaixo, para toda a faixa de operação do sistema de vácuo.



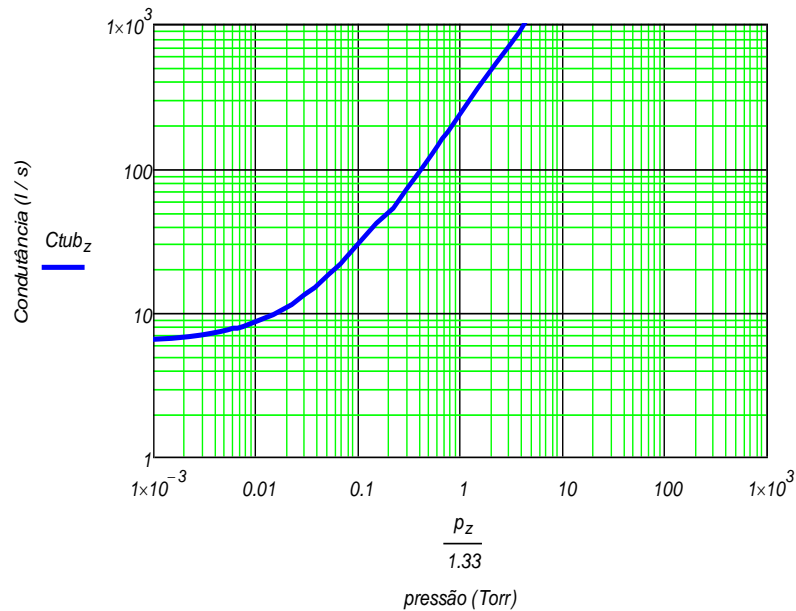
Pelo critério de Knudsen, se:

- $Kn < 0,01$ regime de escoamento viscoso.
- $Kn > 1$ regime de escoamento molecular.
- $1 > Kn > 0,01$ regime de escoamento intermediário.

Obs: Cabe notar que há uma pequena diferença nos valores, que definem as faixas dos regimes de escoamento dos gases, dependendo do autor. Isto não introduz nenhum problema prático.

$$C_{tub_z} := \text{if} \left[\frac{\frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}}}{p_z} > 100, 136 \cdot \frac{dia^4}{l_{tub}} \cdot p_z, \left(12.1 \cdot \frac{dia^3}{l_{tub}} \right) \cdot \left(1 + 0.0736 \cdot \frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{p_z} \right) \right]$$

O gráfico da condutância em função da pressão é mostrado abaixo.



Vamos agora considerar o sistema de bombeamento.

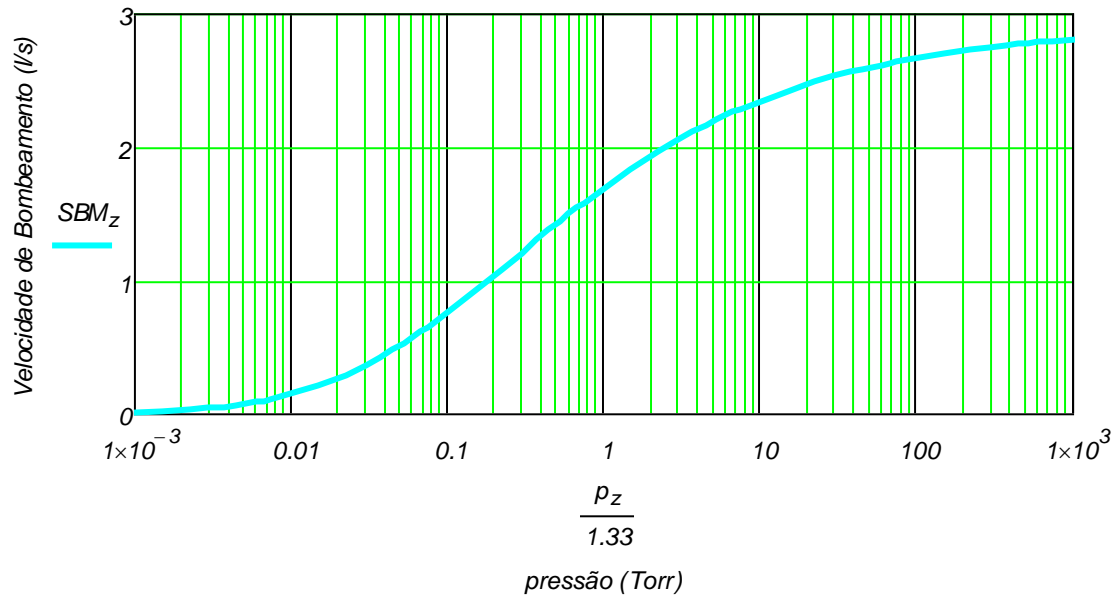
Adotaremos uma bomba mecânica de palhetas de um estágio de modelo 2010, da série Pascal da marca Alcatel.

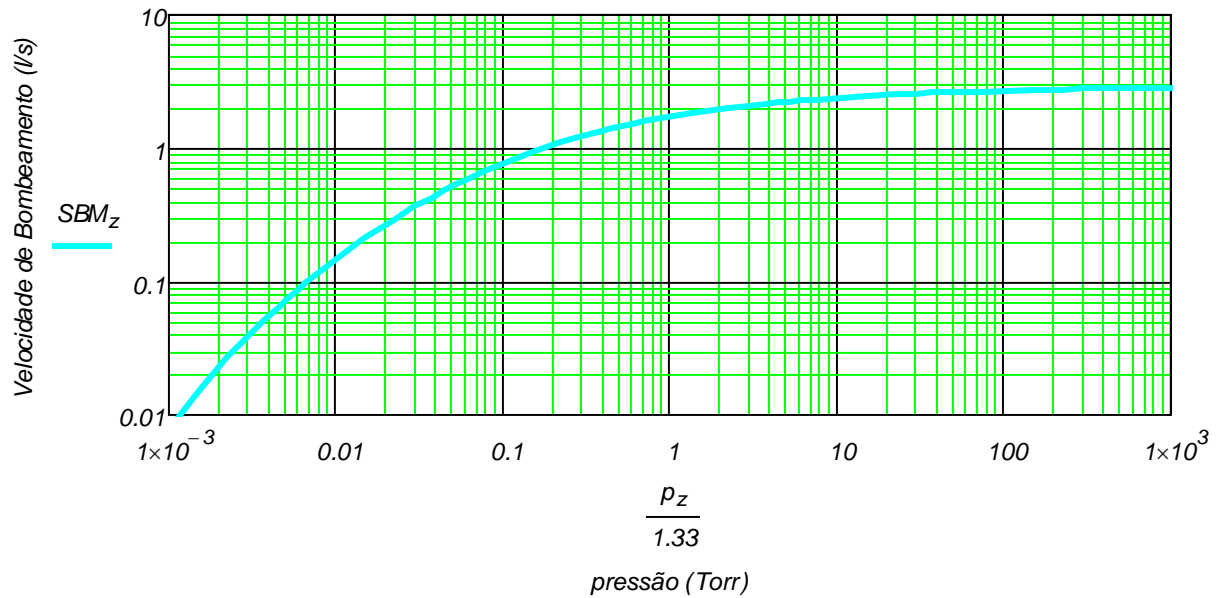
A expressão da velocidade de bombeamento, para a bomba mecânica adotada, é dada a seguir.

$$SBM_{\text{máx}} = 2.92 \quad \text{litros / segundo}$$

$$SBM_z := SBM_{\text{máx}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_z}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{p_z} \right)^{0.5} \right]^9}$$

A curva de velocidade de bombeamento em função da pressão da bomba mecânica é mostrada abaixo.



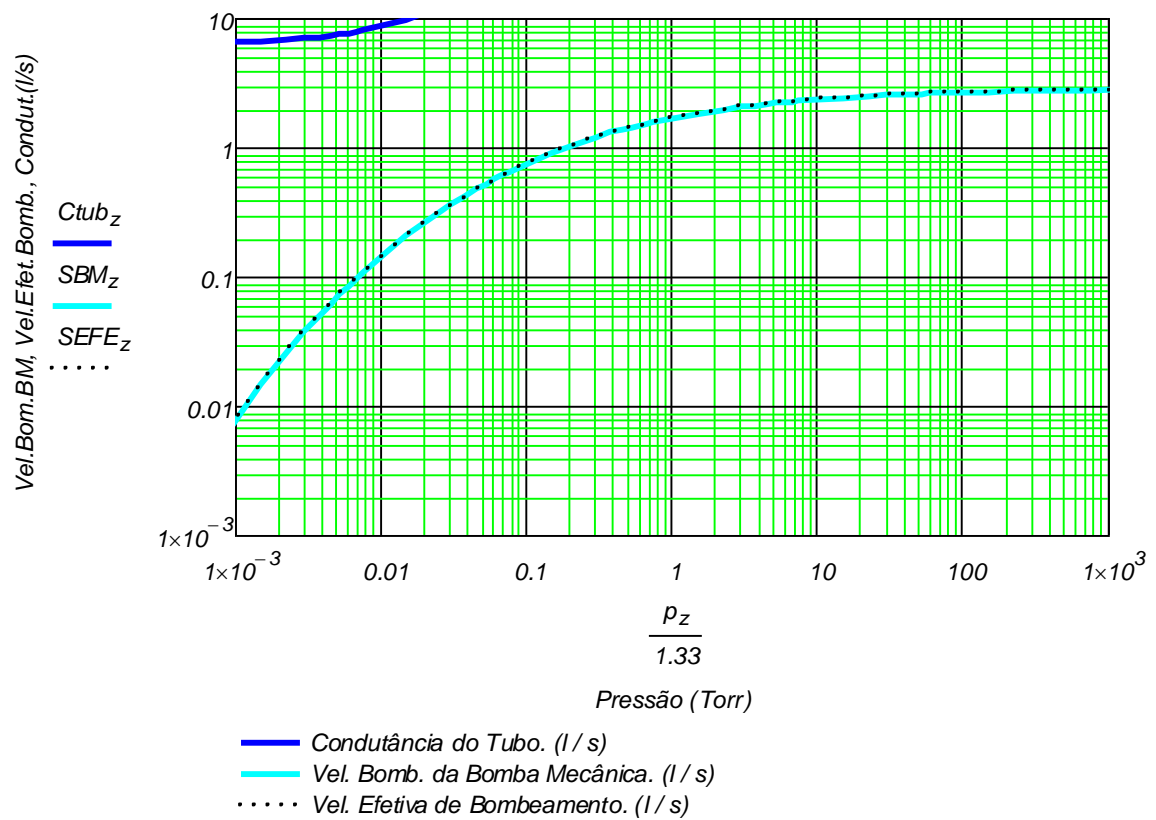


Com a velocidade de bombeamento da bomba e com as dimensões do fole metálico podemos obter a velocidade de bombeamento efetivo com a expressão abaixo.

$$(1 / S_{ef}) = (1 / S_b) + (1 / C_{total}).$$

$$SEFE_z := \frac{SBM_z \cdot Ctub_z}{SBM_z + Ctub_z}$$

O gráfico abaixo mostra as curvas de velocidade de bombeamento da bomba de vácuo, a da condutância e a da velocidade efetiva de bombeamento. É possível notar que devido as dimensões do fole metálico a condutância interfere muito pouco na velocidade efetiva do sistema que tem seu valor igual ao da velocidade de bombeamento da bomba.



Determinaremos agora a evolução da pressão na câmara de vácuo em função do tempo. Consideraremos o efeito da condutância no processo de bombeamento.

$$N := 10000 \quad t_0 := 0 \quad t_f := 15000 \quad P_0 := 931 \text{ mbar (pressão atmosférica)}$$

$$h := \frac{t_f - t_0}{N + 1} \quad h = 0.1499985 \quad n := 0..N \quad t_{n+1} := t_n + h$$

Curva da pressão na câmara de vácuo considerando a bomba de vácuo conectada diretamente à bomba de vácuo, ou seja, condutância muito grande (infinita).

$$SBM(P) := SBM_{\text{máx}} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{P} \right)^{0.5} \right]^9}$$

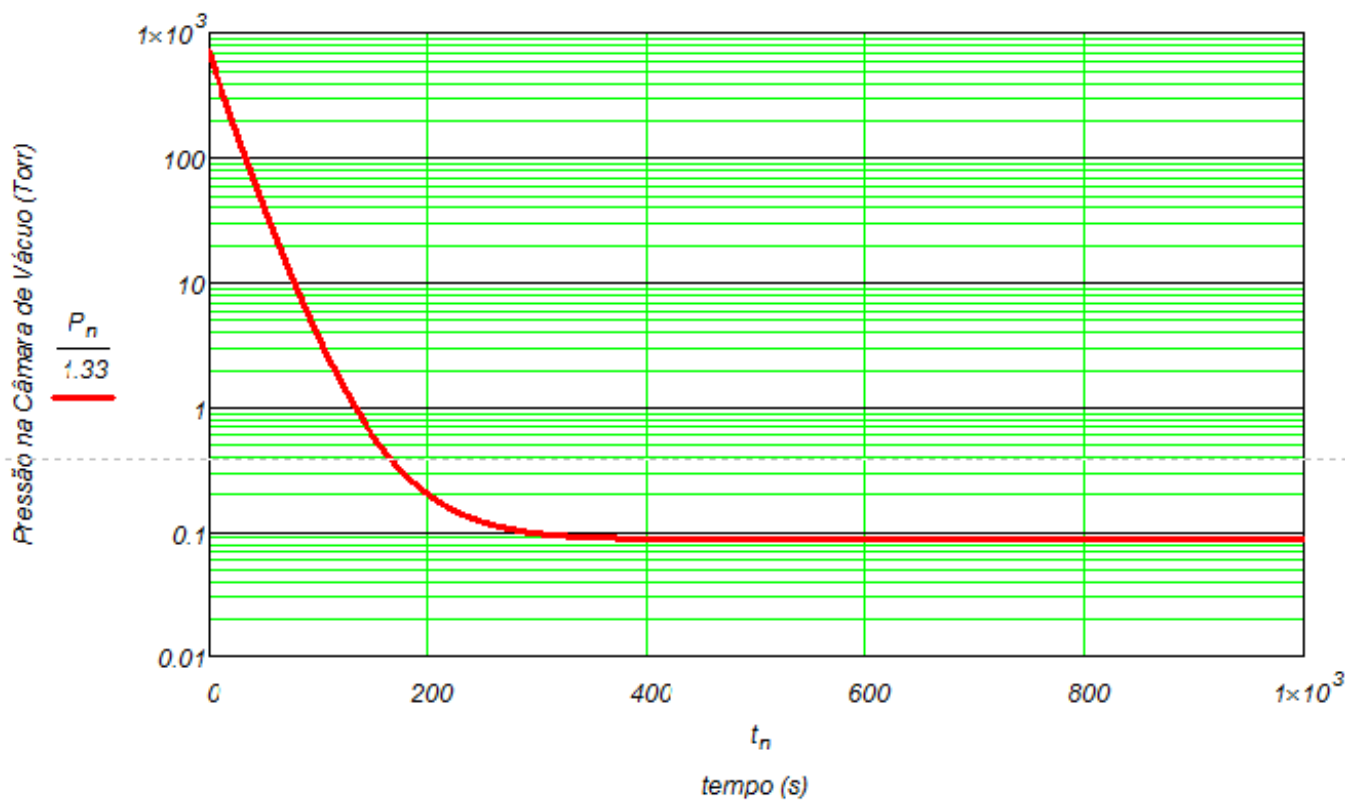
$$g(t, P) := \left(\frac{8 \cdot 10^{-2}}{V_{cv}} \right) - \left(\frac{SBM(P)}{V_{cv}} \right) \cdot P$$

Onde 0,08 mbar.L/s é o throughput final imposto arbitrariamente.

$$P_{n+1} := P_n + \left(\frac{h}{2} \right) \cdot [g(t_n, P_n) + g(t_{n+1}, (P_n + h \cdot g(t_n, P_n)))]$$

- Método de Euler-Heun para a determinação numérica da pressão na câmara de vácuo em função do tempo.

A figura abaixo mostra a evolução temporal da pressão na câmara de vácuo, considerando a bomba de vácuo conectada diretamente à câmara de vácuo.



Vamos agora considerar o efeito do tubo interligando a câmara de vácuo à bomba de vácuo.

Agora determinaremos a evolução da pressão na câmara de vácuo considerando a conexão de um tubo. Desta forma, o efeito da condutância será levado em conta. Mas, a condutância será considerada como função da pressão (do regime de escoamento). Adotaremos mais uma vez o throughput final de 0,08 Torr.L/s.

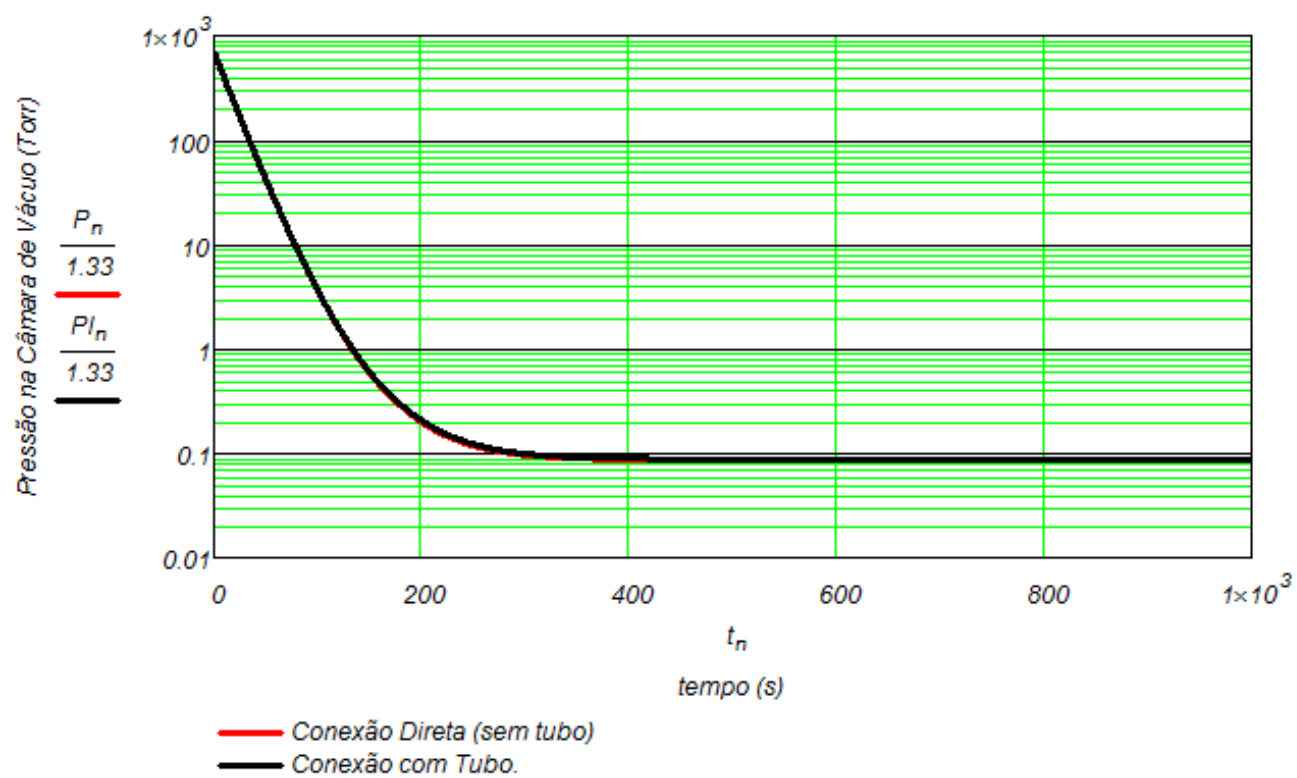
$$PI_0 := 931 \quad \text{mbar} \quad (\text{pressão atmosférica})$$

$$j(t, PI) := \frac{8 \cdot 10^{-2}}{V_{cv}} - \left[\left[\left[SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{PI}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{PI} \right)^{0.5} \right]^9} \right] \right] \cdot \left[\frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} > 100, 136 \cdot \frac{dia^4}{litub} \cdot \left[\frac{PI - \left[SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{PI}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{PI} \right)^{0.5} \right]^9} \right] \cdot \frac{d \cdot PI}{dt}}{2} \right] \cdot \left(12.1 \cdot \frac{dia^3}{litub} \right) \cdot \left(1 + 0.0736 \cdot \frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{PI} \right) \right] \right] \right]$$

$$PI_{n+1} := PI_n + \left(\frac{h}{2} \right) \cdot \left[j(t_n, PI_n) + j \left[t_{n+1}, \left(PI_n + h \cdot j(t_n, PI_n) \right) \right] \right]$$

- Método de Euler-Heun.

As curvas de pressão na câmara de vácuo em função do tempo são mostradas abaixo.



Sistema de vácuo utilizando um tubo comprido de diâmetro pequeno

Sistema de Pré-Vácuo Operando da Pressão Atmosférica (700 Torr)

até 3 Torr (Sistema de Vácuo de Pequeno Porte).

O sistema de vácuo apresentado é o mesmo do anterior, porém com um tubo com dimensões diferentes.

Para o tubo temos:

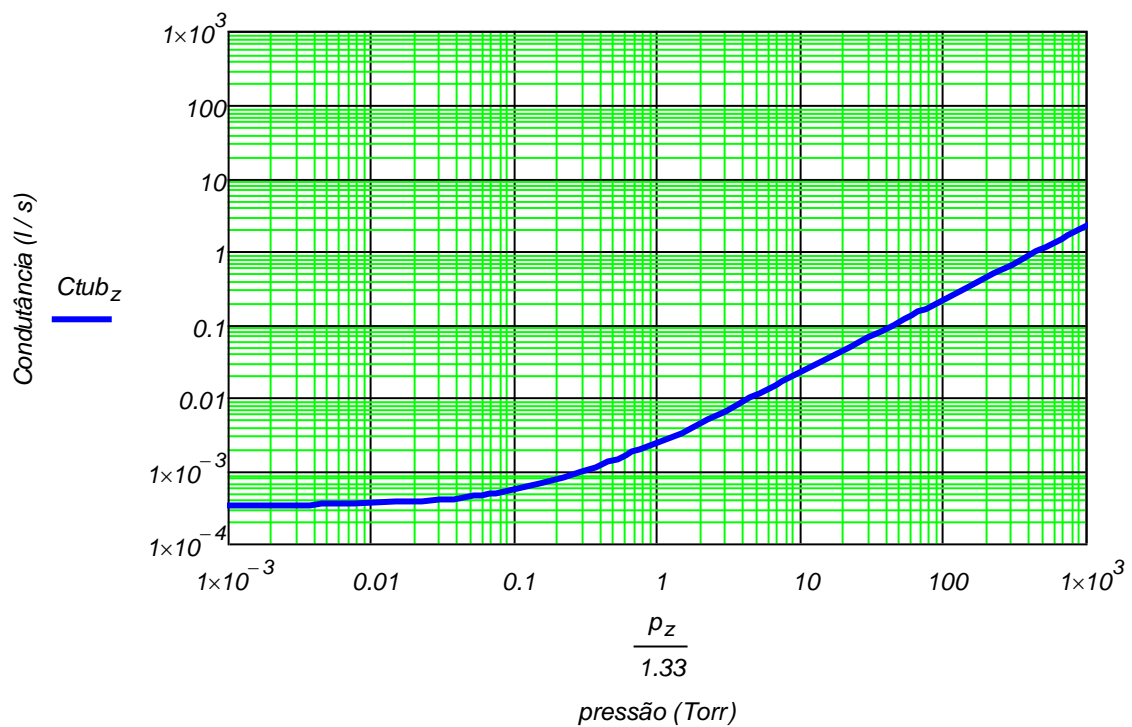
-comprimento, $l_{tub} := 300 \text{ cm}$

-diâmetro, $d_{ia} := 0.43 \text{ cm}$

Para esse tubo faremos o mesmo procedimento para obter o valor da condutância.

$$C_{tub_z} := \text{if} \left[\frac{d_{ia}}{\frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{p_z}} > 100, 136 \cdot \frac{d_{ia}^4}{l_{tub}} \cdot p_z, \left(12.1 \cdot \frac{d_{ia}^3}{l_{tub}} \right) \cdot \left(1 + 0.0736 \cdot \frac{d_{ia}}{\frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{p_z}} \right) \right]$$

O gráfico da condutância em função da pressão é mostrado abaixo.



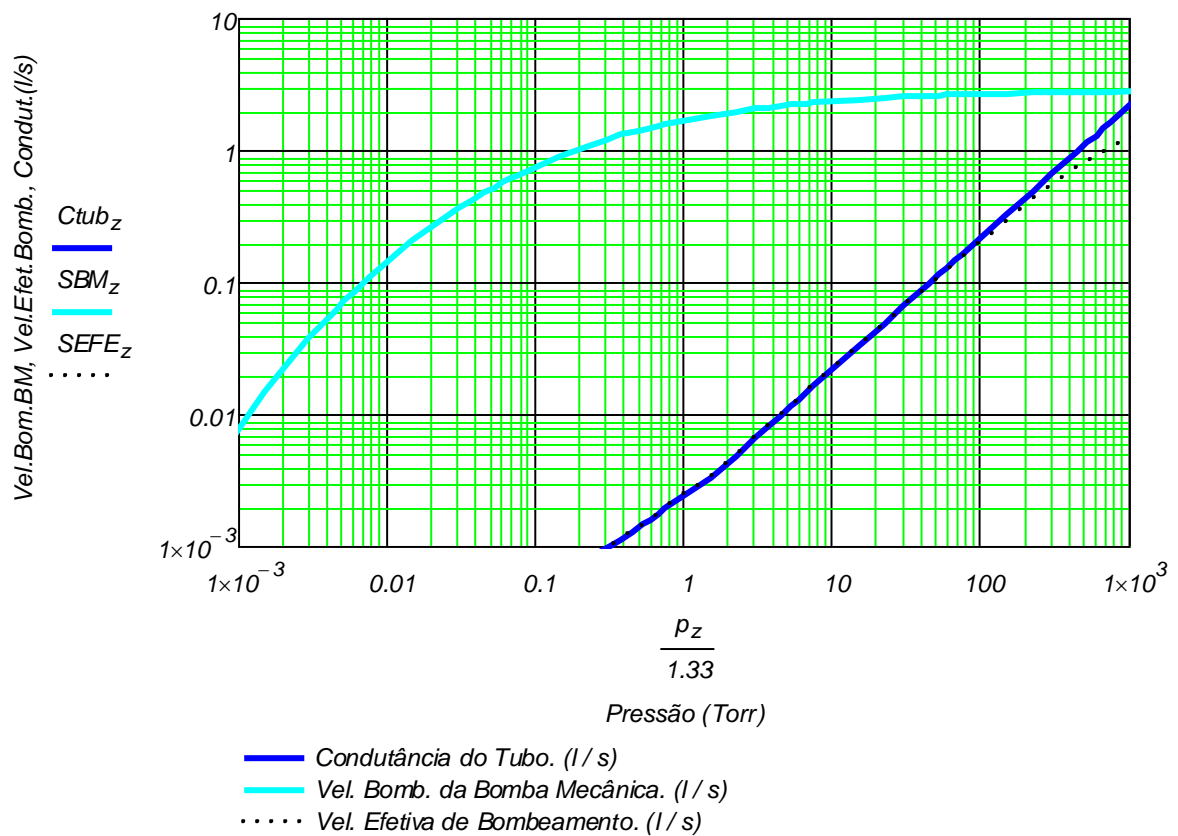
$$SBM_z := SBM_{\text{máx}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_z}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{p_z} \right)^{0.5} \right]^9}$$

$SBM_{\text{máx}} = 2.92 \text{ litros / segundo}$

Com a velocidade de bombeamento da bomba e com as dimensões do fole metálico podemos obter a velocidade de bombeamento efetivo com a expressão abaixo.

$$(1 / S_{\text{ef}}) = (1 / S_b) + (1 / C_{\text{total}}). \quad SEFE_z := \frac{SBM_z \cdot Ctub_z}{SBM_z + Ctub_z}$$

O gráfico abaixo mostra as curvas de velocidade de bombeamento da bomba de vácuo, a da condutância e a da velocidade efetiva de bombeamento. Fica claro que devido às dimensões do tubo a velocidade efetiva de bombeamento é bem pequena, sendo bem menor que a da velocidade de bombeamento da bomba, o que resulta num maior tempo de bombeamento.



Determinaremos agora a evolução da pressão na câmara de vácuo em função do tempo. Consideraremos o efeito da condutância no processo de bombeamento.

$$t_0 := 0 \quad t_f := 15000 \quad P_0 := 931 \text{ mbar} \quad (\text{pressão atmosférica})$$

$$h := \frac{t_f - t_0}{N + 1} \quad h = 0.1499985 \quad n := 0..N \quad t_{n+1} := t_n + h$$

Curva da pressão na câmara de vácuo considerando a bomba de vácuo conectada diretamente à bomba de vácuo, ou seja, condutância muito grande (infinita).

$$SBM(P) := SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{P} \right)^{0.5} \right]^9}$$

$$g(t, P) := \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{V_{cv}} \right) - \left(\frac{SBM(P)}{V_{cv}} \right) \cdot P$$

Onde 0,001 mbar.L/s é o throughput final imposto arbitrariamente.

$$P_{n+1} := P_n + \left(\frac{h}{2} \right) \cdot [g(t_n, P_n) + g(t_{n+1}, (P_n + h \cdot g(t_n, P_n)))] \quad \bullet \quad \text{Método de Euler-Heun para a determinação numérica da pressão na câmara de vácuo em função do tempo.}$$

Vamos agora considerar o efeito do tubo interligando a câmara de vácuo à bomba de vácuo.

Agora determinaremos a evolução da pressão na câmara de vácuo considerando a conexão de um tubo. Desta forma, o efeito da condutância será levado em conta. Mas, a condutância será considerada como função da pressão (do regime de escoamento). Adotaremos mais uma vez o throughput final de 0,001 mbar.L/s.

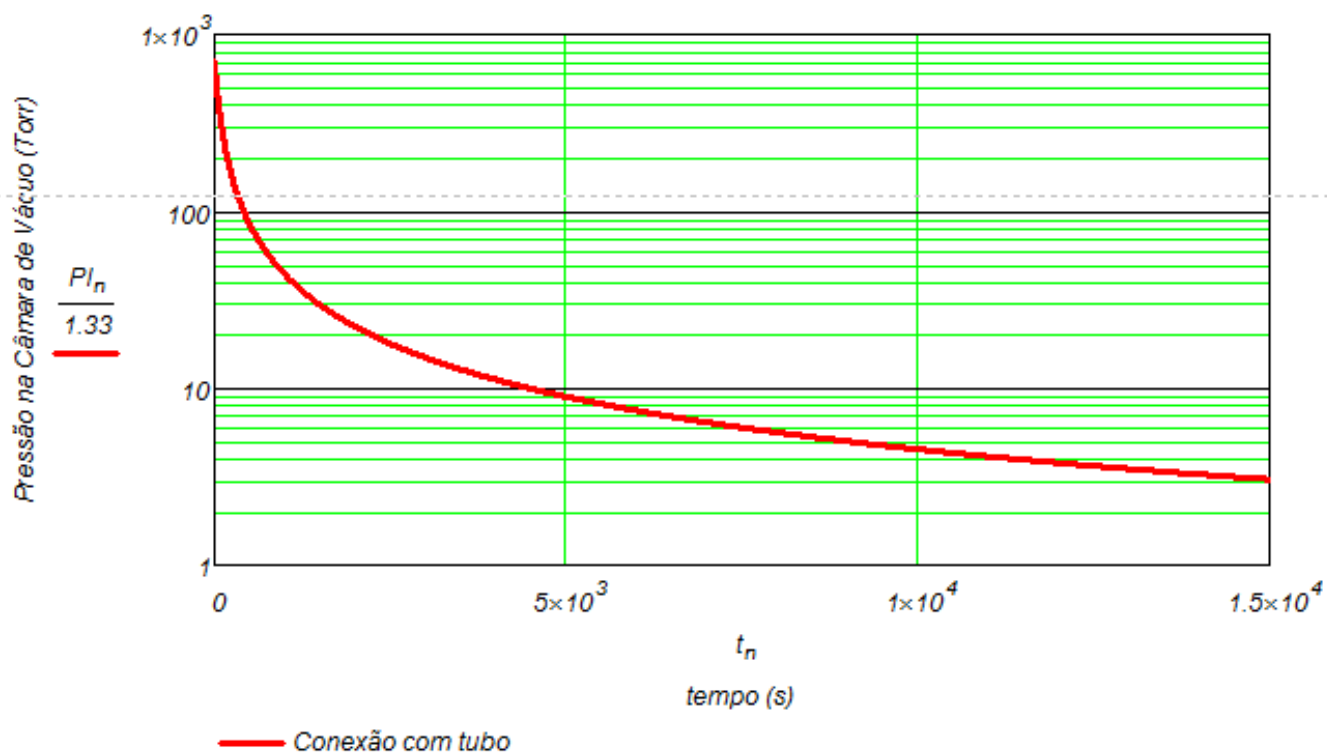
$$P_{I0} := 931 \quad \text{mbar} \quad (\text{pressão atmosférica})$$

$$j(t, PI) := \frac{1 \cdot 10^{-3}}{V_{cv}} \cdot \left[\left[SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{PI}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{PI} \right)^{0.5} \right]^9} \right] \cdot \left[\frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} > 100, 136 \frac{dia^4}{ltub} \right] \cdot \left[\frac{PI - \frac{V_{cv}}{SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{PI}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{PI} \right)^{0.5} \right]^9}} \cdot \frac{d}{dt} PI}{2} \right] \cdot \left(12.1 \frac{dia^3}{ltub} \right) \cdot \left(1 + 0.0736 \frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{PI} \right) \right] \right] + \left[\frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} > 100, 136 \frac{dia^4}{ltub} \right] \cdot \left[\frac{PI - \frac{V_{cv}}{SBM_{\max} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{PI}{0.1 \cdot 1 \cdot 10^0} \right)^{0.7}}} \right] \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{PI} \right)^{0.5} \right]^9}} \cdot \frac{d}{dt} PI}{2} \right] \cdot \left(12.1 \frac{dia^3}{ltub} \right) \cdot \left(1 + 0.0736 \frac{dia}{6.7 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{PI} \right) \right] \right]$$

$$PI_{n+1} := PI_n + \left(\frac{h}{2} \right) \cdot \left[j(t_n, PI_n) + j\left[t_{n+1}, (PI_n + h \cdot j(t_n, PI_n))\right] \right]$$

- Método de Euler-Heun.

A curva de pressão na câmara de vácuo em função do tempo é mostrada abaixo.



Anexo B - Modelagem do Sistema de vácuo 3

Alan R. Cerqueira, Edelson Venuto, Matheus de Andrade, Johnes S. Santos e Francisco Tadeu Degasperi.

LTV - DSE - FATEC-SP – CEETEPS

Novembro 2013

Modelagem de sistema de pré-vácuo, mais especificamente dentro do vácuo grosseiro, operando da pressão atmosférica - 700 torr - até 1 torr.

O gás de trabalho é o nitrogênio - N_2 com a temperatura de operação a temperatura ambiente 294 K (21 °C).

Foram utilizadas condutâncias com valores conhecidos. O circuito de vácuo utilizado O gás de trabalho é o nitrogênio - N_2 com a temperatura de operação a temperatura ambiente 294 K (21 °C).

O sistema de vácuo foi limpo com detergente e depois foi feito enxague com água corrente. Após a secagem foi limpo com álcool isopropílico.

Todas as conexões foram feitas com flanges KF-10 e KF-16. Somente a entrada da bomba mecânica de palhetas de duplo estágio é com flange KF-25.

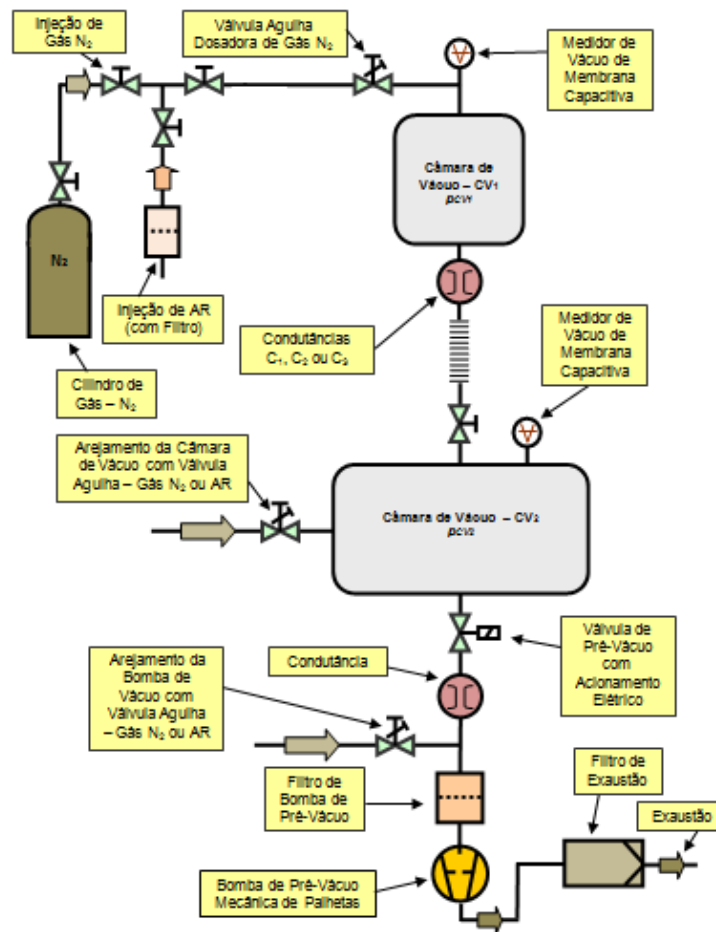
A bomba de vácuo utilizada no arranjo experimental foi uma bomba mecânica de palhetas de duplo estágio da linha Pascal da marca Alcatel (atual empresa Adixen), modelo 2010SD.

A velocidade de bombeamento da bomba mecânica é de $10,5 \text{ m}^3/\text{h}$, ou ainda, 2,92 L/s.

Os medidores utilizados nas experiências foram dos seguintes tipos:

b) Membrana Capacitiva: foram utilizadas dois medidores sensores de membrana capacitivos modelo Ceravac e Baratron fabricados respectivamente pela Oerlikon-Leybold e Msk, com faixa de operação de e 1000 torr até 10^{-2} torr para o medidor instalado na câmara de vácuo 1 (CV_1) e o outro com mesma faixa de operação para o medidor da câmara de vácuo 2(CV_2).

Abaixo temos um desenho esquemático do circuito de vácuo montado para as experiências.



CIRCUITO DE VÁCUO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

A modelagem do sistema de vácuo, com o propósito de encontrar os valores das pressões nas câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 pode ser realizada com a aplicação da equação do processo de bombeamento em vácuo. Há uma equação diferencial para cada câmara de vácuo, sendo que as equações diferenciais são acopladas. Mostramos abaixo as equações diferenciais para as câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 .

$$\begin{aligned} \text{Câmara de Vácuo 1 - C)} \quad V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} &= -S_{ef1} \cdot p_{CV1}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV1} \\ \text{Câmara de Vácuo 2 - C)} \quad V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} &= -S_{ef2} \cdot p_{CV2}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV2} \end{aligned}$$

Descrevendo sucintamente o sistema de vácuo, temos que ele é composto por duas câmaras de vácuo, interligadas entre si por uma condutância C. A câmara de vácuo CV₂ é bombeada por uma bomba de vácuo mecânica de palhetas de duplo estágio de velocidade de bombeamento S_{BV}, sendo a sua velocidade de bombeamento dependente da pressão. A velocidade de bombeamento da bomba mecânica de palhetas pode ser considerada constante da pressão atmosférica - 700 torr - até aproximadamente 1 torr. A condutância C é função do regime de escoamento. No caso em estudo a condutância será tratada como estando no regime de escoamento viscoso laminar. O critério objetivo para a determinação do regime de escoamento é dado pelo número de Knudsen - Kn. Sendo $Kn = \lambda / d$, com λ o livre caminho médio e d o diâmetro da condutância.

A condutância é formada por um tubo de diâmetro d e comprimento L .

As grandezas presentes nas equações diferenciais são:
- V_{CV1} e V_{CV2} os volumes das câmaras de vácuo CV₁ e CV₂ respectivamente.

- p_{CV1} e p_{CV2} são as pressões nas câmaras de vácuo CV₁ e CV₂ respectivamente.

- S_{BV} é a velocidade de bombeamento da bomba mecânica de palhetas.

- S_{ef1} e S_{ef2} são as velocidades efetivas de bombeamento, respectivamente nas câmaras de vácuo CV₁ e CV₂.

- Q_{desg} são as desgaseificações em cada uma das câmaras de vácuo.

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = - \frac{S_{ef2} \cdot C}{S_{ef2} + C} \cdot p_{CV1}(t) + Q_{desg}^{CV1}$$

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 2

$$V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} = - \frac{S_{BV} \cdot C_{Tubo}}{S_{BV} + C_{Tubo}} \cdot p_{CV2}(t) + C [p_{CV1}(t) - p_{CV2}(t)] + Q_{desg}^{CV2}$$

Os volumes das câmaras de vácuo são os seguintes:

$$V_{cv1} = (56 \pm 1) \text{ L}$$

$$V_{cv2} = (48 \pm 0,5) \text{ L}$$

Dados para a modelagem do sistema de vácuo:

As câmaras de Vácuo e os componentes auxiliares são em aço inoxidável 304 ou 304L. Todas as superfícies internas estão polidas mecanicamente.

Condutância C:

Diâmetro do tubo: $d1 := 0.435 \text{ cm}$

Comprimento do Tubo: $L1 := 328 \text{ cm}$

Volumes das câmaras de vácuo:

Câmara de Vácuo CV1 $V_{cv1} := 56 \text{ Litros}$

Câmara de Vácuo CV2 $V_{cv2} := 48 \text{ Litros}$

Velocidade efetiva de bombeamento é bem menor que a da bomba mecânica, pois foi colocado um tubo de 0,8 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento. Esse procedimento foi realizado para evitar que o efeito de bloqueio ocorresse entre as câmaras de vácuo, tal efeito surgiria devido a razão entre as pressões das câmaras de vácuo 2 e 1 fosse maior que o dobro que se deve a uma velocidade de bombeamento alta na câmara de vácuo 2.

Utilizando esse tubo obteve-se uma velocidade de bombeamento efetiva de $0,03 \text{ l.s}^{-1}$. Para calcular esse valor multiplicou-se a área da seção transversal do tubo por 20 [7], cálculo que é válido para o gás nitrogênio considerando-se um orifício. Como resultado teve-se $0,1 \text{ l.s}^{-1}$, porém este não foi usado um capilar e sim um tubo. Dessa maneira, o valor de $0,031 \text{ l.s}^{-1}$ foi obtido ajustando-se graficamente.

A modelagem do sistema de vácuo será feita usando os comando internos do MathCAD, baseados no método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem.

$$T1 := 5500 \quad \text{seg}$$

Given

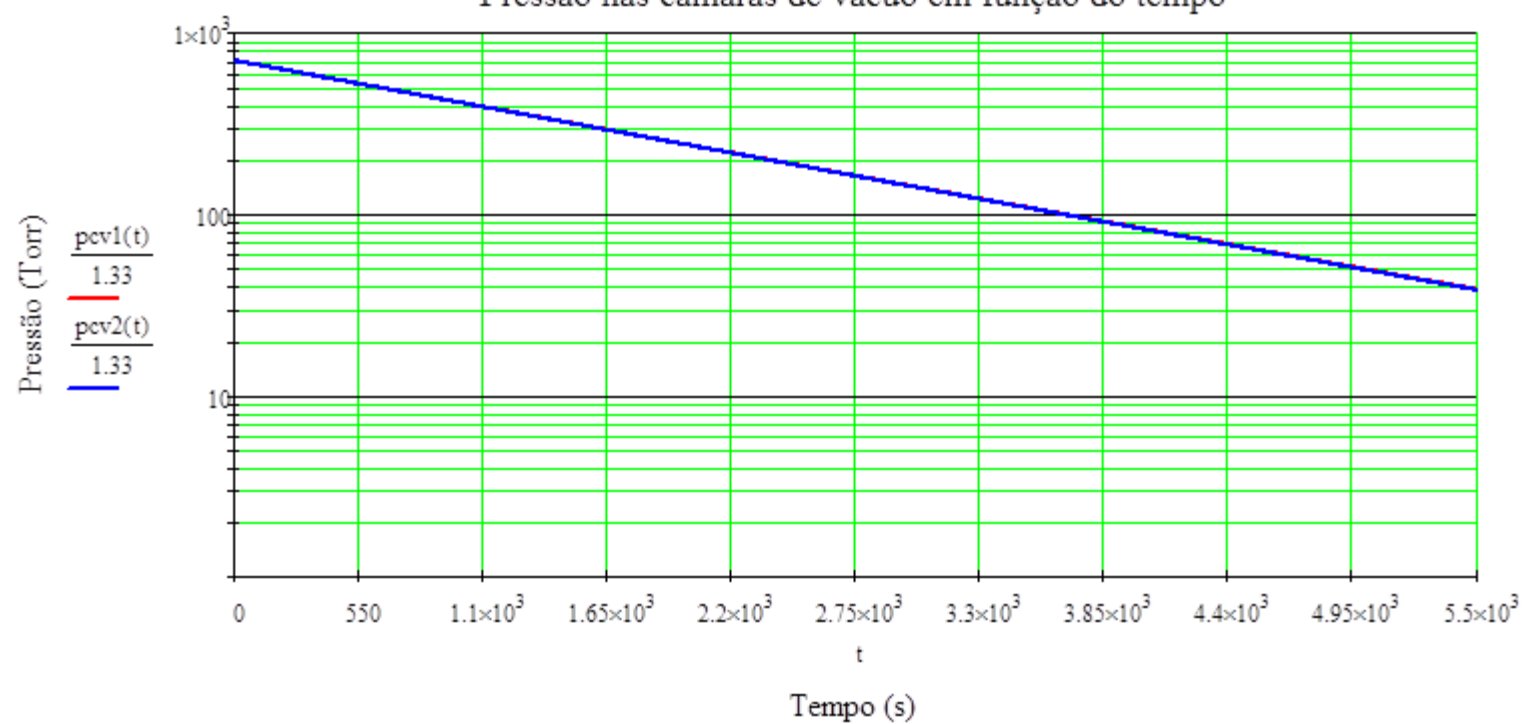
$$\frac{d}{dt}p1(t) = \frac{-1}{V_{cv1}} \cdot \left[\frac{\left[1340.03 \frac{d1^4}{L1} \cdot \left[\frac{(p1(t) + p2(t))}{2} \right] \right]}{\left[134 \frac{d1^4}{L1} \cdot \left[\frac{(p1(t) + p2(t))}{2} \right] + 0.03 \right]} \right] \cdot p1(t) \quad p1(0) = 931 \quad \text{mbar}$$

$$p2(0) = 931 \quad \text{mbar}$$

$$\frac{d}{dt}p2(t) = \frac{1}{V_{cv2}} \cdot \left[-0.03p2(t) + 134 \frac{d1^4}{L1} \cdot \left[\frac{(p1(t) + p2(t))}{2} \right] \cdot (p1(t) - p2(t)) \right]$$

$$\begin{pmatrix} p_{cv1} \\ p_{cv2} \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} p1 \\ p2 \end{pmatrix}, t, T1, 1 \times 10^3 \right] \quad t := 0, \frac{T1}{1 \times 10^3} .. T1 \quad \text{seg}$$

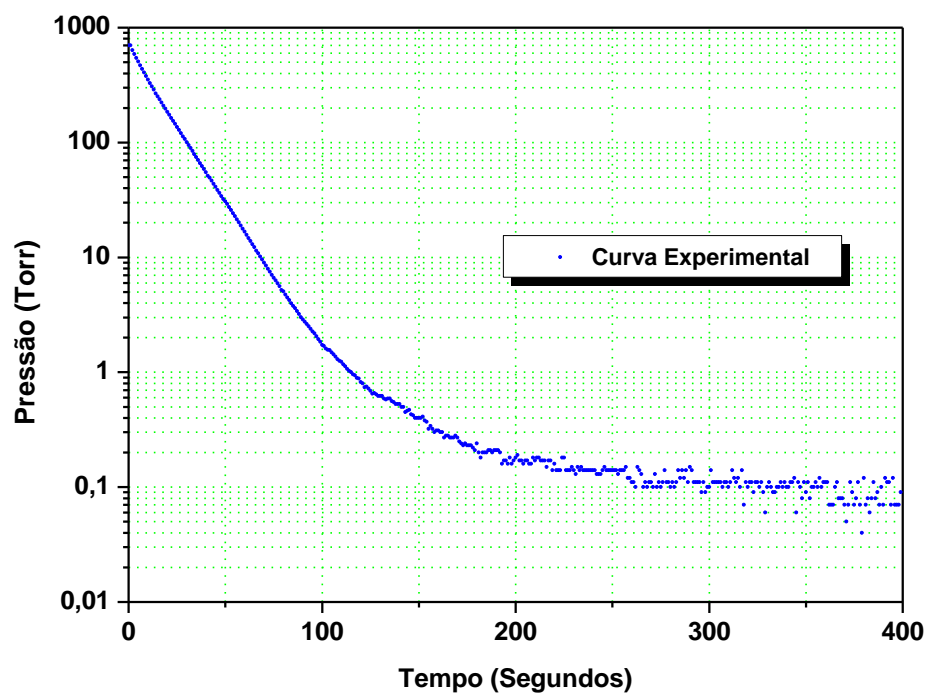
Pressão nas câmaras de vácuo em função do tempo



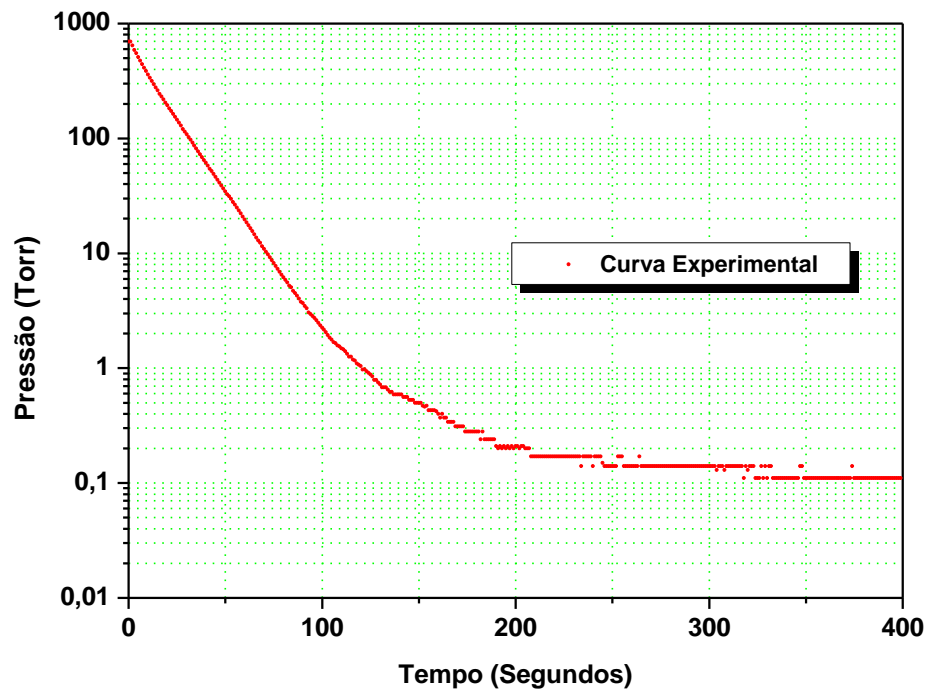
Anexo C - Gráficos obtidos com os dados Experimentais

Gráficos do Sistema de Vácuo 1

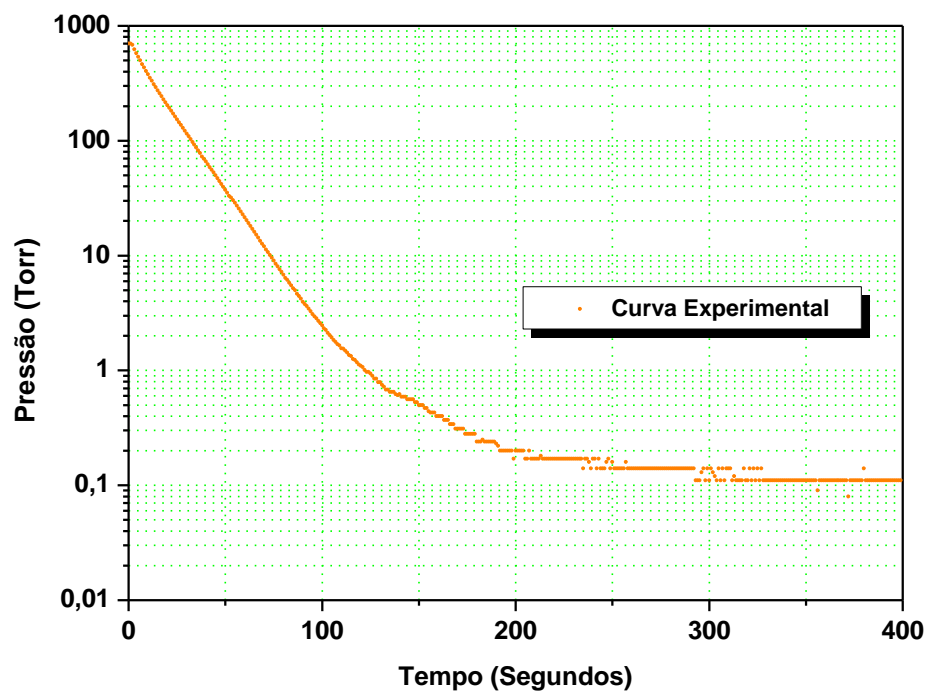
❖ Experimento 1



❖ Experimento 2

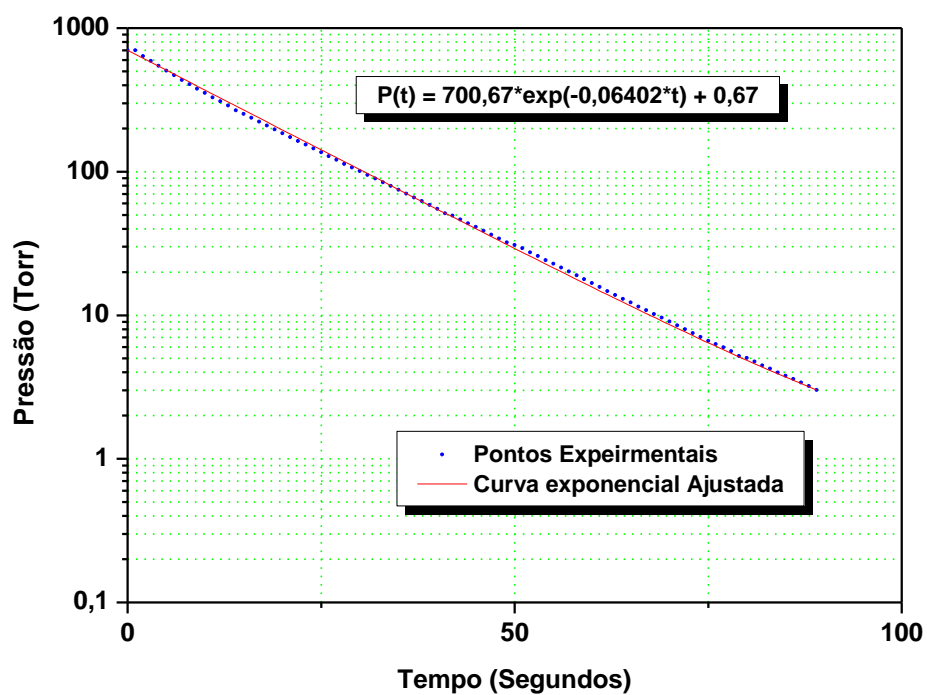


❖ Experimento 3

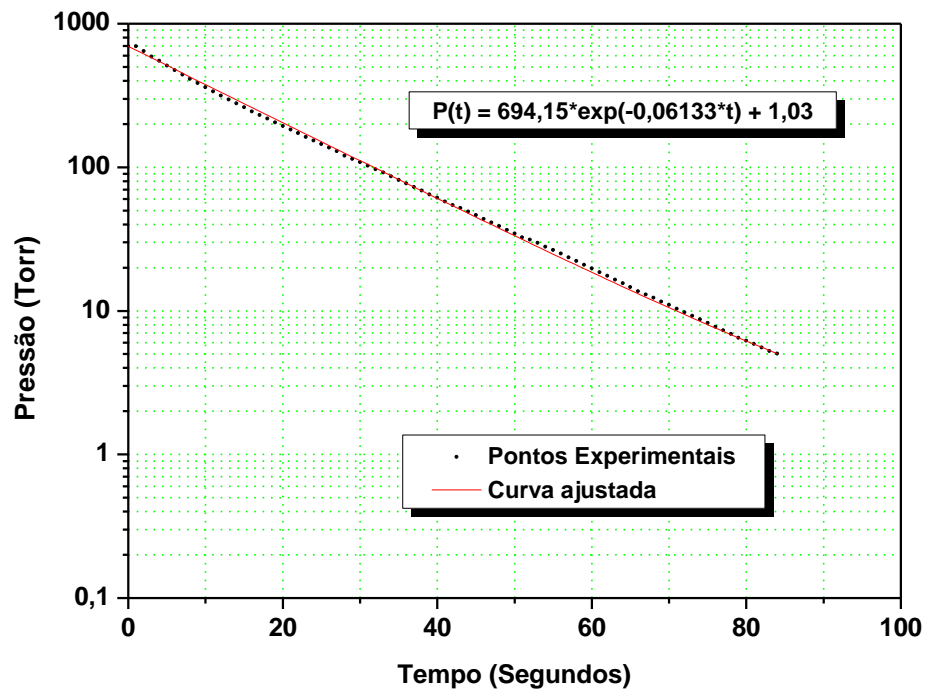


Gráficos do Sistema de Vácuo 1 com exponencial ajustada no trecho em que a velocidade de bombeamento é constante.

❖ Experimento 1



❖ Experimento 2



❖ Experimento 3

