

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

MATERIAIS, PROCESSOS E COMPONENTE ELETRONICOS

DANILO SOARES FONSECA

Modelagem e protótipo, com procedimento experimental para calibração de sensores de vácuo na faixa de Pré-vácuo, pelo método de expansão dinâmica.

São Paulo

2013

DANILO SOARES FONSECA

Modelagem e protótipo, com procedimento experimental para calibração de sensores de vácuo na faixa de Pré-vácuo, pelo método de expansão dinâmica.

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 este trabalho a minha família, minha mãe que esteve sempre ao meu lado, nas horas em que tive que estudar, e principalmente ao meu pai, meu exemplo de vida, a pessoa em que eu me espelho e sempre irei me espelhar, que sempre me cobrou nos momentos de me dedicar aos estudos, hoje eu sei que tudo que ele queria era me ver vencendo na vida.

Agradecimentos

À minha família pelo apoio que sempre foi me dado nos momentos difíceis nos estudos e na vida.

Ao Prof^o Francisco Tadeu Degaspero, pela dedicação e apoio aos alunos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Aos meus amigos, pela ajuda e apoio nos estudos.

Ao Auxiliar Docente do Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, pela ajuda neste trabalho.

E ao CNPq, pela bolsa de iniciação científica concedida para a realização deste trabalho.

Resumo

O vácuo está presente em grande parte da indústria mundial no momento, cada vez mais o vácuo é importante dentro de processos de metalização, evaporação, caracterização, análises químicas e físicas, simulações espaciais, limpezas, etc. Com isso os processos se tornam mais rentáveis e produtivos.

Por tais motivos, podemos afirmar que o estudo das grandezas que envolvem essa tecnologia é de grande importância para o avanço da mesma, como utilização de sistemas corretos para obtermos maior eficiência e eficácia nos resultados obtidos futuramente.

Por tanto, este trabalho, tem como objetivo realizar a calibração de manômetros de baixas pressões, através de um sistema de vácuo simples, trabalhando com grandezas como, condutância, throughput, pressão e velocidade efetiva de bombeamento. O sistema tem como faixa de trabalho o pré-vácuo, que trabalha com pressões desde a pressão atmosférica, que corresponde a 1013 mbar, até a pressão de 10^{-3} mbar.

Abstract

The vacuum is present in much of the global industry at the moment, more vacuum is important in metallization processes, evaporation, characterization, physical and chemical analysis, spatial simulations, cleaning, etc. With that processes become more profitable and productive.

For these reasons, we can say that the study of quantities that involve this technology is of great importance for the advancement of the same, as correct use of systems for greater efficiency and effectiveness in terms of results obtained in future.

Therefore, this work aims to perform the calibration of gauges for low pressure, through a simple vacuum system, working with magnitudes as conductance, throughput, pressure and effective pumping speed. The system's operating range of the pre-vacuum, that work with pressures from atmospheric pressure, which corresponds to 1013 mbar until a pressure of 10^{-3} mbar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01: SISTEMA BÁSICO DE VÁCUO	12
FIGURA 02: LIVRE CAMINHO MÉDIO DE UMA MOLÉCULA	14
FIGURA 03: FLUXO DE GÁS EM UM TUBO.....	17
FIGURA 04: REGIME DE ESCOAMENTO TURBULENTO	19
FIGURA 05: REGIME DE ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR.....	19
FIGURA 06: REGIME VISCOSO MOLECULAR.....	20
FIGURA 07: REGIME DE ESCOAMENTO DE KNUDSEN.....	20
FIGURA 08: ESQUEMÁTICO DE UM MCLEOD.....	22
FIGURA 09: FUNCIONAMENTO DO MANÔMETRO DE MEMBRANA CAPACITIVA.....	23
FIGURA 10: FUNCIONAMENTO INTERNO DE UM MANÔMETRO PIRANI.....	24
FIGURA 11: ESQUEMÁTICO DO METODO DA PIPETA.....	24
FIGURA12: BOMBA MECÂNICA DE PALHETAS DE DUPLO ESTÁGIO ALCATEL PASCAL 2010 SD.....	26
FIGURA 13: MEDIDOR DE MEMBRANA CAPACITIVA LEYBOLD CERAVAC TRANSMITER.....	27
FIGURA 14: UNIDADE CONTROLADORA LEYBOLD CENTER TWO.....	27
FIGURA 15: ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE VÁCUO.....	28
FIGURA 16: SISTEMA DE VÁCUO.....	32
FIGURA 17: CÂMARA 02 (DOIS) E PARTE LATERAL DO SISTEMA DE VÁCUO.....	33

FIGURA 18: BASE DE SUSTENTAÇÃO DO SISTEMA DE VÁCUO CONSTRUÍDA EM MADEIRA.....	34
FIGURA 19: SUPORTES DAS CONEXÕES E CÂMARAS DE VÁCUO FEITOS EM POLÍMERO.....	34
FIGURA 20: ESTRUTURA DE SUPORTE PARA CÂMARA DE VÁCUO 02 (DOIS) E BOMBA MECÂNICA DE PALHETAS.....	35
FIGURA 21: WEBCAM UTILIZADA NA GRAVAÇÃO DO MÉTODO DA PIPETA.....	36
FIGURA 22: EXEMPLO DE ANÁLISE DE DADOS ATRAVÉS DO EXCEL.....	36
FIGURA 23: VÁLVULA AGULHA, USADA PARA DOSAGEM DO GÁS QUE ESTA ENTRANDO NO SISTEMA DE VÁCUO.....	37
FIGURA 24: VÁLVULA DE ENTRADA DE GÁS NO SISTEMA DE VÁCUO.....	38
FIGURA 25: PIPETA VOLUMÉTRICA E BÉQUER COM ÓLEO DE SILICONE UTILIZADOS NA COLETA DOS DADOS DA EXPERIÊNCIA.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

GRAFICO 01: CURVA DE VAZÃO, PARA PRESSÃO EM $VC_1=16$ mbar.....	39
GRAFICO 02: CURVA DE VAZÃO, PARA PRESSÃO EM $VC_1=35,5$ mbar.....	43
GRAFICO 03: CURVA DE VAZÃO, PARA PRESSÃO EM $VC_1=46,86$ mbar.....	47
GRAFICO 04: CURVA DE VAZÃO, PARA PRESSÃO EM $VC_1=56,76$ mbar.....	50

Sumário

1. Introdução	11
1.1. Objetivo	11
1.2. Apresentação	11
2. Fundamentos Teóricos	13
2.1. Vácuo	13
2.2. Livre Caminho Médio	14
2.3. Teoria Cinética dos Gases	15
2.4. Throughput	16
2.5. Condutância	17
2.6. Regime de Escoamento	18
2.7. Manômetros	20
2.7.1. Manômetros diretos	21
2.7.2. Manômetros Indiretos	23
2.8. Método da Pipeta	24
3. Materiais e Montagem do Sistema	25
3.1. Materiais Utilizados	26
3.1.1. Aparato Experimental	26
3.2. Caracterização do Sistema de Vácuo	28
3.3. Modelagem do Sistema	29
3.4. Montagem do Sistema	32
4. Procedimento Experimental	35
4.1. Coleta de Dados	35
4.2. Procedimento Experimental	37
5. Resultados	39
5.1. Medição 1	39

5.2. Medição 2	43
5.3. Medição 3	46
5.4. Medição 4	50
6. Conclusão e Perspectivas	54
7. Referencia.....	55

1. Introdução

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar a calibração de manômetros de baixas pressões, através do método da pipeta, que nos permite calcular pequenas vazões existentes no sistema de vácuo, que na tecnologia do vácuo chamamos de throughput, podemos então através de equações, chegar ao valor da pressão de uma câmara de vácuo acoplada ao sistema.

Desenvolvemos este trabalho com o objetivo de levar este sistema para empresas e laboratórios, fazendo com que os mesmos não precisam procurar empresas específicas de calibração de medidores de baixas pressões, fazendo com que seja diminuído os custos dos processos de fabricação de produtos nas empresas e diminuindo os custos de pesquisas nos laboratórios.

1.2. Apresentação

A importância do fenômeno físico denominado vácuo na atualidade é muito grande, mas este não é um fenômeno apenas da atualidade, historiadores dizem que o primeiro físico a criar o vácuo foi Galileu Galilei, que obteve o vácuo através de pistões, após ele vieram Otto Von Guericke e Evangelista Torricelli que criaram a primeira bomba de vácuo e o primeiro instrumento medidor de baixas pressões (o barômetro de mercúrio) respectivamente. Atualmente a necessidade de utilização da Tecnologia do Vácuo vem aumentando em várias áreas, desde a indústria até a área de pesquisa.

A Tecnologia do Vácuo está presente em grande parte dos processos industriais nos dias de hoje, tais como na indústria farmacêutica, alimentícia, nuclear e não podemos nos esquecer da microeletrônica. Sendo parte fundamental nos processos de produção, como encapsulamentos de microcomponentes, empacotamento de alimentos e etc.

Os sistemas de vácuo são basicamente compostos por três componentes, uma bomba de vácuo, uma câmara de vácuo e a linha de bombeamento que serve para fazer a ligação entre a bomba de vácuo e a câmara. O tempo que o sistema leva para atingir sua pressão final é identificado graças a linha de bombeamento.

Alguns sistemas de vácuo mais complexos, como o que irei utilizar neste trabalho, podem utilizar alguns outros componentes como: válvulas, medidores, flanges, tubulações, conexões dentre outros, que serão apresentados ao longo do trabalho.

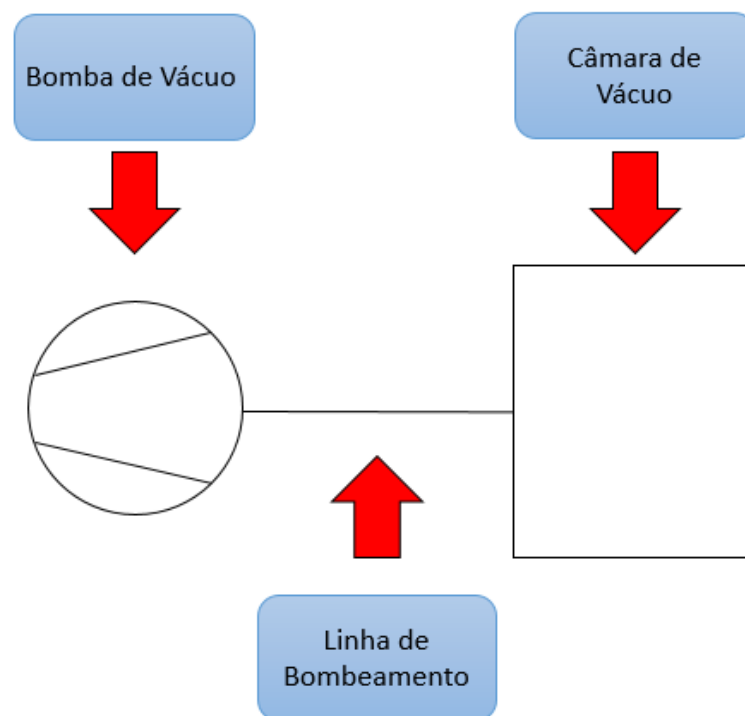


Figura 01: Sistema básico de vácuo

Muitas das aplicações da indústria são trabalhadas na faixa de pré-vácuo. Ao variarmos a espessura da linha de bombeamento, alteramos a condutância do sistema, com isso o fluxo de gás que passa pela condutância muda e altera o tempo de bombeamento da câmara.

O atual projeto tem como objetivo modelar e desenvolver um sistema para obtenção de pequenas vazões (*Throughput*) em pré-vácuo (pressão atmosférica até 10^{-3} mbar). Atualmente os processos de vácuo para a indústria concentram-se nesta faixa de pressão. Estudos como este serão de grande valia para a indústria, não apenas visa uma

redução de custos, pois o tempo no processo será reduzido, mas também na confiança no processo que está sendo executado.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Vácuo

O Vácuo é uma palavra derivada do latim “vazio”, que dá a falsa impressão que o vácuo é um meio onde não existe partícula alguma, esta forma de se pensar está totalmente incorreta.

Na ciência consideramos o vácuo como sendo toda e qualquer pressão abaixo da pressão atmosférica padrão, que é considerada 933 mbar. Atualmente o vácuo está presente em grande parte dos processos industriais, tais como empacotamento de alimentos, encapsulamento e metalização de microcomponentes, na indústria de refrigeração e etc. O vácuo pode ser subdividido em 4 categorias, elas são:

- Pré-vácuo: pressão atmosférica à 10^{-3} mbar;
- Alto-vácuo: de 10^{-3} à 10^{-8} mbar;
- Ultra alto-vácuo: de 10^{-8} à 10^{-11} mbar;
- Extremo alto-vácuo: abaixo de 10^{-12} mbar.

Este trabalho será desenvolvido na faixa de pré-vácuo, que mais precisamente vai de 1013 mbar à 10^{-3} mbar. Esta faixa que compreende 6 faixas de grandeza, corresponde a cerca de 70% do vácuo que é utilizado na indústria na ciência e na tecnologia.

Nesta faixa de pressão encontramos três regimes de escoamento de gases, o regime viscoso turbulento, o regime viscoso laminar e o regime intermediário (também

chamado de regime de Knudsen). Nestes regimes em geral, podemos perceber que tanto a velocidade de bombeamento da bomba de Pré-vácuo que está sendo utilizada como a condutância do sistema dependem da pressão em que o sistema está sendo submetido, isto torna a análise e modelagem de um sistema bastante complicada.

2.2. Livre Caminho Médio

A distância média percorrida por átomos ou moléculas em um intervalo entre uma colisão e outra, pode ser considerado como livre caminho médio. O fato de uma molécula viajar em uma velocidade diferente da outra faz com que uma molécula tenha um livre caminho médio diferente das outras moléculas que estão concentradas em um recipiente, com isto a média deste caminhos λ , é mostrada na teoria cinética a seguir:

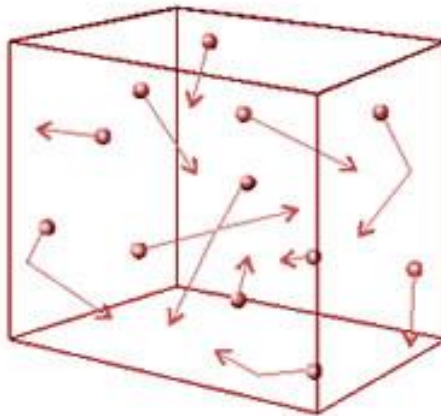


Figura 02: livre caminho médio de uma molécula.

Podemos obter o livre caminho médio de um gás através da equação:

$$\lambda = \frac{1}{2^{1/2} \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot n} \quad (1)$$

Onde temos que d_0 corresponde ao diâmetro molecular em metros, n corresponde a densidade de gás moléculas por segundo. Como podemos observar analisando a equação, o livre caminho médio depende diretamente da densidade do gás, e se a temperatura for constante também depende da pressão. Se estiver utilizando o gás em temperatura ambiente o livre caminho médio é mais facilmente calculado através da equação 02, a seguir:

$$\lambda \text{ (cm)} = \frac{0,005}{P \text{ (Torr)}} \quad (2)$$

2.3. Teoria Cinética dos Gases

Compreender a teoria cinética dos gases é a base para o entendimento do comportamento dos gases em relação a outros corpos, ou seja, a pressão que os gases exercem em outros corpos e também para estudarmos os sistemas de vácuo. Essa teoria mostra que as moléculas dos gases estão em movimento constante e desordenado, chocando-se elasticamente umas com as outras e também com as paredes do recipiente onde estão aprisionadas.

A equação dos gases perfeitos ou ideais é uma mistura das Leis de Boyle Mariotte, de Charles, de Avogadro e de Gay-Lussac.

$$p.V = N.k.T \quad (3)$$

Ou

$$p.V = n.R.T \quad (4)$$

As grandezas utilizadas nas equações dos gases perfeitos são: a pressão p , o volume V , a quantidade de gases em número de mols n ou número de moléculas N , temperatura T , concentração dos gases perfeitos R e a constante de Boltzmann k que é expressa como $k=1,03 \times 10^{-12}$ mbar.litro / K em sistemas de vácuo.

Em vácuo todos os gases reais se comportam como ideais, contanto que estejam abaixo da pressão de vapor em equilíbrio com a fase sólida ou líquida na temperatura considerada.

2.4. Throughput

Um dos conceitos mais utilizados em vácuo é o throughput. O throughput é conhecido como a quantidade de gás que passa por um plano, a uma pressão conhecida, em um determinado intervalo de tempo. Ou seja, é a vazão de um gás em uma seção de um tubo ligado ao sistema de vácuo.

O throughput pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q = \frac{d}{dt} (p \cdot V) \quad (5)$$

Onde, p é pressão, V é volume e t é o tempo. A unidade de medida do Throughput no SI é dada como $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, mas também pode ser usado J/s ou ainda W (Watts). Mas em tecnologia do vácuo é mais utilizado o $\text{mbar} \cdot \text{L/s}$.

Temos que levar muito em consideração os valores do throughput, em vista que é um grande parâmetro para se calcular a velocidade em que o sistema está sendo evacuado pela bomba (velocidade de bombeamento).

2.5. Condutância

A condutância está para sistemas de vácuo assim como a resistência está para circuitos elétricos, ou seja, a condutância nada mais é que a facilidade que o fluxo de gás tem para passar em um local com maior pressão para outro de menor pressão. Em sistemas de vácuo como o que utilizamos nesse trabalho a condutância é muito importante, pois é ela que determina a velocidade de bombeamento em que o sistema irá trabalhar como pode ser visto a seguir:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_b} + \frac{1}{C_t} \quad (6)$$

Onde S_{ef} é a velocidade efetiva de bombeamento, S_b é a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo e C_t é a condutância utilizada no sistema.

Analizando esta equação podemos perceber que se a condutância for muito pequena, não adianta colocarmos uma bomba de vácuo extremamente eficiente, pois não irá influenciar em praticamente nada a velocidade de bombeamento do sistema.

Como já citado o conceito de condutância se parece muito com o de resistência elétrica, se observarmos algumas grandezas de circuitos elétricos como diferença de potencial (ddp), corrente elétrica (i) e resistência (r), podemos afirmar que tais grandezas se equiparam respectivamente em sistemas de vácuo com diferença de pressão (Δp), Throughput (Q) e condutância (C). A figura 03 mostra as grandezas utilizadas para a obtenção da condutância:

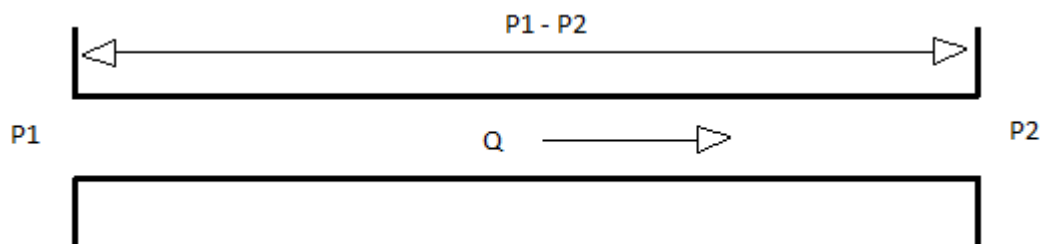


Figura 03: Fluxo de gás em um tubo.

Definindo a condutância em termos equacionáveis:

(7)

$$C = \frac{Q}{(p_1 - p_2)} [l/s]$$

Onde C é a condutância, Q é o Throughput e $p_1 - p_2$ é a diferença de pressão entre dois pontos distintos da tubulação que analisamos.

Através desta formula, podemos observar que o cálculo da condutância é realizado através de grandezas físicas, como: tempo, pressão e volume. Com isso faremos analogias sucessivas entre dados medidos e calculados considerando as características físicas de cada tipo de escoamento de gases.

2.6. Regime de Escoamento

O regime de escoamento é um item muito importante, pois ele influencia diretamente no valor da condutância de um sistema, isso acontece por que ele varia de acordo com a pressão e a velocidade de bombeamento. Podemos dividir o regime de escoamento em quatro categorias [3], elas são:

- 1- Regime de escoamento turbulento: este tipo de regime acontece, quando o sistema é bombeado em pressões elevadas, partindo da pressão atmosférica, o fluxo de gás tem uma velocidade muito elevada e as partículas tem um comportamento irregular com o tempo em cada ponto do gás, este tipo de comportamento causa redemoinhos oscilantes. Como mostra a figura 04 a seguir:

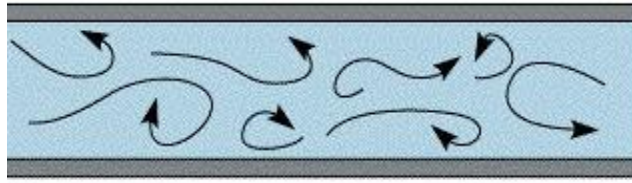


Figure 04: Regime de escoamento turbulento

2 – Regime de escoamento viscoso laminar: Neste regime o gás se desloca em camadas finas e sobrepostas uma sobre as outras. De forma em que a velocidade do mesmo seja maior na parte central do tubo e ao se aproximar das paredes a velocidade diminua, de forma que junto as paredes seja considerada nula. Como podemos ver na figura 05, a seguir:



Figura 05: Regime de escoamento viscoso laminar

3 – Regime viscoso molecular: Este regime ocorre apenas em baixas pressões e quando o livre caminho médio das moléculas excede o diâmetro do tubo. A figura 06 nos dá um exemplo disto:

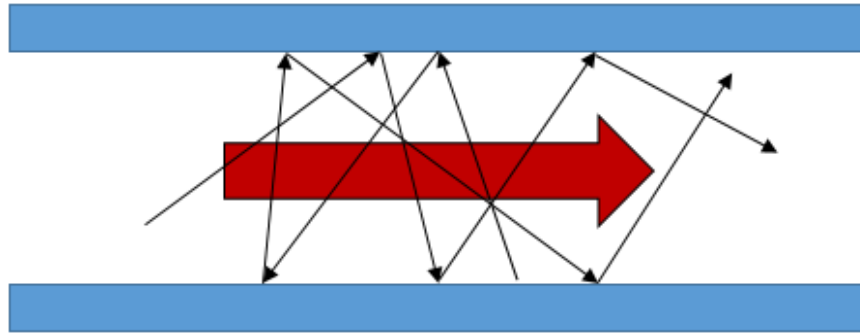


Figura 06: Regime viscoso molecular.

4 - Regime de escoamento de Knudsen: É um regime intermediário entre o regime viscoso laminar e o molecular. A diferença para o regime viscoso molecular é que não podemos mais considerar a velocidade perto das paredes do tubo nula. Podemos observar na figura 07, a seguir:

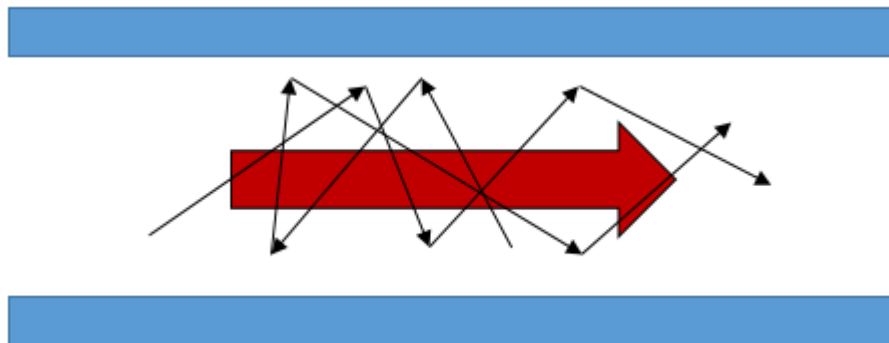


Figura 07: Regime de escoamento de Knudsen

2.7. Manômetros

O manômetro também chamado popularmente de “medidor de pressão”, como seu próprio nome popular já diz, é utilizado para realizar medidas de pressão na mecânica dos fluidos. Existem vários tipos de manômetros atualmente em utilização na indústria.

Existem diversas aplicações para os manômetros na indústria, algumas delas são:

- **Manômetros Utilitários:** Utilizado em sistemas de ar, sistemas hidráulicos, como por exemplo: redes de sistemas de alarme de incêndio e compressores de ar [2].
- **Manômetros Industriais:** Robusto, componentes reforçados e permite ser ajustado pelo operador. Utilizado como componente de quase todos os equipamentos industriais [2].
- **Manômetro Herméticos ou com Glicerina:** Manômetros de construção robusta, com mecanismos reforçados e recursos para ajuste. Com caixa estanque, pode ser preenchida com líquido amortecedor (glicerina ou silicone), adaptam especialmente a instalações que possuem vibrações ou pulsações da linha quando preenchido com líquido amortecedor [2].
- **Manômetro de aço inoxidável:** São manômetros construídos totalmente em aço inoxidável, caixa estanque, a prova de tempo, sua aplicação ocorre nas indústrias petroquímicas, papel e celulose, alimentares, nos produtos corrosivos, nas usinas e outras que exijam durabilidade, precisam e qualidade [2].
- **Manômetro Petroquímico:** São manômetros de processo em caixa de aço inoxidável, fenol, alumínio fundido e nylon, com componentes em aço inoxidável, estanque a prova de tempo, para aplicação nas indústrias petroquímicas, químicas, alimentícias, equipamentos industriais e outras que exijam durabilidade, precisão e qualidade [2].

2.7.1. Manômetros diretos.

Manômetros ou medidores diretos, podem ser considerados aqueles que utilizam o conceito de pressão como força normal exercida sobre uma superfície por unidade de área.

2.7.1.1. Manômetro McLeod

Foi desenvolvido em 1874, por H.G. McLeod e funciona da seguinte maneira: deixando o nível de mercúrio abaixo do nível de corte, como mostra a figura 08, o bulbo do medidor McLeod é ligado ao sistema de vácuo para que o McLeod obtenha a mesma pressão em que a câmara de vácuo está sendo submetida, o nível de mercúrio é controlado para subir até o nível de corte, para que o gás do volume que está sendo calibrado seja confinado no volume conhecido, desta forma temos a medida direta de pressão.

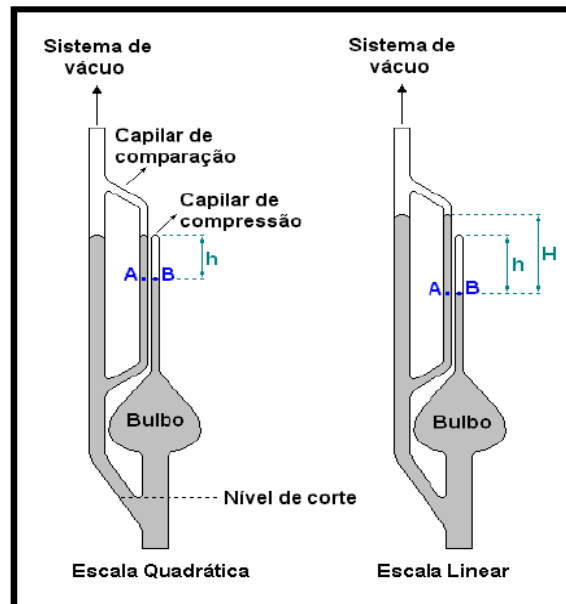


Figura 08: Esquematico de um McLeod [2].

2.7.1.2. Manômetro de Membrana Capacitiva

É um manômetro direto, cujo a medida de pressão acontece através de uma membrana que fica exposta ao ambiente onde deseja-se medir a pressão, esta membrana é deformada devido a força exercida pelo gás sobre ela. Esta membrana está ligada a um capacitor, com a mudança em sua geometria, ocorrida pela pressão que o gás exerce sobre

ela, acarreta uma mudança de capacitância que é medida e calibrada como função da pressão sobre a membrana.

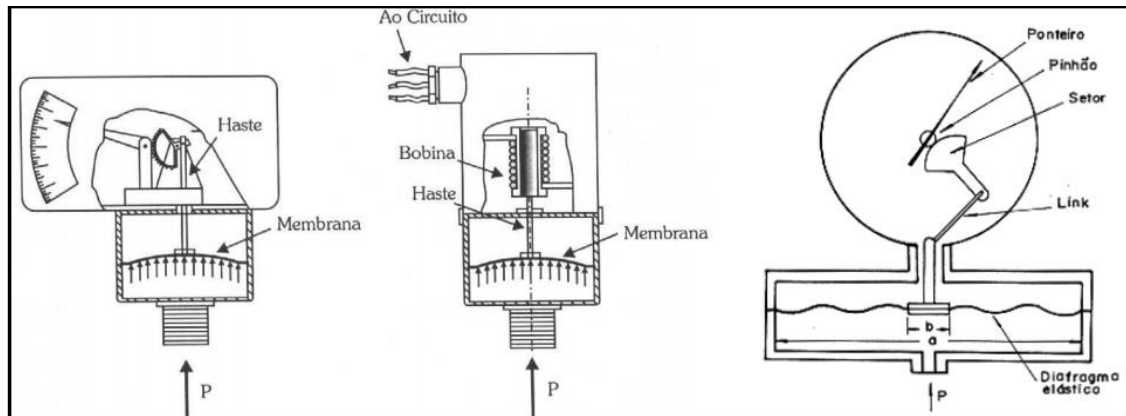


Figura 09: Funcionamento do Manômetro de Membrana Capacitiva

O manômetro de membrana capacitiva, necessita de apenas uma calibração para qualquer gás que irá ser utilizado no sistema de vácuo em que o manômetro irá ser utilizado.

2.7.2. Manômetros Indiretos

São manômetros que realizam a medida de pressão, através de parâmetros diferentes a pressão, tais como: temperatura, condutividade e corrente.

2.7.2.1. Manômetro Pirani

Desenvolvido no ano de 1906, por Marcello Pirani, é um robusto medidor de condutividade térmica, utilizado na indústria para a medição de pressão em sistemas de vácuo.

Tem como base a condutividade térmica dos gases, como indicador de pressão, estes medidores são utilizados para medir pressões desde a pressão atmosférica até 10^{-4}

Torr. O manômetro pirani trabalha através de uma ponte de wheatstone, como mostra a figura 10 a seguir:

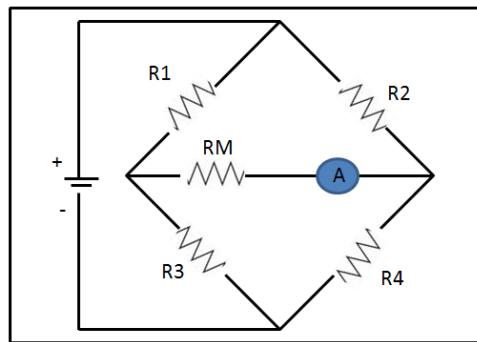


Figura 10: Funcionamento interno de um manômetro pirani.

2.8. Método da Pipeta

Método da pipeta é uma técnica desenvolvida para realizar a medição do throughput, de forma simples e rápida. O sistema utilizado para realizar esta medida de throughput é bem simples, e pode ser observado na figura 11, a seguir:

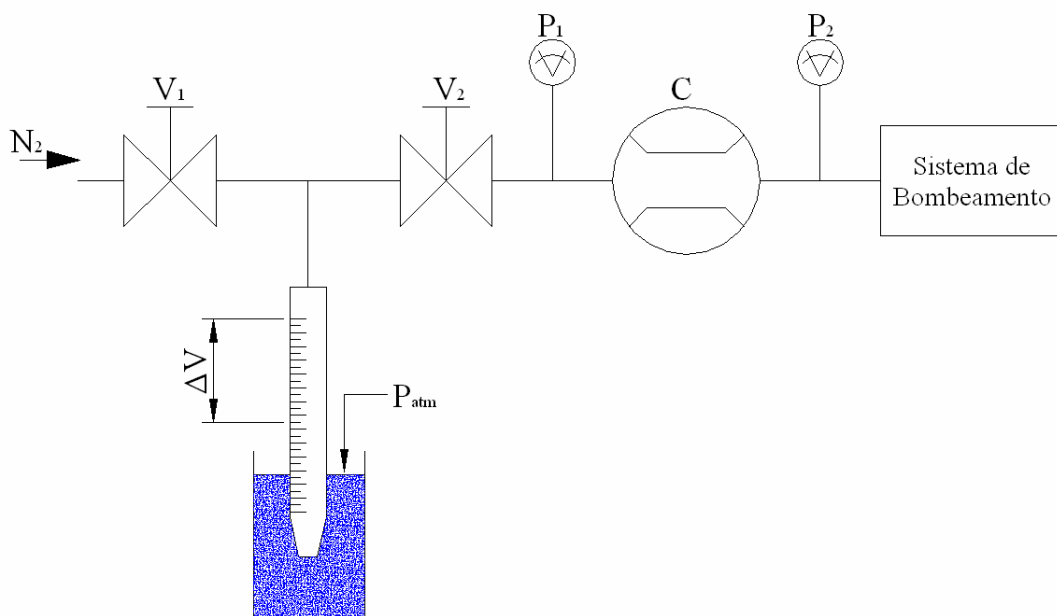


Figura 11: esquemático do método da pipeta

A técnica consiste em deixar a válvula V_1 aberta, de forma que o gás, no ocasião, N_2 seja bombeado pelo sistema de vácuo, fazendo com que a pipeta volumétrica que será utilizada para a medição de ΔV esteja 100% preenchida com o gás N_2 , deixando a pipeta com uma pressão interna maior que a pressão atmosférica.

Deve-se controlar a abertura da válvula V_2 de forma que exista uma diferença de pressão entre P_1 e P_2 , desta forma temos controle total sobre a diferença de pressão entre os medidores. De forma em que o gás N_2 ainda esteja sendo bombeado dentro do sistema.

Tendo uma pressão definida para P_1 e P_2 , fechamos a válvula V_1 , com isto o fluido (óleo de silicone) será bombeado a uma certa velocidade, dentro da pipeta volumétrica. Determinando-se um ΔV , mede-se o tempo em que o fluido levou para percorrer este volume ΔV , assim é determinado a variação de volume pelo tempo, desta forma podemos calcular o valor do throughput, através da equação a seguir:

$$Q = P_{atm} \cdot \frac{d}{dt} (p \cdot V) \quad (5)$$

Desta forma, com o throughput calculado, podemos realizar os cálculos da condutância, pressão e velocidade de bombeamento do sistema.

3. Materiais e Montagem do Sistema

Neste tópico iremos tratar dos principais materiais utilizados no desenvolvimento das experiências realizadas neste projeto, também será disposto os métodos de montagem do sistema.

3.1. Materiais Utilizados

3.1.1. Aparato Experimental

Os equipamentos a seguir foram utilizados para a montagem do sistema.

- Bomba Mecânica de Palhetas de Duplo Estágio **Alcatel Pascal 2010 SD**

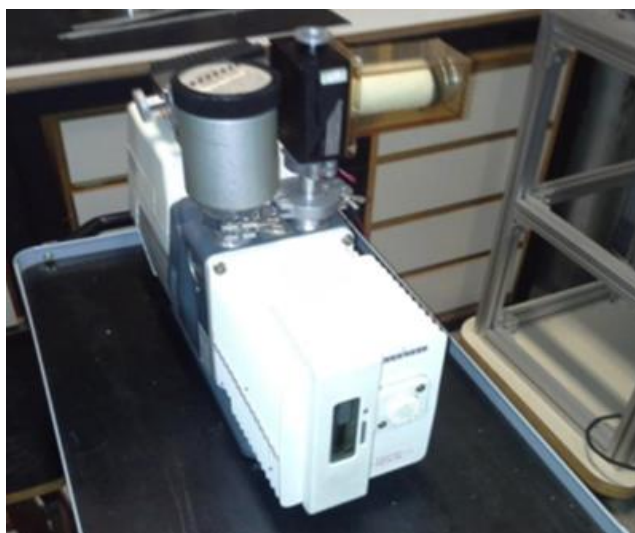


Figura 12: Bomba Mecânica de Palhetas de Duplo Estágio Alcatel Pascal 2010 SD

A tabela a seguir mostra alguns dados referentes a bomba mecânica de palhetas de duplo estágio:

Características Técnicas da Bomba	
Velocidade de Bombeamento	2,8 (l/s)
Pressão Final (Gás Ballast Fechado)	10^{-3} Torr
Pressão Final (Gás Ballast Aberto)	10^{-2} Torr

➤ Medidor de membrana capacitiva **Leybold Ceravac Transmitter**

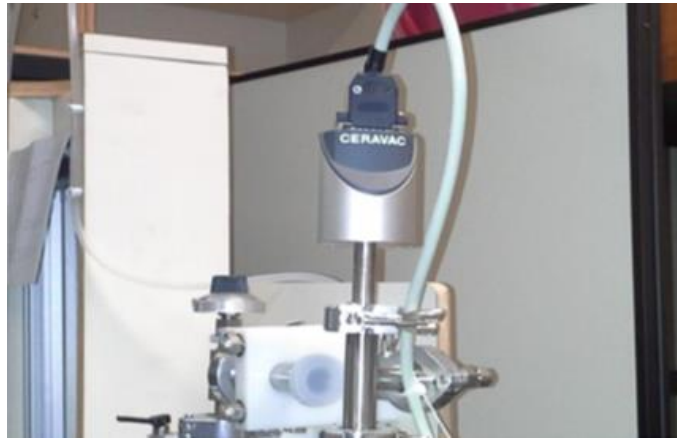


Figura 13: Medidor de Membrana Capacitiva Leybold Ceravac Transmitter

Para a obtenção de dados experimentais do sistemas, utilizamos dois medidores deste modelo, em faixas de pressões diferentes um do outro. Sendo um medidor operando na faixa de pressão de 10^{-1} à 1000 mbar, e outro medidor na faixa de 10^{-2} à 100 mbar.



Figura 14: Unidade Controladora Leybold Center Two

Este equipamento trabalha como unidade controladora do medidor de Membrana Capacitiva, onde podemos observar no display as pressões em que o medidor está obtendo no sistema.

3.2. Caracterização do Sistema de Vácuo

O sistema de vácuo foi desenvolvido com o intuito de poder trabalhar com diferentes grandezas existentes em sistemas de vácuo, tais como: condutância, throughput (vazão), velocidade efetiva de bombeamento e cálculo de pressões. De forma que se fosse necessário rearranjar o sistema, retirar componentes ou trocar, estivesse de maneira fácil para o fazer. A seguir teremos as figuras 15 que mostrara um esquemático do sistema de vácuo.

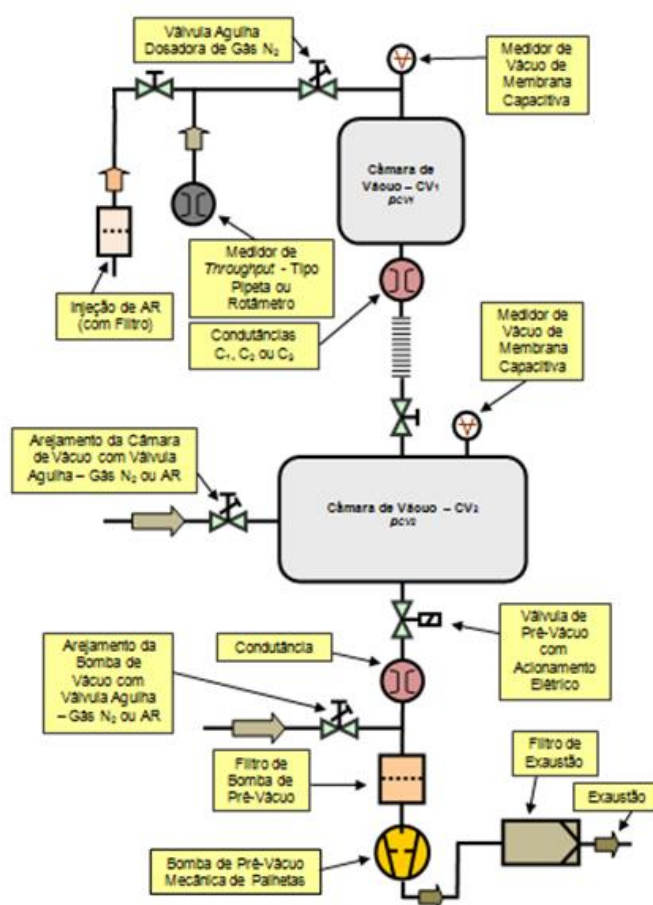


Figura 15: Esquemático do sistema de vácuo.

O sistema foi montado com duas câmaras de vácuo de volumes bem diferente, a câmara de vácuo superior a qual chamamos de câmara de vácuo 1 (CV₁), possui um volume aproximadamente de (1,3 ± 0,1) L, enquanto a câmara de vácuo inferior, que demos o nome de câmara de vácuo 2 (CV₂) possui um volume aproximado de (48,0 ± 0,1) L.

Duas condutâncias foram utilizadas no sistema, a primeira, a qual chamaremos de C₁ foi instalada entre as câmaras de vácuo CV₁ e CV₂, fazendo com que forma-se um gargalo, de forma que a velocidade de bombeamento entre uma câmara e outra seja pequena. E também foi instalada uma condutância que iremos chamar de C₂ na saída da bomba mecânica de palhetas para o sistema de vácuo, isto foi feito, para que a velocidade efetiva de bombeamento do sistema fosse menor.

3.3. Modelagem do Sistema

A modelagem do sistema, foi desenvolvida com o intuito de se encontrar o valor de pressão da câmara CV₁, através da equação de processo de bombeamento em vácuo.

Para a realização destes cálculos partimos do seguinte princípio:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt} = C_1 \cdot (p_1 - p_2) = S_{ef2} \cdot p_2 \quad (8)$$

O throughput Q₁, é calculado com ajuda do método da pipeta, que basicamente refere-se a uma diferença de volume em uma coluna em um determinado intervalo de tempo. Relacionando estas diferenças com a pressão atmosférica pode-se chegar ao cálculo do throughput, que é a primeira grandeza que precisamos chegar, desta forma pode-se dizer que:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt} \quad (9)$$

Conhecendo a equação da condutância:

$$C_1 = \frac{Q_1}{(p_1 - p_2)} \quad (7)$$

Partindo deste princípio e conhecendo os valores de Q_1 e p_2 , podemos calcular p_1 , da seguinte maneira:

$$C_1 \cdot p_1 = Q_1 - C_1 \cdot p_2 \quad (10)$$

Portanto,

$$p_1 = \frac{Q_1 - C_1 \cdot p_2}{C_1} = \frac{Q_1}{C_1} - p_2 \quad (11)$$

$$C_1 = 136 \cdot \frac{d^4}{L} \cdot \frac{(p_1 + p_2)}{2} \quad (12)$$

Considerando que:

$$136 \cdot \frac{d^4}{L} \quad (13)$$

Seja uma constante, que podemos chamar de A , então:

$$A = 136 \cdot \frac{d^4}{L} \quad (14)$$

E podemos também dizer que A' , seja:

$$A' = \frac{A}{2} \quad (15)$$

Com isto, podemos dizer que:

$$C_1 = A' \cdot (p_1 + p_2) \quad (16)$$

Substituindo esta nova equação de C_1 , na equação (11), temos que:

$$p_1 = \frac{Q_1}{\frac{A}{2} \cdot (p_1 + p_2)} - p_2 = \frac{Q_1}{A' \cdot p_1 + A' \cdot p_2} - p_2 \quad (17)$$

$$(p_1 + p_2) \cdot (A' \cdot p_1 + A' \cdot p_2) = Q_1 \quad (18)$$

$$(p_1 + p_2) \cdot A' \cdot (p_1 + p_2) = Q_1 \quad (19)$$

$$(p_1 + p_2)^2 = \frac{Q_1}{A'} \quad (20)$$

$$p_1 + p_2 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} \quad (21)$$

Trabalhando encima da equação (17), chegamos até a equação (22), que nos mostra que a pressão p_1 , depende do throughput, condutância e também da pressão p_2 :

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} - p_2 \quad (21)$$

Substituindo Q_1 , pela equação (9), temos que:

$$p_1 = \sqrt{\frac{p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt}}{A'}} - p_2 \quad (22)$$

Com todas essas grandezas calculadas, podemos calcular também a velocidade efetiva de bombeamento (S_{ef2}) através da equação (23).

$$S_{ef2} = \frac{Q_1}{p_2} \quad (23)$$

3.4. Montagem do Sistema

O sistema vácuo foi todo elaborado e montado no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec – SP). Por se tratar de um sistema de vácuo relativamente grande, e não disponibilizarmos de grande espaço no laboratório, decidimos por montar parte do sistema na vertical, para diminuir o espaço horizontal utilizados pelo mesmo. O sistema de vácuo completo pode ser observado nas imagens 16 e 17 abaixo, por se tratar de um sistema de vácuo relativamente grande, não conseguimos juntar ele todo em apenas uma imagem.



Figura 16: Sistema de vácuo



Figura 17: Câmara 02 (dois) e parte lateral do sistema de vácuo

As câmaras de vácuo utilizadas na montagem do sistema de vácuo, foram construídas a partir de aço inoxidável 304 ou 304L. As superfícies internas e externas foram polidas mecanicamente para que fosse diminuído o efeito de desgaseificação dentro das câmaras de vácuo.

A limpeza das câmaras de vácuo e conexões utilizadas foi feita com a utilização de detergente neutro e feito o enxágue com água corrente. Para uma secagem mais rápida utilizamos um soprador serigráfico, e após feito isto reforçamos a limpeza com álcool isopropílico. Após o termino da limpeza o franges foram protegidos com papel alumínio para proteger contra sujeiras que eventualmente poderiam entrar nas peças.

Todas as conexões utilizadas no sistema de vácuo foram feitas através de KF-10, KF-16 e KF 25. Levando em consideração que a última (KF-25) foi utilizada apenas para a conexão da bomba mecânica de palhetas ao sistema de vácuo.

Como se pode ver na figura 18 e 19 a seguir, as bases para a montagem do sistema foram feitas de madeira e com suportes para as câmaras de vácuo e conexões em polímero.



Figura 18: Base de sustentação do sistema de vácuo construída de madeira



Figura 19: Suportes para conexões e câmaras de vácuo feitos em polímero.

A câmara de vácuo de número 02 (dois) e a bomba de vácuo mecânica de palhetas, por se tratarem de equipamentos maiores e mais pesados ficaram fora desta estrutura, como pode mostrar a figura 19, a seguir:



Figura 20: Estrutura de suporte para câmara de vácuo 02 (dois) e bomba mecânica de palhetas.

4. Procedimento Experimental

4.1. Coleta de Dados

Para a realização da coleta de dados de pressão foram utilizados 02 (dois) medidores de pressão do tipo membrana capacitiva do modelo Leybold Ceravac Transmitter, com um dos medidores trabalhando na faixa de pressão de 10^{-1} à 1000 mbar, e outro medidor na faixa de 10^{-2} à 100 mbar. Para o controle destas medidas foi utilizada a unidade controladora do medidor de pressão de membrana capacitiva no modelo Leybold Center Two, que suporta a entrada de dados de até 02 (dois) medidores pressão de membrana capacitiva.

Para coletar os dados da coluna de óleo de silicone, na utilização do método da pipeta, foi utilizada uma webcam para realizar a gravação de vídeos que mostram a

movimentação do óleo de silicone na pipeta. Após feita a gravação foi utilizado o programa windows media player classic, para realizar a coleta de pontos, que foi realizada ponto a ponto, com intervalo entre os pontos de 1 segundo. Os pontos foram analisados utilizando o programa excel, montando uma tabela para cada grupo de coleta de dados e através desta tabela montamos um gráfico, para haver melhor compreensão dos dados estudados. Como mostra a figura 22 abaixo:



Figura 21: Webcam utilizada na gravação do método da pipeta

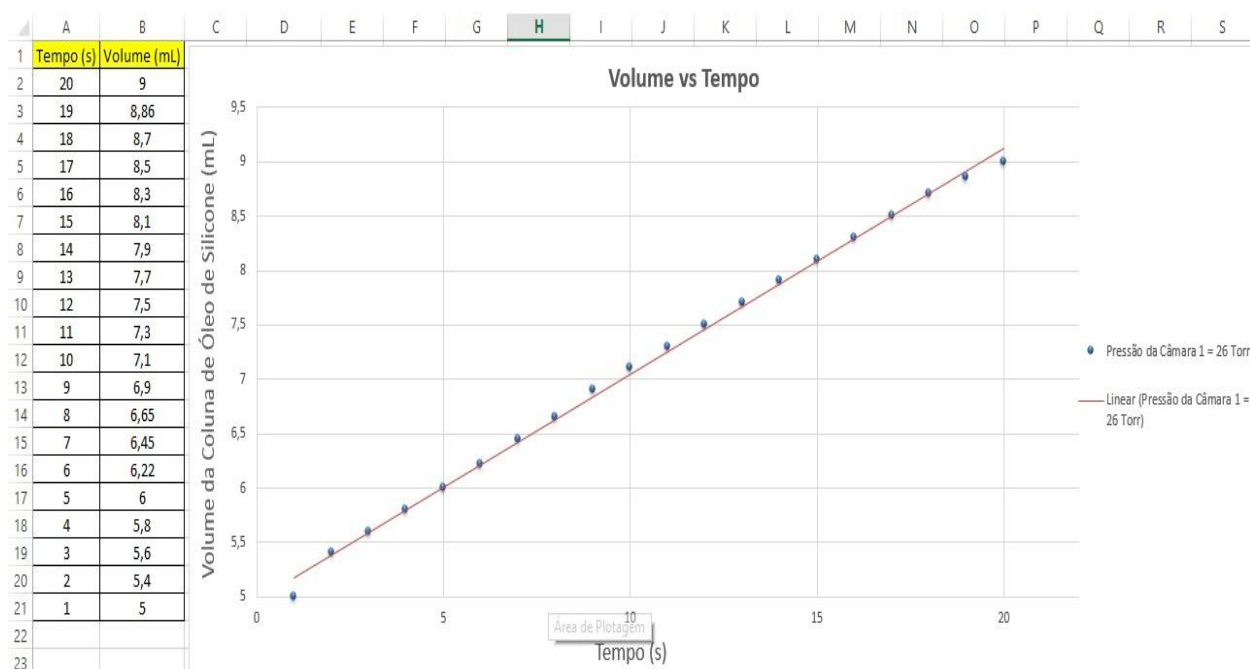


Figura 22: Exemplo de análise de dados através do excel.

4.2. Procedimento Experimental

O experimento foi dividido em 4 parte:

- 1º parte com a pressão de $CV_1 = 16$ mbar e pressão de $CV_2 = 12,1$ mbar
- 2º parte com a pressão de $CV_1 = 35,5$ mbar e pressão de $CV_2 = 20$ mbar
- 3º parte com a pressão de $CV_1 = 46,9$ mbar e pressão de $CV_2 = 26,7$ mbar
- 4º parte com a pressão de $CV_1 = 56,8$ mbar e pressão de $CV_2 = 35,2$ mbar

Partindo do princípio que a linha de bombeamento esteja ligada, dividimos o procedimento de obtenção de dados em 5 etapas, elas são:

1ª etapa: estabilizar a pressão de CV_1 e CV_2 , utilizando a válvula agulha para dosagem de gás que entra no sistema.

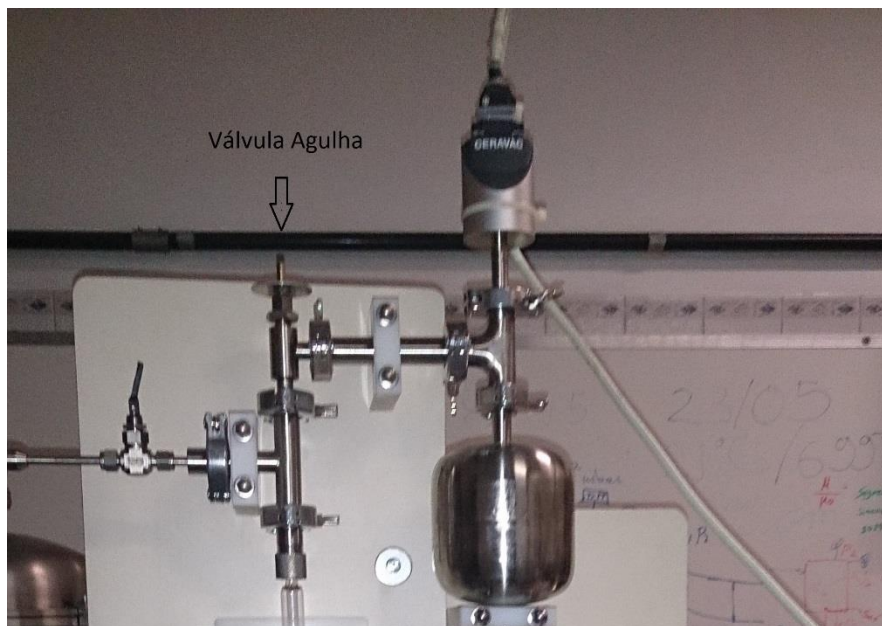


Figura 23: Válvula agulha, usada para dosagem do gás que está entrando no sistema

2ª etapa: após estabilizada as pressões CV_1 e CV_2 , fechar a válvula de entrada de gás no sistema.

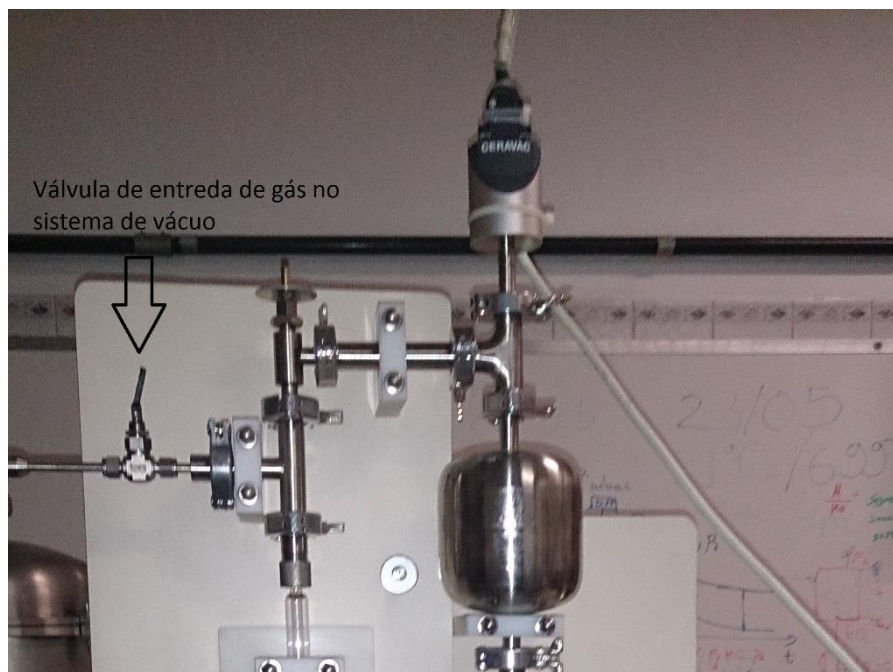


Figura 24: Válvula de entrada de gás no sistema de vácuo.

3ª etapa: com o fechamento da válvula de gás, o sistema irá começar a bombear o gás que encontra-se dentro da pipeta, com isto o óleo de silicone irá começar a se movimentar. Para coleta de pontos foi necessário a filmagem do movimento do volume de óleo de silicone dentro da pipeta.

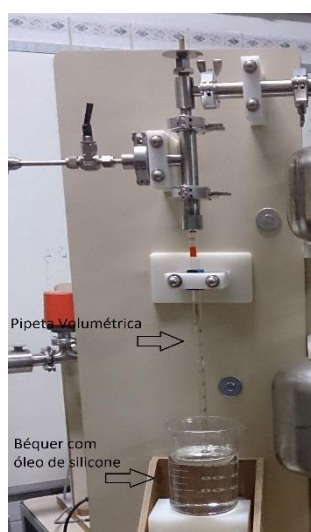


Figura 25: Pipeta volumétrica e béquer com óleo de silicone utilizados na coleta dos dados da experiência.

5ª etapa: abrir a válvula da figura 24, para que o óleo de silicone pare de ser bombeado para dentro do sistema de vácuo, e com isto o danifique.

6ª etapa: utilizar um computador para coletar os pontos dos vídeos feitos, filmando a variação do volume num período de tempo. A coleta foi feita com intervalos de 1 em 1 segundo.

5. Resultados

Através dos dados coletados com a filmagem da pipeta volumétrica no momento da experiência, foi possível montar quatro gráficos, com 4 pressões diferentes. Através destes dados, conseguimos realizar os cálculos para comparação da pressão medida pelo medidor de vácuo que ainda não foi calibrado, com a pressão obtida através da teoria.

5.1. Medição 1

Medição realizada com o medidor de vácuo da câmara 1 (CV₁) com pressão de 16 mbar. Como podemos observar no gráfico 01.

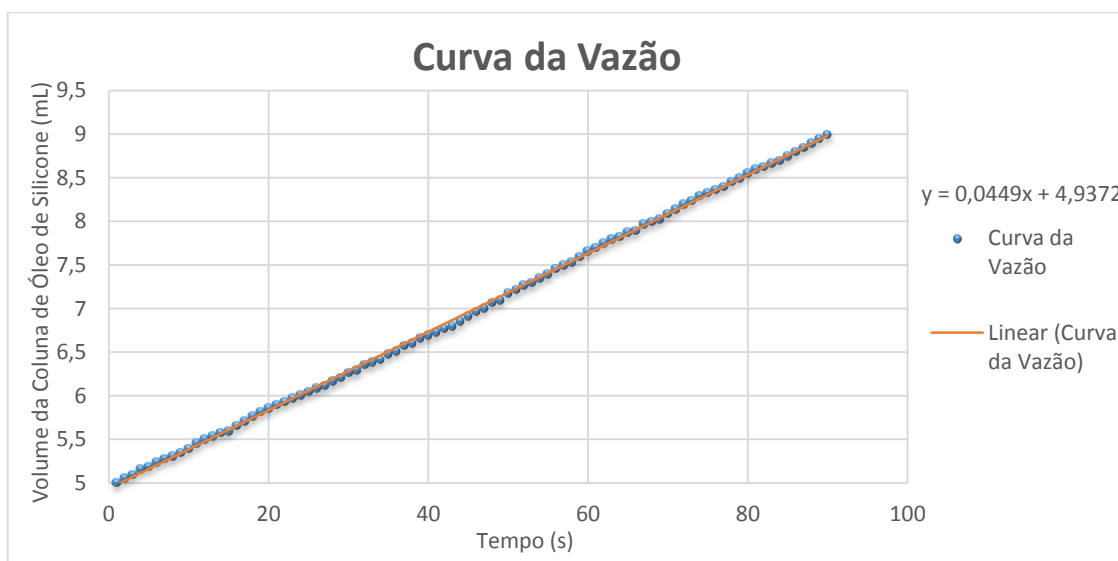


Gráfico 01: curva da vazão, para pressão em CV = $(16,48 \pm 0,04)$ mbar.

Sabendo-se que utilizaremos a pressão da câmara de vácuo CV₂, medida em um medidor com calibração confiável para chegarmos a um valor de pressão da câmara de vácuo CV₁ confiável, através de cálculos para comparar com a medida de pressão feita pelo medidor não calibrado.

Temos os seguintes dados:

Pressão em CV₂ (p₂) = (12,138 ± 0,004) mbar – pressão confiável, por se tratar de um medidor de vácuo já calibrado.

Pressão em CV₁ (p₁) = (16,48 ± 0,04) mbar – pressão a ser estudada, por se tratar de um medidor de vácuo que necessita ser calibrado.

Diferença de volume numa certa variação de tempo ΔV = 4,9 mL.

Variação de tempo Δt = 90 s.

Diâmetro interno da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, d = 0,05 cm.

Comprimento da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, L = 6 cm.

Considerando a pressão atmosférica como sendo P_{atm} = 933 mbar.

Com todos estes dados, podemos dar início aos cálculos, começando pela equação (9) que nos mostra o valor do throughput:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt}$$

$$Q_1 = 933 \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{90}$$

$$Q_1 = 5,08 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$$

Com Q₁ calculado, agora podemos partir para o cálculo da pressão(p₁), para podermos comparar com a pressão mostrada pelo medidor de vácuo.

Antes de partirmos para a equação (21), precisamos calcular A e A' através das equações (14) e (15) respectivamente.

$$A = 136 \cdot \frac{d^4}{L}$$

$$A = 136 \cdot \frac{0,05^4}{6}$$

$$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$$

$$A' = \frac{A}{2}$$

$$A' = \frac{1,42 \cdot 10^{-4}}{2}$$

$$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$$

Após obtermos as medidas de Q_1 , A' e utilizando p_2 , podemos calcular p_1 .

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} - p_2$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{5,08 \cdot 10^{-2}}{7,08 \cdot 10^{-5}}} - 12,1$$

$$p_1 = (14,73 \pm 0,05) \text{ mbar}$$

Tendo agora as pressões p_1 e p_2 , e também Q_1 , podemos calcular a condutância entre as câmaras de vácuo CV₁ e CV₂, utilizando a equação (07).

$$C_1 = \frac{Q_1}{(p_1 - p_2)}$$

$$C_1 = \frac{5,08 \cdot 10^{-2}}{(14,69 - 12,1)}$$

$$C_1 = 1,96 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$$

E também utilizando Q_1 (throughput) e p_2 (pressão de CV₂), podemos calcular S_{ef2} (velocidade efetiva de bombeamento). Através da equação (23).

$$S_{ef2} = \frac{Q_1}{p_2}$$

$$S_{ef2} = \frac{5,08 \cdot 10^{-2}}{12,1}$$

$$S_{ef2} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ L/s}$$

O resultados encontrados para a medição 1 foram:

$Q_1 = 5,08 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$	$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$
$p_1 = (14,73 \pm 0,05) \text{ mbar}$	$C_1 = 1,96 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$	$S_{ef2} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ L/s}$

Se compararmos a pressão de CV₁, calculado que corresponde a $p_1 = (14,73 \pm 0,05) \text{ mbar}$ com a pressão que o medidor de vácuo conectado a câmara CV₁, que não estava calibrado, que é $p_1 = (16,48 \pm 0,03) \text{ mbar}$. Podemos considerar que para um protótipo que ainda precisa ser aperfeiçoado, obtivemos valores interessantes.

5.2. Medição 2

Medição realizada com o medidor de vácuo da câmara 1 (CV₁) com pressão de 35,5 mbar. Como podemos observar no gráfico 02.

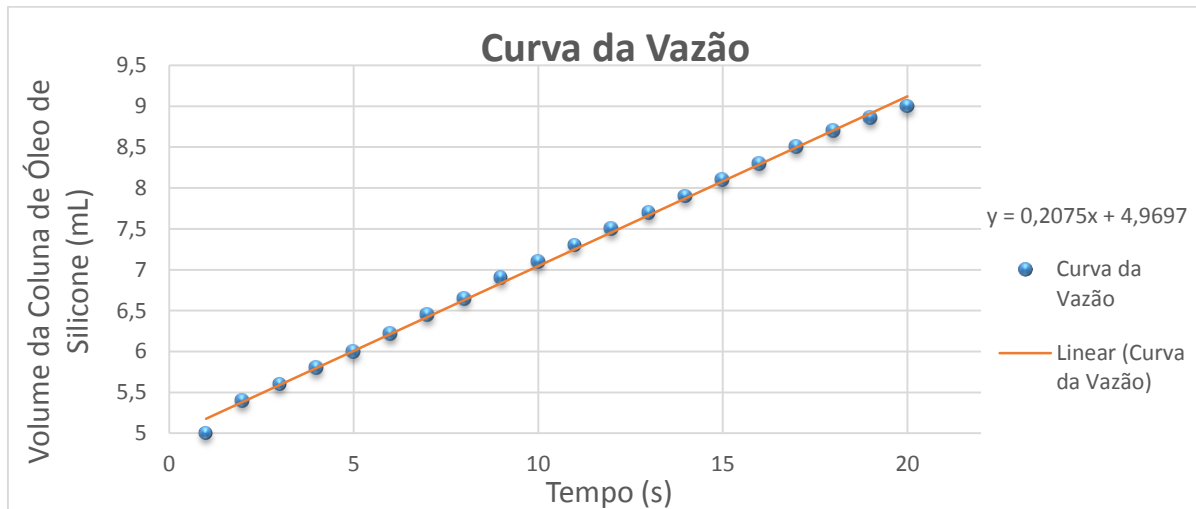


Gráfico 02: Curva de vazão, para pressão em CV = $(35,49 \pm 0,04)$ mbar.

Sabendo-se que utilizaremos a pressão da câmara de vácuo CV₂, medida em um medidor com calibração confiável para chegarmos a um valor de pressão da câmara de vácuo CV₁ confiável, através de cálculos para comparar com a medida de pressão feita pelo medidor não calibrado.

Temos os seguintes dados:

Pressão em CV₂ (p_2) = $(19,927 \pm 0,004)$ mbar – pressão confiável, por se tratar de um medidor de vácuo já calibrado.

Pressão em CV₁ (p_1) = $(35,49 \pm 0,04)$ mbar – pressão a ser estudada, por se tratar de um medidor de vácuo a ser calibrado.

Diferença de volume numa certa variação de tempo $dV = 4$ mL.

Variação de tempo $dt = 20$ s.

Diâmetro interno da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, d = 0,05 cm.

Comprimento da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, L = 6 cm.

Considerando a pressão atmosférica como sendo P_{atm} = 933 mbar.

Com todos estes dados, podemos dar início aos cálculos, começando pela equação (9) que nos mostra o valor do throughput:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt}$$

$$Q_1 = 933 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{20}$$

$$Q_1 = 0,187 \text{ mbar} \cdot L/s$$

Com Q₁ calculado, agora podemos partir para o cálculo da pressão(p₁), para podermos comparar com a pressão mostrada pelo medidor de vácuo.

Antes de partirmos para a equação (21), precisamos calcular A e A' através das equações (14) e (15) respectivamente.

$$A = 136 \cdot \frac{d^4}{L}$$

$$A = 136 \cdot \frac{0,05^4}{6}$$

$$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$$

$$A' = \frac{A}{2}$$

$$A' = \frac{1,42 \cdot 10^{-4}}{2}$$

$$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$$

Após obtermos as medidas de Q_1 , A' e utilizando p_2 , podemos calcular p_1 .

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} - p_2$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{0,187}{7,08 \cdot 10^{-5}}} - 20$$

$$p_1 = (31,34 \pm 0,07) \text{ mbar}$$

Tendo agora as pressões p_1 e p_2 , e também Q_1 , podemos calcular a condutância entre as câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 , utilizando a equação (07).

$$C_1 = \frac{Q_1}{(p_1 - p_2)}$$

$$C_1 = \frac{0,187}{(31,34 - 20)}$$

$$C_1 = 0,0165 \text{ L/s}$$

E também utilizando Q_1 (throughput) e p_2 (pressão de CV_2), podemos calcular S_{ef2} (velocidade efetiva de bombeamento). Através da equação (23).

$$S_{ef2} = \frac{Q_1}{p_2}$$

$$S_{ef2} = \frac{0,187}{20}$$

$$S_{ef2} = 9,33 \cdot 10^{-3} \text{ L/s}$$

O resultados encontrados para a medição 2 foram:

$Q_1 = 0,187 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$	$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$
$p_1 = (31,34 \pm 0,07) \text{ mbar}$	$C_1 = 0,0165 \text{ L/s}$	$S_{ef2} = 9,33 \cdot 10^{-3} \text{ L/s}$

Se compararmos a pressão de CV₁, calculado que corresponde a $p_1 = (31,34 \pm 0,05) \text{ mbar}$ com a pressão que o medidor de vácuo conectado a câmara CV₁, que não estava calibrado, que é $p_1 = (35,49 \pm 0,04) \text{ mbar}$. Podemos considerar que para um protótipo que ainda precisa ser aperfeiçoado, obtivemos valores interessantes.

5.3. Medição 3

Medição realizada com o medidor de vácuo da câmara 1 (CV₁) com pressão de 46,86 mbar. Como podemos observar no gráfico 03.

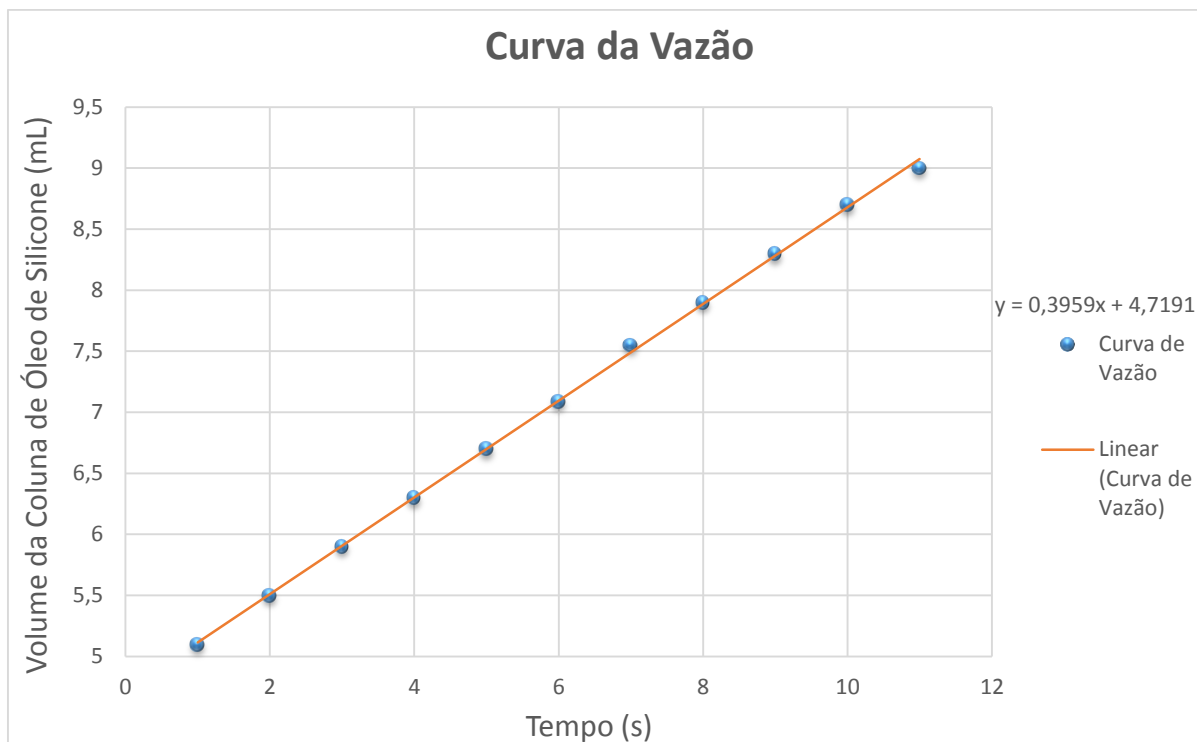


Gráfico 03: Curva de vazão, para pressão em CV = $(46,86 \pm 0,04)$ mbar.

Sabendo-se que utilizaremos a pressão da câmara de vácuo CV₂, medida em um medidor com calibração confiável para chegarmos a um valor de pressão da câmara de vácuo CV₁ confiável, através de cálculos para comparar com a medida de pressão feita pelo medidor não calibrado.

Temos os seguintes dados:

Pressão em CV₂ (p_2) = $(26,663 \pm 0,004)$ mbar – pressão confiável, por se tratar de um medidor de vácuo já calibrado.

Pressão em CV₁ (p_1) = $(46,86 \pm 0,04)$ mbar – pressão a ser estudada, por se tratar de um medidor de vácuo a ser calibrado.

Diferença de volume numa certa variação de tempo $dV = 3,99$ mL.

Variação de tempo $dt = 11$ s.

Diâmetro interno da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, $d = 0,05$ cm.

Comprimento da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, $L = 6$ cm.

Considerando a pressão atmosférica como sendo $P_{atm} = 933$ mbar.

Com todos estes dados, podemos dar início aos cálculos, começando pela equação (9) que nos mostra o valor do throughput:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dVp^{(t)}}{dt}$$

$$Q_1 = 933 \cdot \frac{3,99 \cdot 10^{-3}}{11}$$

$$Q_1 = 0,338 \text{ mbar} \cdot L/s$$

Com Q_1 calculado, agora podemos partir para o cálculo da pressão(p_1), para podermos comparar com a pressão mostrada pelo medidor de vácuo.

Antes de partirmos para a equação (21), precisamos calcular A e A' através das equações (14) e (15) respectivamente.

$$A = 136 \cdot \frac{d^4}{L}$$

$$A = 136 \cdot \frac{0,05^4}{6}$$

$$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$$

$$A' = \frac{A}{2}$$

$$A' = \frac{1,42 \cdot 10^{-4}}{2}$$

$$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$$

Após obtermos as medidas de Q_1 , A' e utilizando p_2 , podemos calcular p_1 .

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} - p_2$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{0,338}{7,08 \cdot 10^{-5}}} - 26,66$$

$$p_1 = (42,43 \pm 0,06) \text{ mbar}$$

Tendo agora as pressões p_1 e p_2 , e também Q_1 , podemos calcular a condutância entre as câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 , utilizando a equação (07).

$$C_1 = \frac{Q_1}{(p_1 - p_2)}$$

$$C_1 = \frac{0,338}{(42,43 - 26,66)}$$

$$C_1 = 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ L/s}$$

E também utilizando Q_1 (throughput) e p_2 (pressão de CV_2), podemos calcular S_{ef2} (velocidade efetiva de bombeamento). Através da equação (23).

$$S_{ef2} = \frac{Q_1}{p_2}$$

$$S_{ef2} = \frac{0,1866}{20}$$

$$S_{ef2} = 1,27 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$$

O resultados encontrados para a medição 3 foram:

$Q_1 = 0,338 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$	$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$
$p_1 = (42,43 \pm 0,06) \text{ mbar}$	$C_1 = 2,14 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$	$S_{ef2} = 1,27 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$

Se compararmos a pressão de CV₁, calculado que corresponde a $p_1 = (42,43 \pm 0,05) \text{ mbar}$ com a pressão que o medidor de vácuo conectado a câmara CV₁, que não estava calibrado, que é $p_1 = (46,86 \pm 0,04) \text{ mbar}$. Podemos considerar que para um protótipo que ainda precisa ser aperfeiçoado, obtivemos valores interessantes.

5.4. Medição 4

Medição realizada com o medidor de vácuo da câmara 1 (CV₁) com pressão de 56,76 mbar. Como podemos observar no gráfico 04.

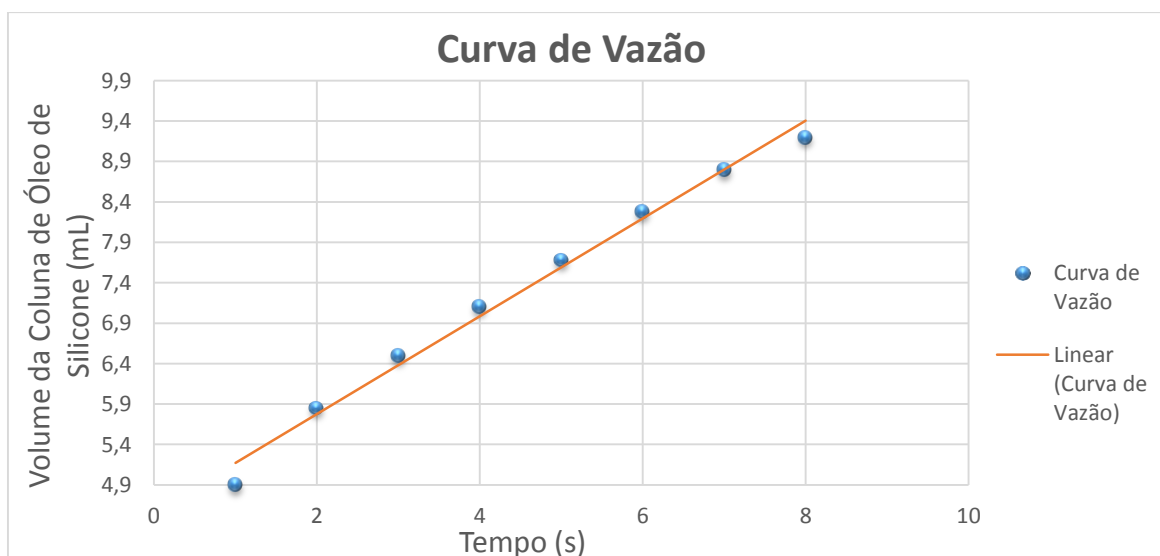


Gráfico 04: curva da vazão, para pressão em CV = $(56,76 \pm 0,04) \text{ mbar}$.

Sabendo-se que utilizaremos a pressão da câmara de vácuo CV₂, medida em um medidor com calibração confiável para chegarmos a um valor de pressão da câmara de vácuo CV₁ confiável, através de cálculos para comparar com a medida de pressão feita pelo medidor não calibrado.

Temos os seguintes dados:

Pressão em CV₂ (p_2) = (35,203 ± 0,004) mbar – pressão confiável, por se tratar de um medidor de vácuo já calibrado.

Pressão em CV₁ (p_1) = (56,76 ± 0,04) mbar – pressão a ser estudada, por se tratar de um medidor de vácuo a ser calibrado.

Diferença de volume numa certa variação de tempo $dV = 4,3$ mL.

Variação de tempo $dt = 8$ s.

Diâmetro interno da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, $d = 0,05$ cm.

Comprimento da condutância usada entre as câmaras CV₁ e CV₂, $L = 6$ cm.

Considerando a pressão atmosférica como sendo $P_{atm} = 933$ mbar.

Com todos estes dados, podemos dar início aos cálculos, começando pela equação (9) que nos mostra o valor do throughput:

$$Q_1 = p_{atm} \cdot \frac{dV p^{(t)}}{dt}$$

$$Q_1 = 933 \cdot \frac{4,8 \cdot 10^{-3}}{8}$$

$$Q_1 = 0,560 \text{ mbar} \cdot L/s$$

Com Q_1 calculado, agora podemos partir para o cálculo da pressão(p_1), para podermos comparar com a pressão mostrada pelo medidor de vácuo.

Antes de partirmos para a equação (21), precisamos calcular A e A' através das equações (14) e (15) respectivamente.

$$A = 136 \cdot \frac{d^4}{L}$$

$$A = 136 \cdot \frac{0,05^4}{6}$$

$$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$$

$$A' = \frac{A}{2}$$

$$A' = \frac{1,42 \cdot 10^{-4}}{2}$$

$$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$$

Após obtermos as medidas de Q_1 , A' e utilizando p_2 , podemos calcular p_1 .

$$p_1 = \sqrt{\frac{Q_1}{A'}} - p_2$$

$$p_1 = \sqrt{\frac{0,560}{7,08 \cdot 10^{-5}}} - 35,20$$

$$p_1 = (53,72 \pm 0,09) \text{ mbar}$$

Tendo agora as pressões p_1 e p_2 , e também Q_1 , podemos calcular a condutância entre as câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 , utilizando a equação (07).

$$C_1 = \frac{Q_1}{(p_1 - p_2)}$$

$$C_1 = \frac{0,560}{(53,72 - 35,20)}$$

$$C_1 = 3,02 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$$

E também utilizando Q_1 (throughput) e p_2 (pressão de CV_2), podemos calcular S_{ef2} (velocidade efetiva de bombeamento). Através da equação (23).

$$S_{ef2} = \frac{Q_1}{p_2}$$

$$S_{ef2} = \frac{0,560}{35,20}$$

$$S_{ef2} = 1,59 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$$

O resultados encontrados para a medição 4 foram:

$Q_1 = 0,560 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$	$A = 1,42 \cdot 10^{-4}$	$A' = 7,08 \cdot 10^{-5}$
$p_1 = (53,72 \pm 0,09) \text{ mbar}$	$C_1 = 3,02 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$	$S_{ef2} = 1,59 \cdot 10^{-2} \text{ L/s}$

Se compararmos a pressão de CV_1 , calculado que corresponde a $p_1 = (53,72 \pm 0,05) \text{ mbar}$ com a pressão que o medidor de vácuo conectado a câmara CV_1 , que não estava calibrado, que é $p_1 = (56,76 \pm 0,04) \text{ mbar}$. Podemos considerar que para um protótipo que ainda precisa ser aperfeiçoado, obtivemos valores interessantes.

6. Conclusão e Perspectivas

Montamos um sistema de vácuo, que trabalha na faixa de pré-vácuo (1013 mbar até 10^{-3} mbar) para realizar a calibração de medidores de vácuo. Um sistema simples e que realiza a calibração de medidores através da medição do throughput, utilizando o método da pipeta. Este sistema pode ser utilizado também para calcular outras grandezas básicas da tecnologia do vácuo, como: condutância e velocidade efetiva de bombeamento.

Através deste sistema realizamos 4 medições, medições estas que usamos para calcular os valores de throughput e com isto os valores de pressão da câmara de vácuo 1 (CV₁) para comparar com os valores medidos pelo medidor de vácuo a ser calibrado acoplado a câmara de vácuo 1 (CV₁). Com isto chegamos aos seguintes resultados:

Pressões Medidas (PM)	Pressões Calculadas (PC)	Diferença (PM x PC)
(16,48 ± 0,03) mbar	(14,73 ± 0,05) mbar	10,62%
(35,49 ± 0,03) mbar	(31,34 ± 0,07) mbar	11,69%
(46,86 ± 0,03) mbar	(42,43 ± 0,06) mbar	9,45%
(56,76 ± 0,03) mbar	(53,72 ± 0,09) mbar	5,36%

As medições foram 100% realizadas no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV) da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec-SP) com orientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

Como perspectiva podemos considerar a utilização de outros gases no sistema, utilização de condutâncias com diâmetros diferentes, e também a utilização do sistema para o estudo de outra grandezas da tecnologia do vácuo, como condutância e velocidade efetiva de bombeamento.

7. Referencia

- [1] M. M. de Andrade, **Modelagem e Medição da Vazão de Gases em Sistemas de Vácuo**, Trabalho de Graduação, para obtenção do título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos na Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2013.
- [2] T. C. V. de Oliveira, **Vacustat Metálico – Projeto de Protótipo, Construção e Montagem de Manômetro Direto com Mercúrio por Compressão**, Trabalho de Graduação, para obtenção do título de Tecnólogo em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos na Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2013.
- [3] A. M. C. Moutinho, **Tecnologia de Vácuo**, Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, 1980.