

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

Matheus Marquis de Andrade

Modelagem e Medição da Vazão de Gases em Sistemas de Vácuo

SÃO PAULO

2013

Matheus Marquis de Andrade

Modelagem e Medição da Vazão de Gases em Sistemas de Vácuo

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, inteligência suprema e causa primeira de todas as coisas.

Em segundo lugar aos meus amados pais Mauro e Márcia e amada irmã Mariah por todo amor e apoio prestados a mim durante toda a minha vida.

Agradeço também ao meu grande irmão Giordano por tantos anos de verdadeira e eterna amizade e ajuda nos momentos mais difíceis da minha vida, me faltam palavras para lhe agradecer por tudo.

Ao professor Tadeu pela oportunidade dada em me aceitar como seu orientado e por compartilhar todo seu enorme conhecimento e sabedoria.

Aos amigos do laboratório Edelson e Bruno pela grande assistência e apoio para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao amigo Edvan por sempre acreditar em meu potencial e me aconselhar.

Aos muitos amigos que graças a Deus conheci no decorrer desse curso, são muitos nomes e infelizmente não há espaço para todos, mas acreditem que sou eternamente grato por cada contribuição que fizeram na minha vida!

Aos professores do curso que ajudaram a expandir minha mente, e que nunca mais irá se retrair.

E finalmente a uma pessoa muito especial na minha vida, minha namorada Andréia por ser minha estrela guia, minha companheira, amiga e amante. Te amo muito e muito obrigado por estar na minha vida.

**“O lado bom de não pensar nas
consequências é que você sempre surpreenderá
aqueles que pensam nela”**

Goblin Ensandecido

RESUMO

A tecnologia do vácuo tem uma enorme importância para diversas áreas da atividade humana, as principais são suas grande aplicação nas áreas da indústria e pesquisa. Optamos por desenvolver um sistema genérico de vácuo para o estudo de vazões de gases em pressões de pré-vácuo que compreende a faixa que vai desde a pressão atmosférica até aproximadamente 10^{-3} torr através de condutâncias de pequeno diâmetro. O sistema tem como característica a facilidade de configuração para diferentes estudos. Atrélado aos estudos, desenvolvemos uma modelagem teórica do nosso sistema principal com o auxílio do programa Mathcad.

Realizamos três experimentos para o estudo da vazão de gases entre as câmaras de vácuo do sistema, para três condutâncias de pequeno diâmetro (0,02 mm , 0,05mm e 0,08mm) sem a influência do bombeamento da bomba mecânica de palhetas, ou seja, o estudo dessa vazão somente em função da diferença de pressão entre as câmaras.

Outros três experimentos foram realizados utilizando o chamado método da pipeta, como forma de medirmos a vazão de gás da atmosfera para o sistema por uma válvula agulha.

Os experimentos comprovaram a eficácia do sistema projetado para medição de vazões em sistemas de vácuo, possibilitando um estudo mais detalhado desse fenômeno físico.

Palavras chave: Modelagem, Vazão, *Throughput*, Condutância, Pré-Vácuo, Arranjo Experimental, Método da Pipeta.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE VÁCUO SIMPLES.....	11
FIGURA 2 - LIVRE CAMINHO MÉDIO DA MOLÉCULA EM UM GÁS. [8]	13
FIGURA 3 - FLUXO DENTRO DE UM TUBO. [6].....	16
FIGURA 4 - FLUXO DE GÁS EM UM TUBO, ANALOGIA COM A ELETRICIDADE. [5]	17
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO VISCOSO TURBULENTO. [7]	18
FIGURA 6 - ILUSTRAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO VISCOSO LAMINAR. [7]	18
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO INTERMEDIÁRIO OU DE KNUDSEN. [7]	19
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO MOLECULAR. [7]	19
FIGURA 9 - BOMBA MECÂNICA DE PALHETAS DE DUPLO ESTÁGIO ALCATEL PASCAL 2010SD	21
FIGURA 10 - MEDIDOR DE MEMBRANA CAPACITIVA LEYBOLD CERAVAC TRANSMITTER.....	21
FIGURA 11 - UNIDADE CONTROLADORA LEYBOLD CENTER TWO	22
FIGURA 12 - MULTÍMETROS MINIPA ET-2076A (ESQUERDA) E MINIPA MDM8165 (DIREITA)	23
FIGURA 13 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE VÁCUO PRINCIPAL	24
FIGURA 14 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE VÁCUO PRINCIPAL	25
FIGURA 15 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE VÁCUO MONTADO	30
FIGURA 16 - DETALHAMENTO DA FIXAÇÃO DO SISTEMA NAS PLACAS DE MADEIRA.....	31
FIGURA 17 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE COLETA COMPUTADORIZADA	32
FIGURA 18 - IMAGEM DO TESTE DE CONFIABILIDADE DA COLETA DE DADOS COMPUTADORIZADA.....	33
FIGURA 19 - FOTOGRAFIA DAS CONDUTÂNCIAS PADRÃO UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS	35
FIGURA 20 - FOTOGRAFIA DO ENGATE RÁPIDO (ACIMA) E DO PORTA CONDUTÂNCIAS	36
FIGURA 21 - DIAGRAMA DO SISTEMA MODIFICADO PARA OS EXPERIMENTOS 1,2 E 3.....	37
FIGURA 22 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA ADAPTADO PARA REALIZARMOS A COLETA DE DADOS PELO MÉTODO DA PIPETA.....	39
FIGURA 23 - FOTOGRAFIA DO DETALHE DO ACOPLAMENTO DOS SISTEMAS	41
FIGURA 24 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA PARA OS EXPERIMENTOS 4,5 E 6	41
FIGURA 25 - DIAGRAMA DO SISTEMA PARA OS EXPERIMENTOS 4,5 E 6	42
FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE AR ATMOSFÉRICO PERCORRIDO COM A VÁLVULA DE PRÉ-VÁCUO ABERTA	44
FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE AR ATMOSFÉRICO PERCORRIDO COM A VÁLVULA DE PRÉ-VÁCUO FECHADA	44

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - TESTE DE CONFIABILIDADE DA COLETA COMPUTADORIZADA DE DADOS	46
GRÁFICO 2 - GRÁFICO DA VAZÃO DE GASES NO EXPERIMENTO 1.....	47
GRÁFICO 3 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 1 AMPLIADO NA REGIÃO ABAIXO DOS 100 TORR.....	48
GRÁFICO 4 - GRÁFICO DA VAZÃO DE GASES NO EXPERIMENTO 2.....	49
GRÁFICO 5 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 2 AMPLIADO NA REGIÃO ABAIXO DOS 100 TORR.....	49
GRÁFICO 6 - GRÁFICO DA VAZÃO DE GASES NO EXPERIMENTO 3.....	50
GRÁFICO 7 - GRÁFICO DO EXPERIMENTO 3 AMPLIADO NA REGIÃO ABAIXO DOS 50 TORR.....	51
GRÁFICO 8 - CURVA TEÓRICA DO BOMBEAMENTO TOTAL DO SISTEMA DE VÁCUO.....	52
GRÁFICO 9 - AMPLIAÇÃO DA CURVA TEÓRICA DO BOMBEAMENTO TOTAL DO SISTEMA DE VÁCUO	52
GRÁFICO 10 - GRÁFICO DA VAZÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O BOMBEAMENTO TOTAL DO SISTEMA DE VÁCUO	53
GRÁFICO 11 - GRÁFICO DA VAZÃO DO SISTEMA NO TEMPO	54
TABELA 1 - TABELA DOS REGIMES DE ESCOAMENTO SEGUNDO O NÚMERO DE KNUDSEN.....	14
TABELA 2-PLANILHA UTILIZADA PARA CÁLCULO DA VAZÃO DO SISTEMA NO EXPERIMENTO 4.....	54
TABELA 3 - PLANILHA UTILIZADA PARA CÁLCULO DA VAZÃO DO SISTEMA NO EXPERIMENTO 5	55
TABELA 4 - PLANILHA UTILIZADA PARA CÁLCULO DA VAZÃO DO SISTEMA NO EXPERIMENTO 6	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVO	10
1.2	APRESENTAÇÃO.....	10
2	EMBASAMENTOS TEÓRICOS.....	12
2.1	O VÁCUO	12
2.2	LIVRE CAMINHO MÉDIO.....	12
2.3	NÚMERO DE KNUDSEN	13
2.4	NÚMERO DE REYNOLDS	15
2.5	FLUXO DE GÁS E VAZÃO (THROUGHPUT).....	15
2.6	CONDUTÂNCIA.....	16
2.7	REGIMES DE ESCOAMENTO	18
2.8	EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DO PROCESSO DE BOMBEAMENTO	20
3	SISTEMA GENÉRICO DE VÁCUO PRINCIPAL.....	20
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	20
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRINCIPAL	23
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA.....	27
3.4	MONTAGEM DO SISTEMA.....	30
3.5	COLETA COMPUTADORIZADA DE DADOS	32
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	33
4.1	CONFIABILIDADE DA COLETA DE DADOS COMPUTADORIZADA.....	33
4.2	EXPERIMENTOS 1,2 E 3.....	34
4.3	CONFIGURAÇÃO DO ARRANJO PARA OS EXPERIMENTOS 1,2 E 3.....	35
4.4	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS 1,2 E 3	38
4.5	EXPERIMENTOS 4,5 E 6.....	39
4.6	CONFIGURAÇÃO DO ARRANJO PARA OS EXPERIMENTOS 4,5 E 6.....	40
4.7	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS 4,5 E 6	43
5	RESULTADOS E COMENTÁRIOS.....	46
5.1	COLETA COMPUTADORIZADA DE DADOS	46
5.2	EXPERIMENTOS 1,2 E 3.....	47
5.3	MODELAGEM DO SISTEMA PELO MATHCAD	52
5.4	EXPERIMENTOS 4,5 E 6.....	53
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	56

7	REFERÊNCIAS	57
8	APÊNDICES.....	58
8.1	APÊNDICE A – MODELAGEM MATHCAD	58

1 Introdução

1.1 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo a montagem de um sistema genérico de vácuo que possibilite estudos sobre a vazão de gases por condutâncias de pequeno diâmetro através de experimentos que podem ser facilmente configurados com pequenas alterações no sistema. Além disso, visa enriquecer a literatura especializada através de experimentos realizados e modelagem detalhada do sistema de vácuo.

1.2 Apresentação

O estudo do fenômeno físico denominado vácuo é de vital importância nos dias de hoje. Começando, de acordo com os historiadores, com Galileu Galilei que através de um pistão foi a primeira pessoa a criar vácuo, passando por von Guericke e Torricelli criadores da primeira bomba e do primeiro instrumento medidor de pressão (o barômetro de mercúrio), respectivamente. Daí em diante conforme os estudos sobre o assunto avançavam a importância do vácuo também crescia.

O vácuo em si tem uma ampla gama de aplicações na indústria, nas áreas de produtos alimentícios, farmacêuticos, metalúrgico, nuclear e é claro na microeletrônica, sendo parte vital em alguns dos processos de produção. Não podemos deixar de citar é claro sua utilização na pesquisa de ponta, cito aqui o exemplo do LHC (Large Haddron Collider) onde é necessário um ultra alto vácuo (10^{-10} Torr) para evitar colisões com as partículas de gás.

O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento e modelagem de um sistema de medição de pequenas vazões (Throughput) em sistemas de vácuo primário (1000 mbar até 10⁻² mbar). Grande parte dos processos industriais, como processamento e embalagem de alimentos, secagem, evaporação, sputtering e destilação, ocorrem nessa faixa de pressão. Estudos como o desenvolvido neste trabalho são de grande interesse a área onde os processos inerentes a produção devem ser muito bem conhecidos e controlados, não só para garantir a confiabilidade do processo como um todo mas também para evitar qualquer tipo de perda, tanto material como temporal.

Um sistema de vácuo é constituído basicamente de três elementos: bomba de vácuo, linha de bombeamento dos gases e câmara de vácuo onde ocorrerão os processos (figura 1). Outros componentes também podem integrar esse sistema, como válvulas, medidores, flanges, tubulações e outros.

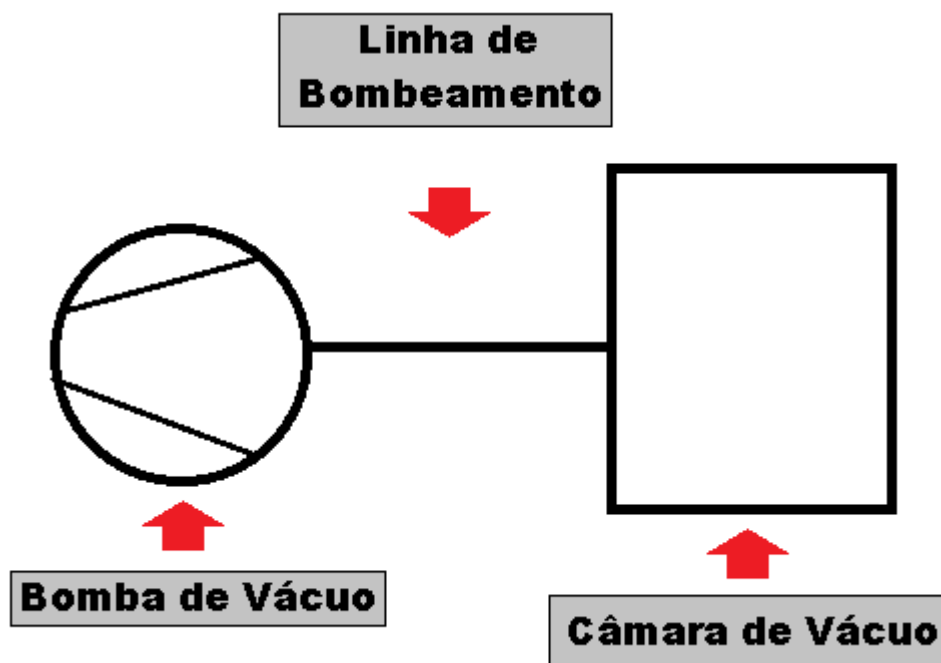


Figura 1 - representação de um sistema de vácuo simples

Dentre os vários fenômenos físicos existentes nos sistemas de vácuo, o de maior interesse é a vazão dos gases desse sistema, ou throughput, dos mesmos. A vazão pode ser definida como a quantidade de um gás (volume de um gás a uma pressão conhecida) que passa por um plano em um tempo conhecido. Um tratamento mais profundo a este conceito será realizado no próximo capítulo deste trabalho. É importante notar que dada à natureza do sistema, ou seja, a remoção dos gases para execução de algum processo, este fenômeno tem uma importância impar, influenciando de maneira significativa no tempo de diversos processos industriais.

2 Embasamentos Teóricos

2.1 O Vácuo

A palavra vácuo deriva do latim “vazio”, termo que frequentemente dá a falsa noção de ausência total de matéria em um determinado espaço, o que é totalmente inviável.

Para propósitos gerais o termo denota uma região do espaço ou um volume onde a pressão é substancialmente menor que 760 torr, que é um sistema de medida tradicional onde a pressão é expressa através dos milímetros de uma coluna de mercúrio, onde 1 milímetro de mercúrio equivale a 1 torr e uma atmosfera padrão se equivale a 760 mmHg ou torr. Para propósitos práticos, de acordo com a American Vacuum Society o termo vácuo denota um espaço preenchido com um gás com pressão menor que a atmosférica[1].

2.2 Livre Caminho Médio

O fato das moléculas serem randomicamente distribuídas e de se movimentarem em diferentes velocidades implica que cada uma delas viaja a diferentes distâncias em linha reta, conhecido como o livre-caminho médio, antes de sofrer uma colisão. Como ilustrado na figura, nem todos os livres caminhos tem o mesmo comprimento. A média desses caminhos livres λ , é encontrado da teoria cinética;

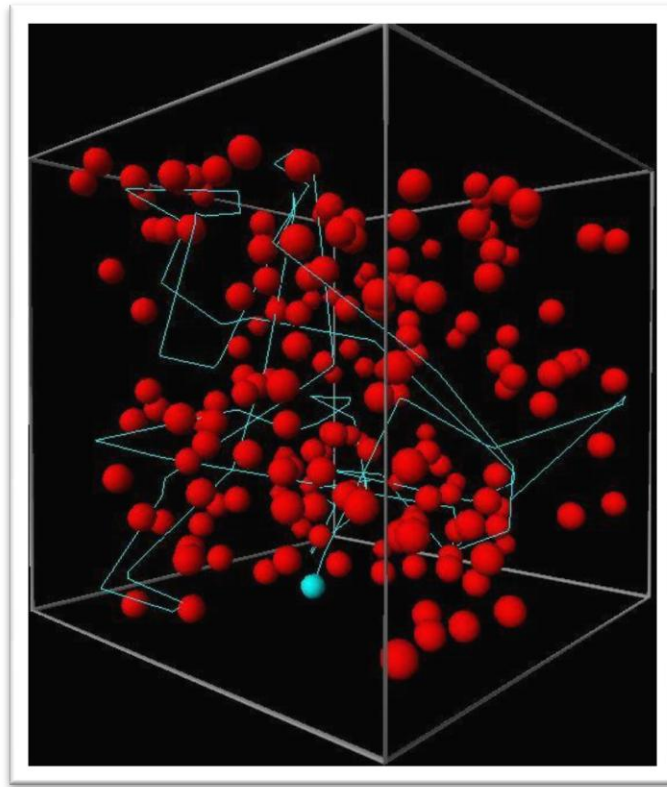


Figura 2 - Livre caminho médio da molécula em um gás. [8]

$$\lambda = \frac{1}{2^{1/2} \pi d_0^2 n}$$

onde d_0 é o diâmetro molecular em metros, e n é a densidade do gás moléculas por metro cúbico. O livre-caminho médio é claramente dependente da densidade do gás. Se a temperatura é constante, também é dependente da pressão. Para o ar em temperatura ambiente o livre caminho médio é mais facilmente lembrado através de uma das expressões [2]:

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

2.3 Número de Knudsen

O cálculo do livre caminho médio das moléculas de um sistema nos possibilita também sabermos em qual regime de escoamento se encontra o sistema, desde que o diâmetro da tubulação do mesmo seja conhecido.

O número de Knudsen é a razão entre o livre caminho médio e o diâmetro da tubulação do sistema.

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

Para determinados valores podemos determinar o regime de escoamento vigente como mostra a tabela 1. [5]

Valor da Razão	Regime de Escoamento
Kn < 0,01	Viscoso Turbulento
Kn < 0,01	Viscoso Laminar
1,0 > Kn > 0,01	Intermediário ou Knudsen
Kn > 1,0	Molecular

Tabela 1 - Tabela dos regimes de escoamento segundo o número de Knudsen

Podemos notar que nos regimes viscoso turbulento, viscoso laminar as colisões das moléculas de gás ocorre tanto nas paredes do sistema quanto entre as próprias moléculas. Já no regime molecular essa colisão das moléculas ocorre essencialmente contra as paredes do sistema.

2.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds é utilizado para caracterizar a quantidade relativa do fluxo de gás. É a razão entre a tensão de cisalhamento devido à turbulência e a tensão de cisalhamento devido à viscosidade. Tal número nos auxilia a identificar o regime de escoamento na fronteira entre o regime turbulento e o viscoso laminar, já que pelo número de Knudsen não temos como obter essa identificação. Esse limite entre os dois regimes pode ser expresso em termos adimensionais R para tubos redondos.

$$R = \frac{U\rho d}{\eta}$$

Onde ρ é a densidade de massa (kg/m^3), do gás de viscosidade η fluindo com velocidade de fluxo U em um tubo com diâmetro d .

Reynolds encontrou duas situações de escoamento dinamicamente similar quando esse número adimensional R era o mesmo. Quando $R > 2200$, o escoamento era sempre turbulento e quando $R < 1200$ o escoamento era sempre viscoso. Na região de $1200 < R < 2200$ o escoamento era viscoso ou turbulento, dependendo da geometria de entrada e saída e da natureza das irregularidades no tubo. O escoamento viscoso laminar ocorre na região delimitada pelo um número de Reynold menor que 1200 e um número de Knudsen menor que 0,01. Quando o livre caminho medido é maior ou igual ao diâmetro do tubo, ou seja, $\text{Kn} > 1$ e quando $R < 1200$ o escoamento se encontra no regime molecular. [2]

2.5 Fluxo de Gás e Vazão (Throughput)

Em resposta a uma diferença de pressão ocorre o fluxo de gás de uma pressão maior para uma pressão menor enquanto o desequilíbrio é mantido ($p_1 > p_2$), como é possível visualizar com o auxílio da figura 2.

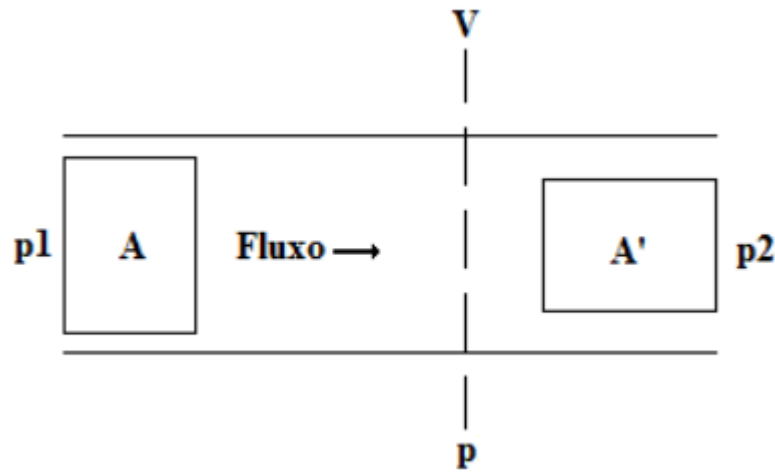


Figura 3 - Fluxo dentro de um tubo. [6]

Considerando a pressão constante em uma determinada secção transversal podemos especificar o fluxo de gás como o produto da pressão p pelo volume V . Podemos então definir que a vazão (*Throughput*) é quantidade desse gás a uma pressão conhecida que passa por um plano por unidade de tempo. [5]

$$Q = \frac{d}{dt}(PV) = P \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt} \text{ (mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \text{)}$$

2.6 Condutância

A condutância pode ser interpretada como a facilidade que um fluxo de gás tem de passar de uma região de maior pressão para uma região de menor pressão. [5] De uma maneira mais concreta podemos dizer que a condutância representa a capacidade da bomba e da tubulação em mover um dado volume de gás e um dado tempo, sendo assim expressa em unidade de volume por unidade de tempo, por exemplo, litro por segundo (l/s), pé cúbico por minuto (cf/m) ou metro cúbico por hora (m³/h). [3] Com isso podemos perceber a importância da condutância no que se diz respeito à velocidade de bombeamento do sistema, já que a velocidade de bombeamento efetiva depende tanto da velocidade da própria bomba quanto da condutância.

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_b} + \frac{1}{C_t}$$

Onde S_{ef} é a velocidade efetiva de bombeamento, ou seja, é a velocidade que a câmara de vácuo é bombeada, S_b é a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo e C_t é a condutância total da linha de bombeamento.

A condutância depende de vários fatores como, por exemplo, a geometria e dimensões da tubulação do sistema de vácuo, a diferença de pressão entre os extremos da região considerada e o regime de escoamento.

Para uma melhor compreensão é frequente a utilização da analogia entre o conceito de condutância e os conceitos estudados na eletricidade. Com o auxílio da figura 3, podemos comparar a diferença de potencial (**d.d.p**) com a diferença de pressão (Δp), e como consequência dessa diferença surge uma corrente que logo assimilamos a vazão, ou, *Throughput* (Q). A tubulação por onde o gás passa é comparada a impedância, ou seja, a própria condutância(C).

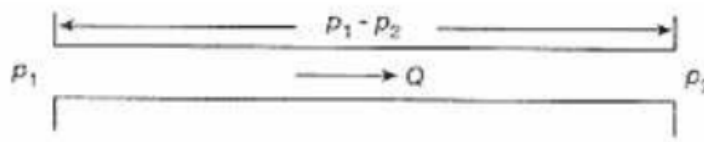


Figura 4 - Fluxo de gás em um tubo, analogia com a eletricidade. [5]

Através dessa mesma analogia podemos equacionar tal fenômeno de maneira análogo a Lei de Ohm.

$$Q = C \cdot (p_1 - p_2)$$

Utilizando os conceitos de *Throughput* já explanados temos:

$$C \cdot (p_1 - p_2) = P \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dP}{dt}$$

2.7 Regimes de Escoamento

Como já citado, um dos principais fatores que influem na condutância é o regime de escoamento, que varia com a pressão e a velocidade de bombeamento. Os regimes de escoamento são divididos em quatro regimes. [4]

1. Regime de Escoamento Viscoso Turbulento: Quando um sistema é bombeado a partir de pressões elevadas, por exemplo, a partir da pressão atmosférica, a velocidade do fluxo de gás é muito elevada e varia irregularmente com o tempo em cada ponto do gás, ocasionando assim redemoinhos e oscilações. De acordo com a figura 4:

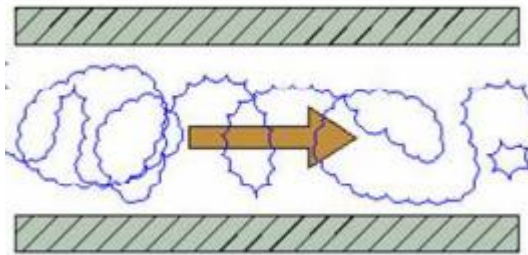


Figura 5 - Ilustração do regime de escoamento viscoso turbulento. [7]

2. Regime de Escoamento Viscoso Laminar: Nessa situação o gás se desloca em camadas finas e sobrepostas umas as outras, a velocidade do gás é maior na parte central do tubo e vai diminuindo quando se aproxima nas paredes do tubo, podendo ser considerada nula junto às paredes. Como ilustra a figura 5:

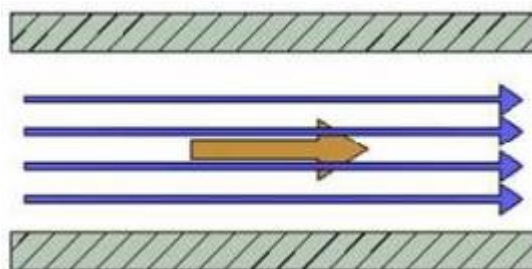


Figura 6 - Ilustração do regime de escoamento viscoso laminar. [7]

3. Regime de Escoamento de Knudsen: regime intermediário entre o escoamento viscoso laminar e o molecular, diferenciando-se do primeiro no que toca a velocidades junto as paredes do sistema que já não podem mais ser consideradas nulas, como na figura 6:

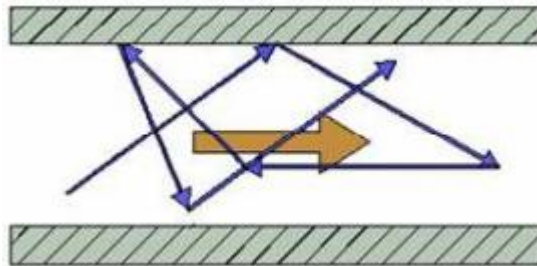


Figura 7 - Ilustração do regime de escoamento intermediário ou de Knudsen. [7]

4. Regime de Escoamento Molecular: ocorre em baixas pressões quando o livre caminho médio excede o diâmetro do tubo. A figura 8 demonstra esse regime de escoamento:

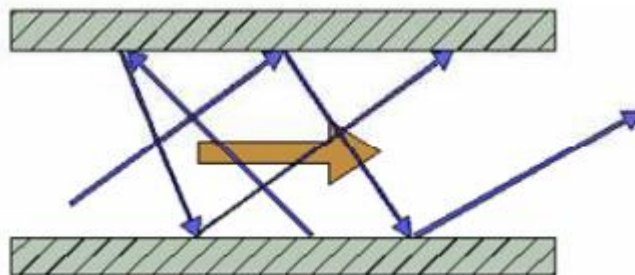


Figura 8 - Ilustração do regime de escoamento molecular. [7]

No presente trabalho devido à faixa de pressão de trabalho estar na região do vácuo primário a regime de escoamento que vamos lidar é o escoamento viscoso laminar. Portanto para o modelamento do sistema será utilizada a equação que descreve a condutância nesse regime para tubos longos, considerando gás N_2 a $20^\circ C$. Podendo ser utilizada já que a comprimento da condutância padrão utilizada é 10 vezes maior que o seu diâmetro.

$$C_{lam}(\frac{l}{s}) = 134 \cdot \frac{D^4}{L} \cdot p_{med}$$

Sendo **D** o diâmetro e **L** o comprimento da condutância padrão que utilizaremos, e **p_{med}** a pressão média do sistema.

2.8 Equação Fundamental do Processo de Bombeamento

Para a modelagem do nosso sistema utilizaremos uma equação que correlaciona o volume e a pressão da câmara de vácuo, a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo mecânica de palhetas de duplo estágio e a vazão, ou *Throughput*, envolvido.

$$V_{cv} \cdot \frac{dp(t)}{dt} = -S_{ef} \cdot p(t) + Q_{final}$$

V_{cv} é o volume da câmara de vácuo; a pressão **p** varia com o tempo **t**; **S_{ef}** é a velocidade efetiva de bombeamento e **Q_{final}** é a soma dos *throughputs* envolvidos no processo. [5]

Maiores detalhes sobre a modelagem e utilização da equação estão presentes no capítulo 3 e nos apêndices.

3 Sistema Genérico de Vácuo Principal

3.1 Equipamentos Utilizados

Para a montagem desse sistema de vácuo utilizamos os seguintes equipamentos:

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

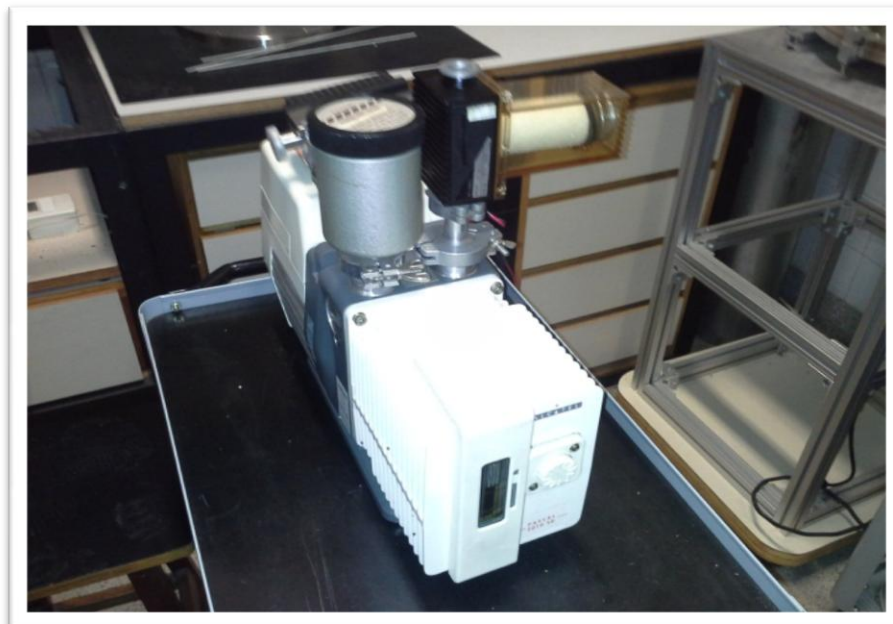


Figura 9 - Bomba mecânica de palhetas de duplo estágio Alcatel Pascal 2010SD

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

- Medidores de Membrana Capacitiva **Leybold Ceravac Transmitter**



Figura 10 - Medidor de membrana capacitiva Leybold Ceravac Transmitter

Sendo utilizados dois medidores desse tipo para este projeto, sendo que os mesmos operam em diferentes faixas de pressão. Um dos medidores opera na faixa entre 10^{-2} e 1000 torr, enquanto o outro na faixa entre 10^{-2} e 100 torr. No capítulo 4 será mostrado onde os diferentes medidores foram inseridos no sistema.

- Unidade controladora **Leybold Center Two**



Figura 11 - Unidade controladora Leybold Center Two

Unidade controladora dos medidores de membrana capacitiva. Possui dois canais de entrada e um canal de saída do tipo **RS232**, sendo que através do canal de saída é possível captar o sinal analógico para aquisição dos dados dos medidores.

- Multímetros **Minipa ET-2076A** e **Minipa MDM8165**

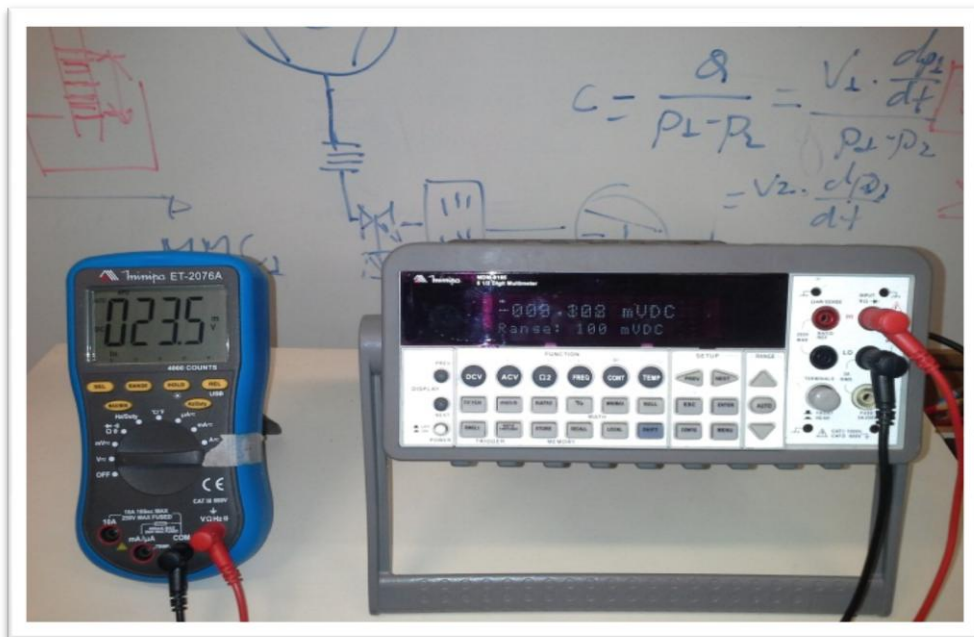


Figura 12 - Multímetros Minipa ET-2076A (esquerda) e Minipa MDM8165 (direita)

Ambos os multímetros possuem saída USB, drivers e softwares para aquisição de dados e controle através do computador.

3.2 Caracterização do Sistema Principal

O sistema foi elaborado tendo em mente a adaptabilidade para realização de diversos estudos pertinentes a sistemas de vácuo, tais como a análise da vazão de gases, caracterização de condutâncias, entre outros, de forma que fosse necessário rearranjar, trocar ou retirar apenas algumas partes pertinentes sem grandes alterações no conjunto. Um esquema detalhado juntamente com uma fotografia do sistema principal pode ser vista nas figuras 12 e 13.

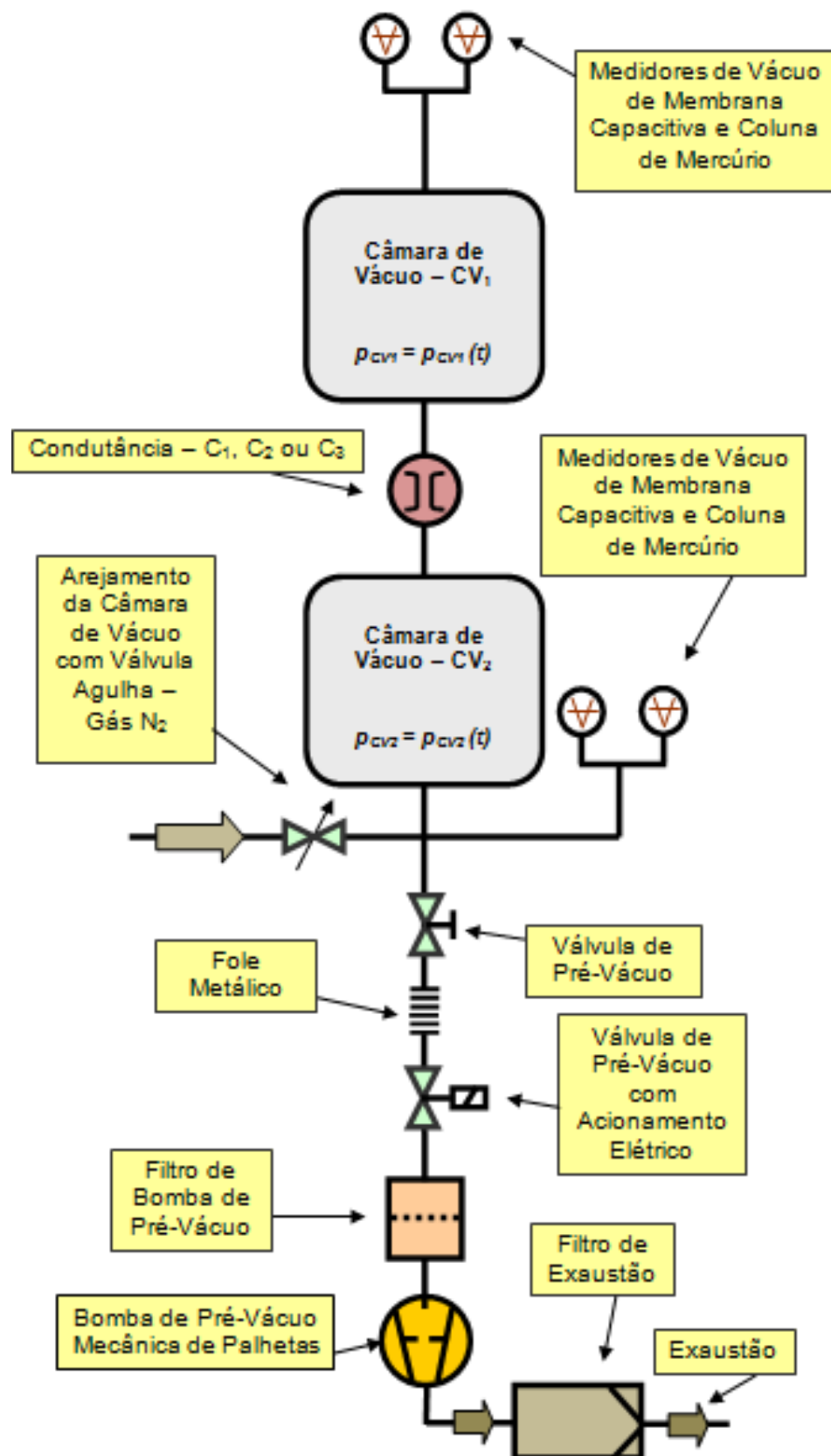


Figura 13 - Diagrama do sistema de vácuo principal



Figura 14 - Fotografia do sistema de vácuo principal

A estrutura principal consiste em duas câmaras de vácuo de volumes diferentes, a câmara de vácuo superior, a qual demos o nome de **câmara de vácuo 1 (CV₁)** tem um volume estimado de **1,3 ± 0,10 L** enquanto a câmara de vácuo inferior, ou **câmara de vácuo 2 (CV₂)**, tem um volume estimado de **3,7 ± 0,10 L**. Os volumes aqui descritos foram calculados conhecendo-se as dimensões das peças e considerando todas as interconexões e tubos anexadas as duas câmaras de vácuo principais.

Conectando os dois volumes há uma condutância padrão a que vamos nos referir nesse trabalho como **C**. Tal condutância tem como objetivo propiciar uma vazão considerada pequena entre os volumes, desta forma atuando como um “gargalo” no processo de transferência dos gases entre as câmaras de vácuo, as dimensões de **C** podem ser consideradas infinitamente menores que as tubulações utilizadas para a formação do sistema. Maiores informações sobre as mesmas serão apresentadas no capítulo 4.

Uma válvula agulha foi instalada juntamente a CV₂ para arejamento do sistema fazendo parte do conjunto também um filtro. Tal aparato se mostra necessário para evitar a entrada de particulados que poderiam prejudicar o sistema devido os pequenos diâmetros com que trabalhamos. Outras válvulas (pré-vácuo) foram instaladas também com o objetivo de isolarmos o sistema da bomba mecânica, como será visto posteriormente. Para evitarmos vibrações que poderiam prejudicar o sistema um fole metálico foi instalado entre a válvula de pré-vácuo do sistema e a válvula de pré-vácuo da bomba mecânica de palhetas.

Para a medição da pressão no nosso sistema utilizamos dois medidores de membrana capacitiva juntamente com duas colunas de mercúrio. Esses medidores foram instalados na parte inferior e superior do arranjo de modo a medir a pressão nas câmaras de vácuo. Na parte superior utilizamos o medidor de membrana capacitiva com um fundo de escala que vai de 1000 até 10^{-2} torr, nos referiremos este medidor como MMC1. Juntamente com o MMC1 utilizamos um medidor tipo coluna de mercúrio. Na parte inferior se situa, juntamente com o outro medidor tipo coluna de mercúrio, o medidor de membrana capacitiva ao qual nos referiremos como MMC2 com um fundo de escala que vai de 100 até 10^{-2} torr.

3.3 Modelagem do Sistema

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 .

$$\begin{aligned} \text{Câmara de Vácuo 1 - } CV_1 \quad V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} &= -S_{ef1} \cdot p_{CV1}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV1} \\ \text{Câmara de Vácuo 2 - } CV_2 \quad V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} &= -S_{ef2} \cdot p_{CV2}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV2} \end{aligned}$$

De maneira sucinta podemos modelar 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 CV_2 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 10^{-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 do 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 CV_1 e CV_2 respectivamente.
- p_{CV1} e p_{CV2} são as pressões nas câmaras de vácuo CV_1 e CV_2 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 CV_1 e CV_2 .
- 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

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

Temos as seguintes equações diferenciais, considerando que a única fonte de gás, além certamente do gás do volume, são as fontes de gases da desgaseificação. Estas fontes de gases são importantes para pressões abaixo de 10^{-3} torr. Como trabalharemos até 1 torr, desprezaremos as desgaseificações.

Continuando, temos ainda as seguintes simplificações pertinentes na modelagem em construção:

- S_{ef1} é aproximadamente igual a condutância C , matematicamente $S_{ef1} = C$.

- S_{ef2} é aproximadamente igual a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo mecânica de palhetas S_{BV} condutância C , matematicamente $S_{ef2} = S_{BV}$.
- A grandeza $C \cdot [p_{CV1}(t) - p_{CV2}(t)]$ é a quantidade de gás - em termos de throughput – que deixa a câmara de vácuo CV_1 e entra na câmara de vácuo CV_2 .

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = -C \cdot p_{CV1}(t)$$

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 2

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

Continuando, inserindo as expressões da condutância C do tubo que conecta a câmara de vácuo 1 à câmara de vácuo 2 temos as seguintes equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas e não lineares.

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = -134 \frac{d^4}{L} \cdot \left[\frac{p_{CV1}(t) + p_{CV2}(t)}{2} \right] \cdot p_{CV1}(t)$$

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 2

$$V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} = -S_{BV} \cdot p_{CV2}(t) + 134 \frac{d^4}{L} \cdot \left[\frac{p_{CV1}(t) + p_{CV2}(t)}{2} \right] \cdot [p_{CV1}(t) - p_{CV2}(t)]$$

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

Informações mais detalhadas bem como a modelagem completa do sistema poderá ser encontrada nos apêndices.

3.4 Montagem do Sistema

O sistema foi montado no Laboratório de Vácuo – LTV da Fatec São Paulo. Optamos pela montagem vertical do sistema para podermos trabalhar em uma área menor. A fotografia do sistema completo pode ser vista na figura 14.



Figura 15 - Fotografia do sistema de vácuo montado

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

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.

Todo o sistema de vácuo foi limpo com detergente e depois foi feito enxague com água corrente. Após a secagem foi limpo com álcool isopropílico. Tomamos sempre o cuidado de deixar todos os flanges sempre protegidos com tampas para evitar entrada de qualquer tipo de particulado.

O arranjo foi totalmente montado sobre placas de madeira maciça e fixado com braçadeiras feitas de plástico rígido (figura 15) em pontos específicos de maior tensão mecânica, que poderia acarretar em dano aos componentes e até mesmo vazamentos.



Figura 16 - Detalhamento da fixação do sistema nas placas de madeira

Para experiências com o método da pipeta fixou-se uma placa de madeira auxiliar no sistema de forma a comportar os componentes necessários, como por exemplo, a própria pipeta, o béquer e a outra válvula agulha. Um detalhamento maior será dado a esse sistema responsável pela medição pelo método da pipeta no capítulo 4.

3.5 Coleta Computadorizada de Dados

Para esse trabalho e outros posteriores foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia do Vácuo um sistema de coleta de dados computadorizado que tem como principal função a de transmitir em tempo real informações da pressão de cada medidor de membrana capacitiva para o computador. Tais dados estão prontos para posteriores tratamentos com o auxílio de programas para análise de dados como **Microsoft Excel** e **Origin**.

É importante ressaltar que tal coleta de forma computadorizada teve sua confiabilidade aferida através de teste que está descrito de forma mais detalhada no capítulo 4, e que foi utilizada de maneira pioneira por esse e por mais dois trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Vácuo-LTV da Fatec São Paulo de forma muito bem sucedida, sendo assim uma contribuição para futuros trabalhos para uma coleta de dados de maneira mais precisa, rápida e simplificada.

Uma fotografia do arranjo da coleta de dados computadorizada pode ser vista na figura 16. Basicamente a coleta computadorizada consiste em medir a saída analógica de tensão da porta RS232 da unidade controladora e por meio de multímetros digitais que possuem saída USB software e drivers para o registro em tempo real da tensão medida pelos multímetros.

O próprio manual nos fornece a equação necessária para a conversão da tensão medida para a pressão desejada em torr.



Figura 17 - Fotografia do sistema de coleta computadorizada

4 Procedimento Experimental

4.1 Confiabilidade da coleta de dados computadorizada

Para que a aquisição de dados de forma eletrônica fosse considerada viável foi necessário corroborar a igualdade entre o valor da pressão medida através dos multímetros e da pressão mostrada através do display da unidade controladora. Para isso, além da tomada de dados de forma computadorizada, também registramos a variação de pressão no display com o auxílio de uma câmera de vídeo.

Tomou-se o cuidado de sincronizar todos os relógios, tanto das máquinas que receberam os dados dos multímetros, quanto o relógio que acompanhava a unidade controladora, desta forma nos asseguramos que os pontos seriam tratados posteriormente de forma sincronizada evitando assim possíveis distorções.

Iniciou-se o teste com a pressão da CV_1 ligeiramente superior em relação a CV_2 abriu-se o arejamento do sistema através da válvula agulha por volta de um minuto após o início da tomada dos dados, a duração total do teste foi de cinco minutos. Tanto os dados computadorizados quanto os obtidos por meio de filmagens foram tratados posteriormente. Na figura 17 é possível ver uma imagem retirada do vídeo do experimento.



Figura 18 - Imagem do teste de confiabilidade da coleta de dados computadorizada

4.2 Experimentos 1,2 e 3

Foram elaborados três experimentos com o objetivo de estudar a vazão de gás N_2 entre as câmaras de vácuo em nosso sistema. Optamos por estudar essa vazão em duas situações:

- A vazão do N_2 durante o bombeamento do sistema da CV_1 para a CV_2 .
- A vazão de gases da CV_1 para a CV_2 sem a influência do bombeamento, ou seja, somente proveniente da diferença de pressão entre as duas câmaras de vácuo até sua posterior estabilização.

As situações citadas acima foram estudadas de maneira conjunta, ou seja, em um mesmo experimento bombeamos o sistema e após chegarmos à pressão desejada de 1 torr na CV_2 , interrompemos o bombeamento fechando a válvula de pré vácuo do sistema.

Para esses experimentos optamos pela utilização somente dos medidores de membrana capacitiva, pois se verificou que estavam bem calibrados registrando as mesmas pressões que as colunas de mercúrio e com a vantagem de termos uma maior precisão, enquanto que as medições nas colunas de mercúrio estão sujeitas a maiores erros por se tratar de uma medição visual. Além disso, devido ao pequeno volume do sistema, a queda de pressão se deu de maneira muito abrupta partindo da pressão atmosférica, impossibilitando assim a utilização das colunas de mercúrio.

Cada experimento foi realizado com condutâncias padrões diferentes, ou seja, com diâmetros distintos. Nomearam-se as condutâncias de acordo com o número do experimento: C_1, C_2 e C_3 , sendo $C_1 < C_2 < C_3$ e cada experimento foi realizado duas vezes para maior confiabilidade.

- Para o experimento 1 foi utilizada a agulha do tipo *Spinal Needle* (Raquidiana) com um diâmetro interno estimado em 0,022 mm (figura 19, esquerda).
- Para o experimento 2 foi utilizada uma condutância padrão com um diâmetro interno estimado em 0,05 mm (figura 19, centro)

- Para o experimento 3 utilizou-se também uma condutância padrão de diâmetro interno estimado em 0,08 mm (figura 19,direita)



Figura 19 - Fotografia das condutâncias padrão utilizadas nos experimentos

4.3 Configuração do Arranjo para os Experimentos 1,2 e 3

Para os experimentos 1,2 e 3 o sistema principal não sofreu nenhuma alteração muito significativa, sendo esse um dos pontos fortes do sistema. Acoplou-se um cilindro de gás N_2 para arejamento do sistema, sendo este o gás de estudo deste trabalho, tal gás teve preferência perante outros devido ao sua utilização em larga escala como gás de processo. A condutância padrão entre as câmaras de vácuo também foi trocada entre os experimentos, sendo utilizados três diferentes diâmetros, uma para cada experimento.

As condutâncias foram colocadas em um receptáculo conhecido como porta-condutância que consiste em dois discos de aço inoxidável e três anéis de vedação selados com graxa de silicone evitar ressecamento dos mesmos (figura 19). O conjunto então é inserido em um engate rápido, que permite que a troca das condutâncias seja feita de forma ágil e prática.

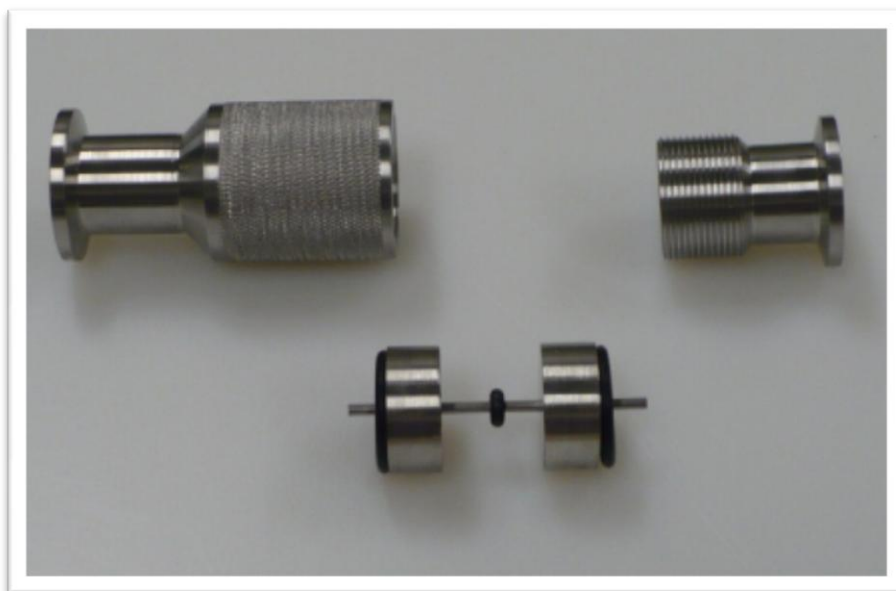


Figura 20 - Fotografia do engate rápido (acima) e do porta condutâncias

A figura 20 apresenta arranjo experimental de maneira mais detalhada.

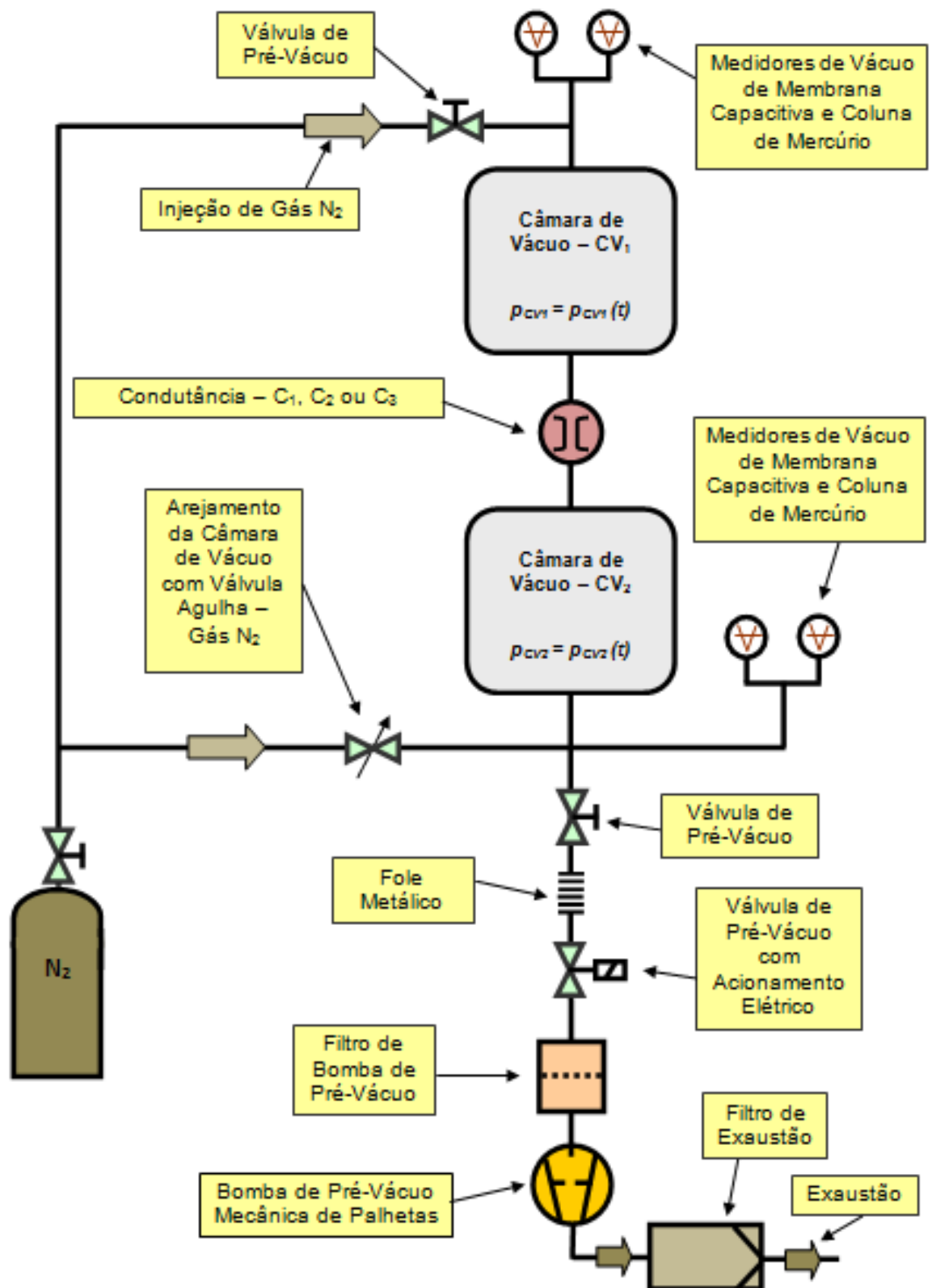


Figura 21 - Diagrama do sistema modificado para os experimentos 1,2 e 3

4.4 Execução dos experimentos 1,2 e 3

Para a execução desses experimentos desenvolvemos um roteiro padrão de forma a conseguirmos alcançar os objetivos propostos. Esse roteiro consiste em alguns passos que foram seguidos de maneira rigorosa para garantirmos a validação dos nossos estudos:

1. Desacoplar cuidadosamente o engate rápido do sistema e utilizando luvas retirar o porta condutâncias, colocar a condutância respectiva ao experimento, inserir o porta condutância novamente no engate rápido e acoplar o engate rápido novamente no sistema.
2. Realizar teste de vazamento para verificar falha na vedação do sistema. O teste consiste em monitorar o aumento de pressão do sistema após um determinado período de tempo e calcular qual é a vazão de ar atmosférico para dentro do sistema.
3. Bombear o sistema até a pressão final (10^{-2} torr) e arejar o sistema através da válvula agulha com o gás em estudo (N_2). Tal procedimento deve ser executado duas vezes para garantir uma maior proporção de moléculas de gás nitrogênio em relação a outros gases presentes no ar de tal forma que possamos considerar que os fenômenos estudados sejam de fato aqueles próprios do gás em estudo.
4. Iniciar a coleta de dados computadorizada de maneira sincronizada em ambos os computadores
5. Bombear o sistema a partir da pressão atmosférica até que a pressão na CV_2 chegue a 1 torr (1,33 mbar), atingindo essa pressão, fecha-se a válvula de pré-vácuo do sistema interrompendo assim o bombeamento do sistema.
6. Aguardar até a equalização da pressão nas câmaras de vácuo.
7. Interromper a coleta de dados e salvar os dados obtidos.

Conforme dito anteriormente cada experimento foi realizado duas vezes, desta forma os passos de 2 a 7 foram repetidos.

4.5 Experimentos 4,5 e 6

O objetivo nos experimentos 4,5 e 6 foi o de estudar a vazão do nosso sistema, através do método da pipeta.

O método da pipeta é uma maneira simples, mas muito eficaz para mensurarmos a vazão do nosso sistema. Através de uma pipeta graduada com a extremidade superior acoplada ao nosso sistema e a extremidade inferior imersa em um béquer contendo algum fluido viscoso com baixa pressão de vapor, é possível determinar a vazão, ou *Throughput*, através da variação do nível desse fluido na graduação da pipeta (variação volumétrica) no tempo e sabendo-se a pressão dentro da pipeta. A figura 21 nos dá a visão geral do sistema para o método da pipeta.



Figura 22 - Fotografia do sistema adaptado para realizarmos a coleta de dados pelo método da pipeta

Para essa série de experimentos não houve necessidade de utilizarmos nenhum dos medidores do sistema, sendo necessário somente verificarmos a pressão atmosférica do dia do experimento para os cálculos posteriores.

Utilizou-se óleo de bomba difusora DC704 como fluido para o método da pipeta devido a sua baixíssima pressão de vapor frente ao óleo de bomba mecânica ou até mesmo ao óleo mineral comum, caso contrário a desgaseificação poderia interferir na medida de vazão.

Para cada experimento abriu-se a válvula agulha da parte superior do sistema, de forma a permitir maior vazão do ar atmosférico para o sistema. A abertura foi controlada pelo número de voltas do mecanismo de regulação da válvula agulha. Quanto maior o número maior a abertura da válvula e consequentemente maior a vazão. Foram utilizados os seguintes números de voltas:

- Seis voltas para o Experimento 4
- Oitos voltas para o Experimento 5
- Dez voltas para o Experimento 6

Para todos os experimentos utilizamos a condutância padrão de 0,08 mm.

4.6 Configuração do Arranjo para os Experimentos 4,5 e 6

O sistema principal de vácuo foi acoplado ao sistema auxiliar composto pela válvula agulha que ajustamos entre os experimentos, a válvula de pré-vácuo responsável pelo controle de início/interrupção do experimento, a pipeta graduada de 50 mL e o béquer que serviu como recipiente do óleo de bomba difusora. A ligação foi feita através de uma interseção de aço inoxidável como é possível ver na figura 22. Uma visão geral dos sistemas e da adaptação do arranjo pode ser visto nas figuras 23 e 24.



Figura 23 - Fotografia do detalhe do acoplamento dos sistemas



Figura 24 - Fotografia do sistema para os experimentos 4,5 e 6

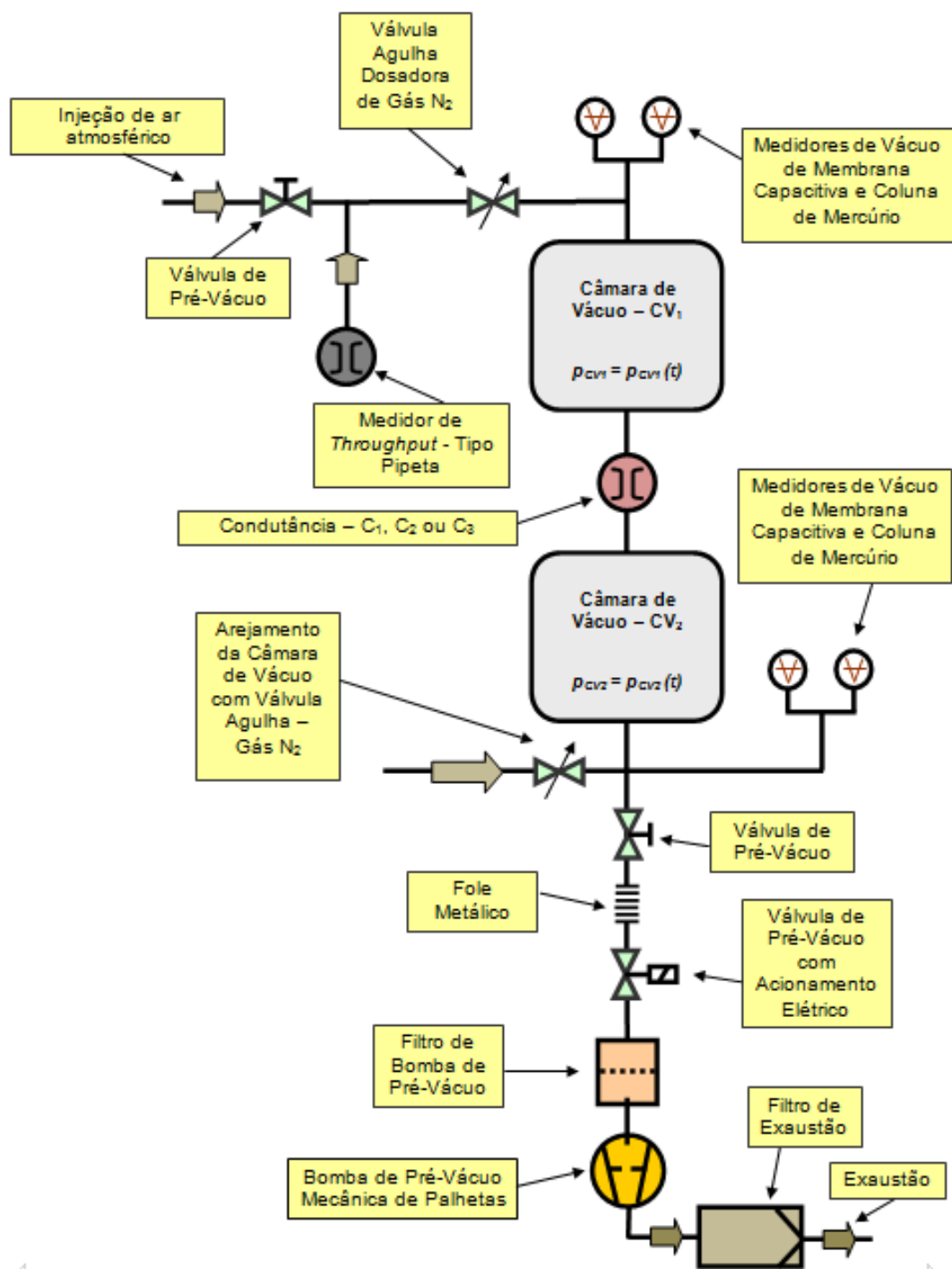


Figura 25 - Diagrama do sistema para os experimentos 4,5 e 6

4.7 Execução dos Experimentos 4,5 e 6

Antes de começarmos a realizar os procedimentos após a junção dos dois sistemas realizamos um teste de vazamento para verificarmos qualquer problema com o sistema.

Para esse experimento também seguimos o seguinte roteiro:

1. Com a válvula agulha dosadora fechada bombeamos o sistema principal até a pressão final (10^{-3} torr) com o intuito de criar uma diferença de pressão entre os dois sistemas.
2. Estabelecemos que marcaríamos o tempo de subida do óleo de bomba difusora entre os marcos de 20 ml e 30 ml da pipeta graduada, tendo assim uma variação de 10 ml.
3. Abrimos a válvula de pré-vacuo responsável pela injeção do ar atmosférico e em seguida ajustamos o número de voltas de abertura na válvula agulha dosadora. É importante dizer que isso não ocasionou a subida do óleo de bomba difusora, pois o sistema estava sendo arejado com gás do próprio ambiente sendo essa vazão bastante pequena, como é possível verificar na representação da figura 25.

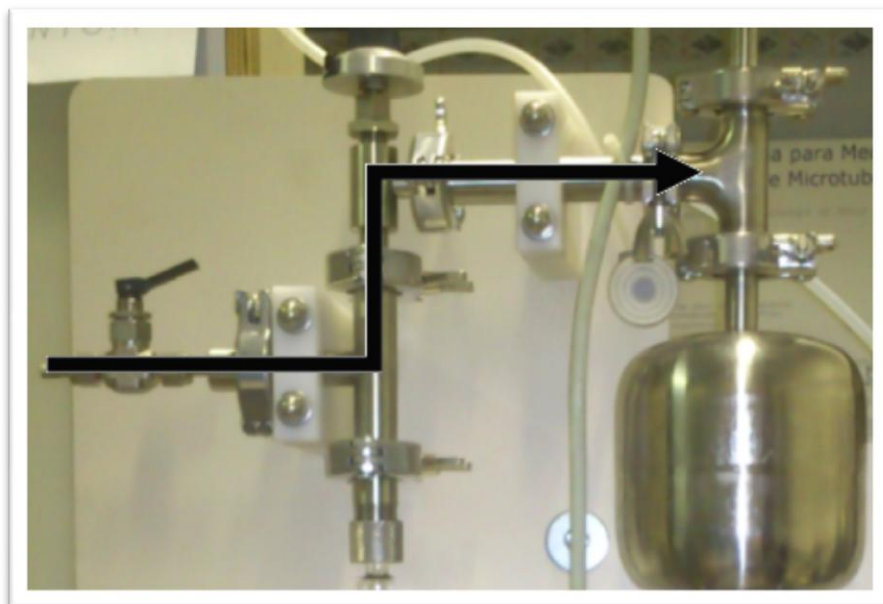


Figura 26 - Representação do fluxo de ar atmosférico percorrido com a válvula de pré-vácuo aberta

4. Fechamos a válvula de pré-vácuo, ocasionando a subida do óleo de bomba difusora na pipeta graduada devido a diferença de pressão. É possível observar com o auxílio da figura que o gás que está indo por difusão para o sistema principal é proveniente da pipeta e a mesma está a pressão igual à atmosférica.

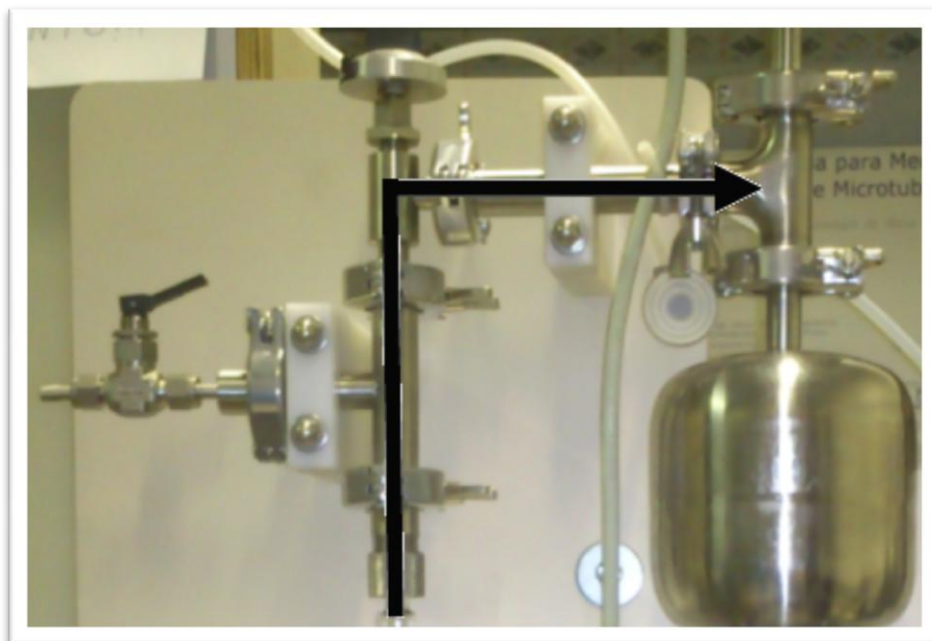


Figura 27 - Representação do fluxo de ar atmosférico percorrido com a válvula de pré-vácuo fechada

5. Iniciamos a contagem no cronômetro assim que o óleo passou pela marca dos 30 mL da pipeta e interrompemos a contagem quando a marca do óleo alcançou a marca dos 20 mL.
6. Abrimos novamente a válvula de pré-vácuo para interromper a subida do óleo que imediatamente começou a descer.

Realizamos a medição do tempo decorrido entre os 10 mL das marcas estabelecidas por três vezes, repetindo assim os procedimentos de 5 a 6 esse número de vezes antes de abrirmos a válvula agulha dosadoras para o próximo experimento.

É importante ressaltar que para nos assegurarmos que a subida do óleo se daria de forma constante, realizamos uma filmagem para a coleta de pontos a cada segundo. Outro ponto importante de destacar foi o tempo de espera entre cada procedimento, esperamos que todo óleo de bomba difusora presente nas paredes da pipeta escorresse novamente ao béquer.

5 Resultados e Comentários

5.1 Coleta Computadorizada de Dados

Através dos dados coletados pode-se traçar curvas nas quais as medidas do display foram comparadas com os dados do computador como mostra o gráfico 1.

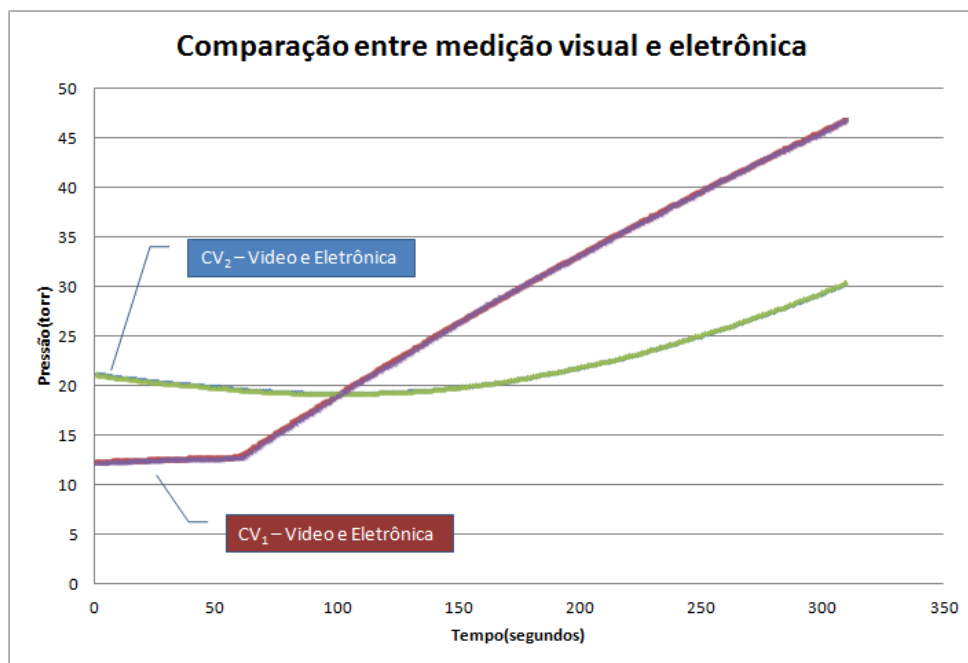


Gráfico 1 - Teste de confiabilidade da coleta computadorizada de dados

É possível notar que os dados adquiridos através da eletrônica dos multímetros para o computador e através do vídeo são na prática os mesmos pontos, não havendo divergência portanto entre a leitura do display e do sinal analógico da saída RS232 da unidade controladora dos medidores de membrana capacitiva.

Desta forma nos asseguramos que a aquisição de dados computadorizada é perfeitamente viável e confiável.

5.2 Experimentos 1,2 e 3

Após a obtenção dos dados pela coleta computadorizada, traçou-se as curvas da variação de pressão no tempo de forma a caracterizar a vazão do gás N_2 entre as câmaras de vácuo de nosso sistema.

No gráfico 2 pode-se ver essa variação de pressão no tempo para o experimento 1, no qual utilizou-se a agulha do tipo *Spinal Needle* de 0,022 mm de diâmetro interno.

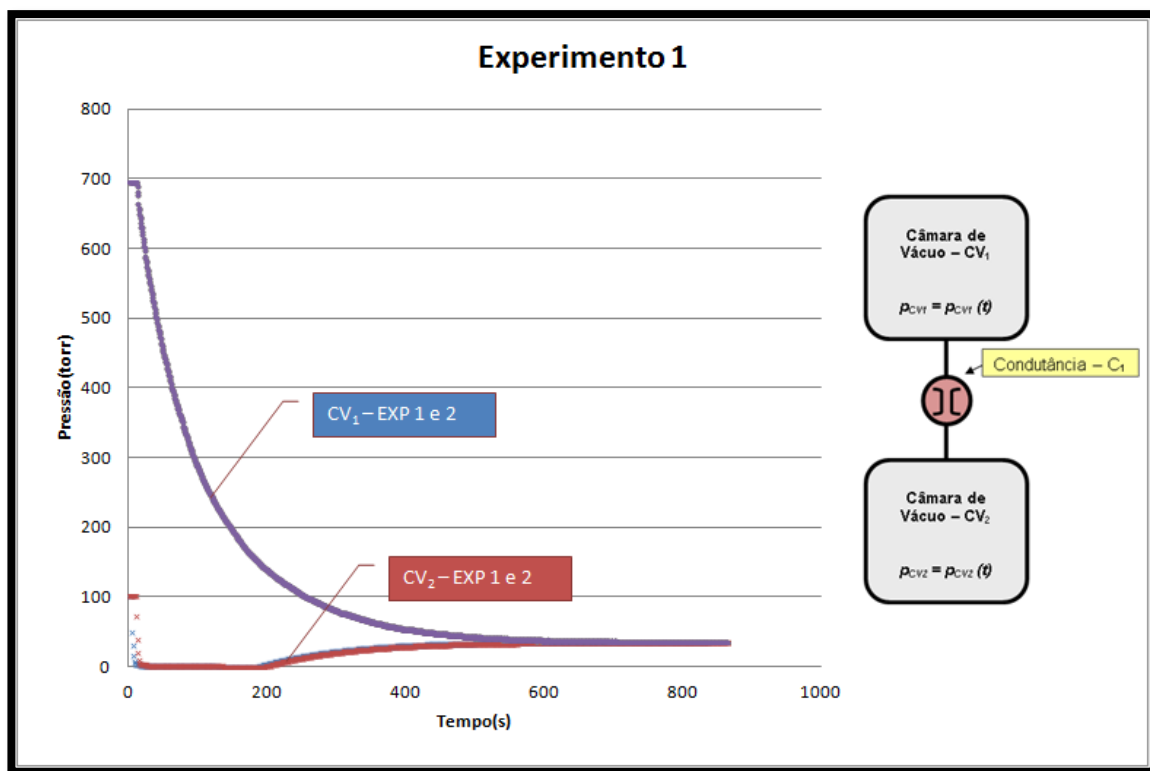


Gráfico 2 - Gráfico da vazão de gases no Experimento 1

Pode-se primeiramente verificar a igualdade entre as curvas das duas realizações do **Experimento 1**, nos assegurando desta forma, através da reprodutibilidade do experimento, a validação do nosso estudo. É possível também notar o exato momento em que o bombeamento de nosso sistema cessa em torno dos **200 segundos**. É importante notar que para a curva da CV₂ somente temos uma leitura precisa dos dados para pressões abaixo de 100 torr devido ao fundo de escala do medidor de membrana capacitiva correspondente.

O gráfico 3 nos dá uma melhor visualização do tempo decorrido para a estabilização de pressão no sistema.

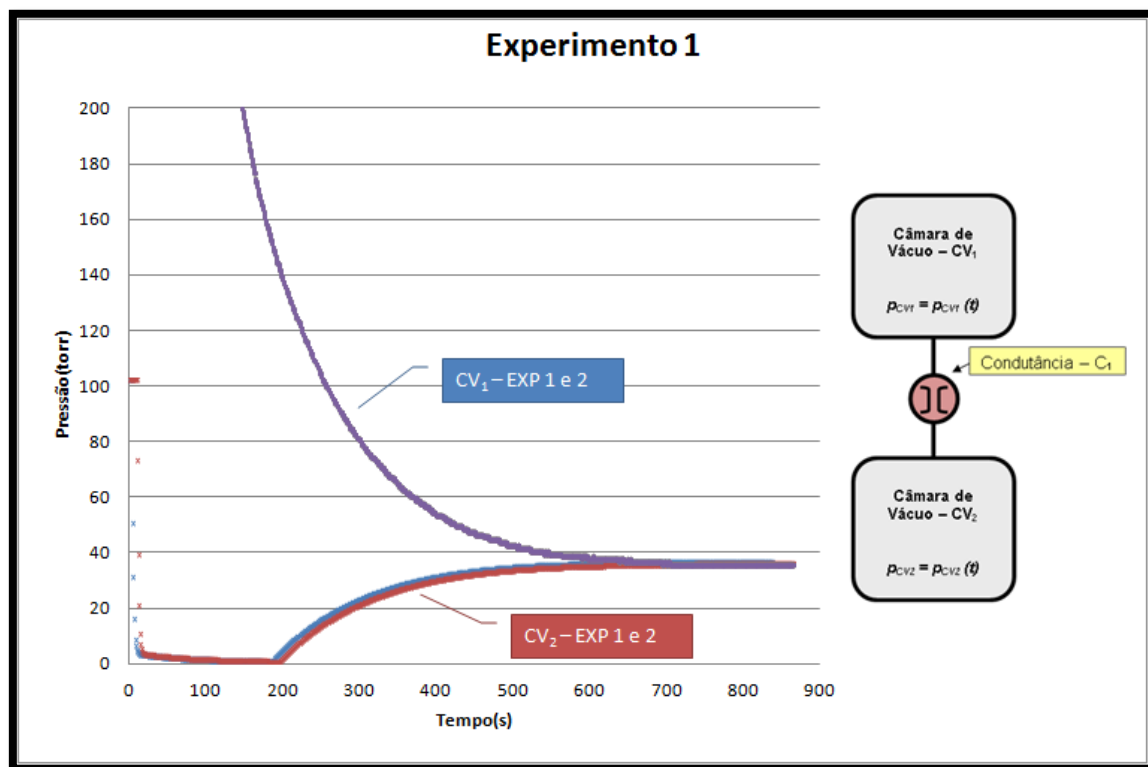


Gráfico 3 - Gráfico do Experimento 1 ampliado na região abaixo dos 100 torr

Conforme mencionado na execução dos experimentos, a coleta de dados de encerrou quando se constatou a igualdade entre as pressões nas duas câmaras de vácuo sendo assim o tempo da coleta dos últimos pontos corresponde a aproximadamente o tempo até a estabilização do sistema. Para o experimento 1 estimamos esse tempo em aproximadamente **860 ± 15 segundos**.

Para o experimento 2, obtivemos as curvas características situadas no gráfico 4, para uma condutância padrão de 0,05mm.

Em um primeiro momento já podemos notar o efeito da troca das condutâncias. Com uma condutância maior, logicamente a câmara de vácuo 1 (CV₁) será bombeada mais rapidamente.

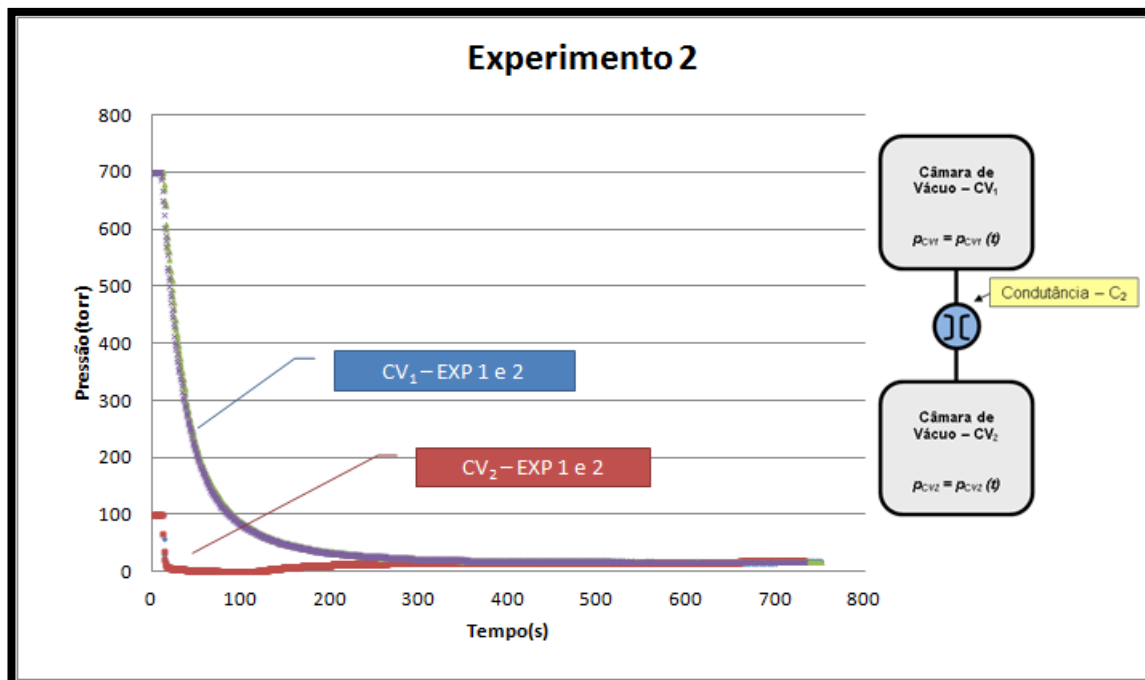


Gráfico 4 - Gráfico da vazão de gases no Experimento 2

Para melhor análise nas regiões de interesse uma ampliação do gráfico 4 pode ser vista no gráfico 5.

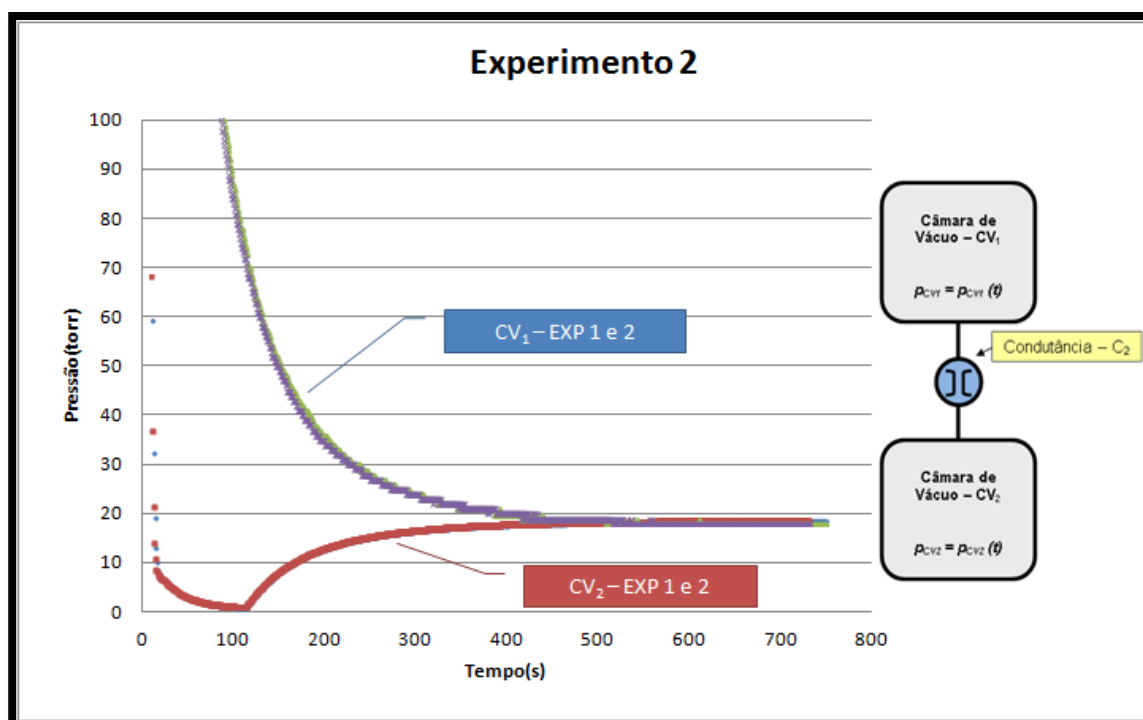


Gráfico 5 - Gráfico do Experimento 2 ampliado na região abaixo dos 100 torr

O aumento da condutância no Experimento 2 resultou também em um rápido bombeamento da câmara de vácuo 2 (CV₂). Novamente, como está descrito na execução do experimento 2, o bombeamento foi interrompido tão logo quanto a pressão chegou em 1 torr então podemos estimar que o tempo de bombeamento da CV₂ caiu girando em torno dos **110 segundos**.

O tempo para a equalização da pressão entre as duas câmaras de vácuo do sistema também caiu, estimamos o tempo em **730 ± 15 segundos** após o início do experimento.

Para o Experimento 3 tem-se o gráfico 6, correspondente a uma condutância padrão de 0,08 mm de diâmetro interno. Pela modelagem do sistema, o diâmetro da condutância é um fator elevado à quarta potência sendo muito determinante para o valor da condutância de um tubo. Isso pode ser verificado pelo aumento do bombeamento do gás N₂ da câmara de vácuo 1 (CV₁), comprovado pela rápida queda de pressão ao longo do tempo em relação as outras condutâncias e com apenas 0,03 mm de diferença entre a condutância padrão do experimento 2 e 0,058 mm de diferença entre a agulha do tipo *spinal needle*.

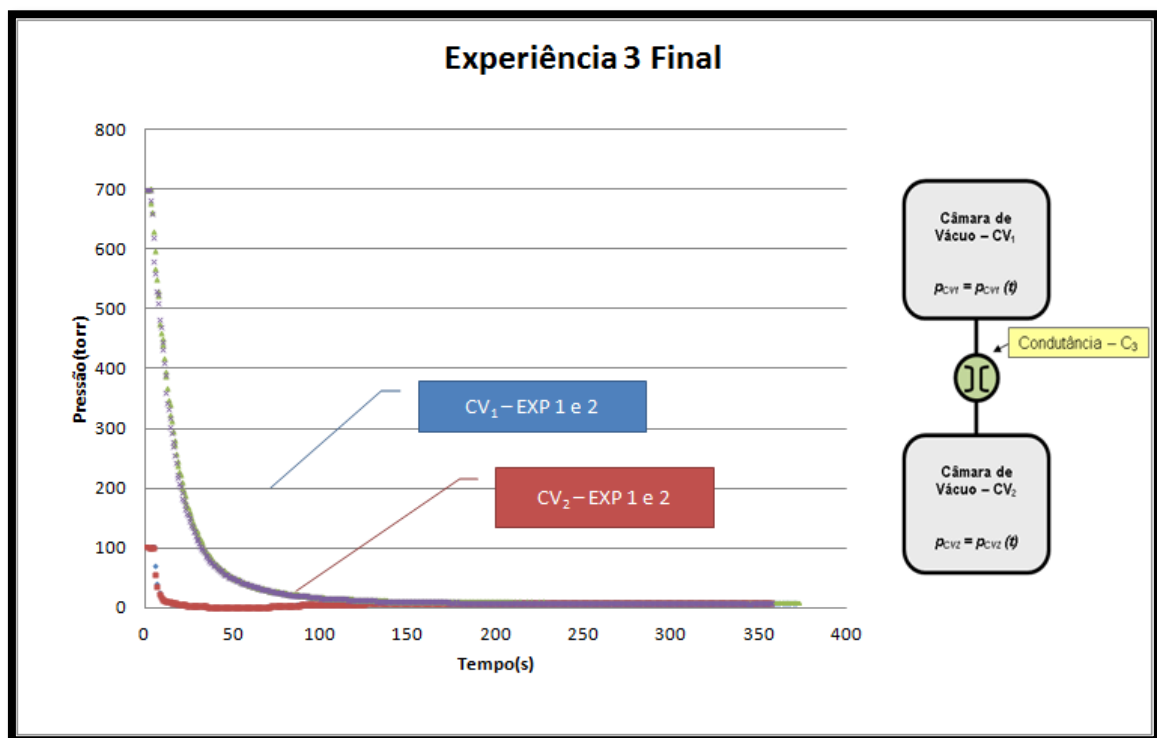


Gráfico 6 - Gráfico da vazão de gases no Experimento 3

No gráfico 7 podemos verificar a tendência na diminuição do tempo de bombeamento da CV₂ da pressão atmosférica até 1 torr sendo esse tempo situado próximo aos **60 segundos**.

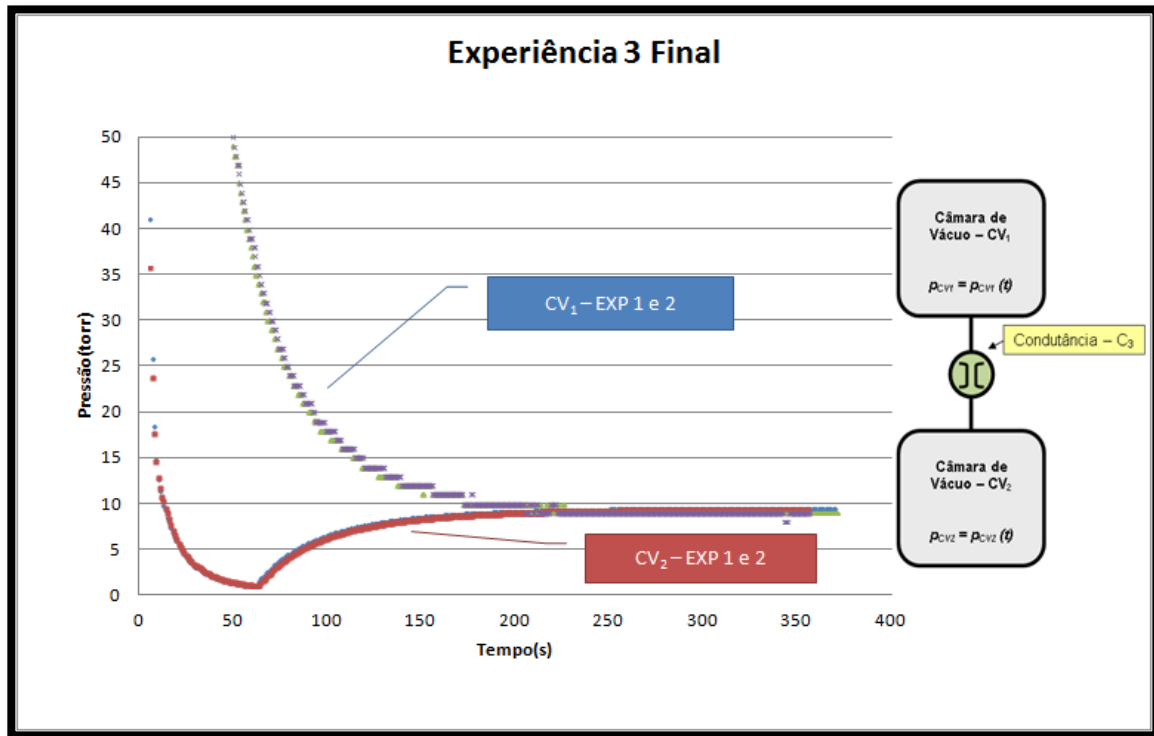


Gráfico 7 - Gráfico do Experimento 3 ampliado na região abaixo dos 50 torr

A tendência na diminuição do tempo para a igualdade das pressões nas câmaras de vácuo também é observada, e com um tempo estimado de **375 ± 15 segundos**. Também é possível notar o aumento expressivo na queda de pressão pelos próprios pontos no gráfico que para o medidor de membrana capacitiva da câmara de vácuo 1 (MMC1), aparecem mais distantes. Tal efeito não ocorre para o medidor de membrana capacitiva da câmara 2 (MMC2) pois este está ligado ao multímetro de bancada que apresenta maior precisão.

5.3 Modelagem do Sistema pelo Mathcad

A modelagem do Mathcad foi feita a partir da configuração dos experimentos 1,2 e 3. Com o software conseguiu-se esboçar a curva teórica do bombeamento total do sistema para a condutância de 0,022mm.

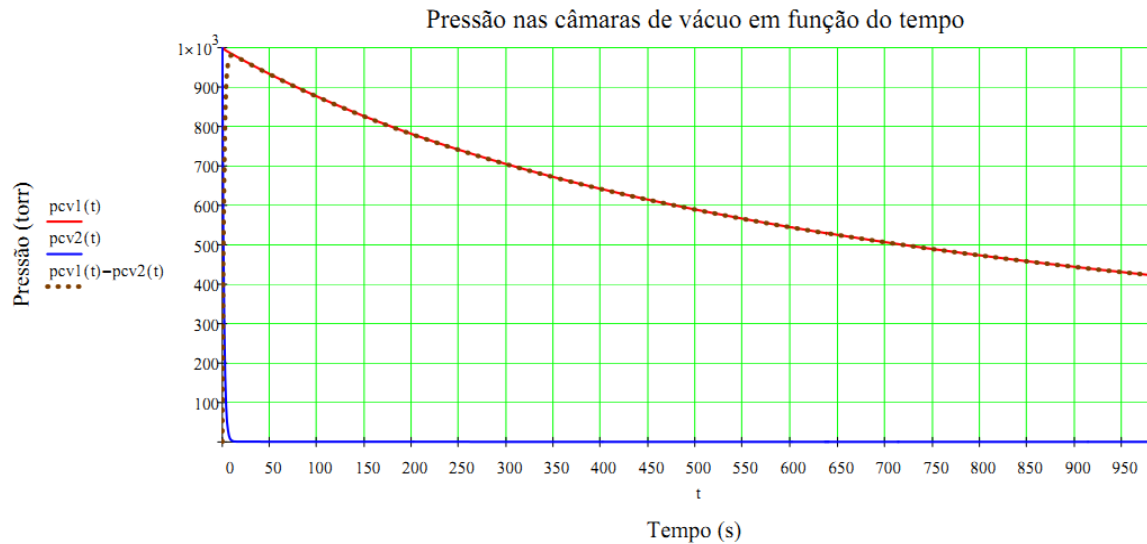


Gráfico 8 - Curva teórica do bombeamento total do sistema de vácuo

No gráfico 9 pode-se ver com mais detalhes a curva referente a variação da pressão no tempo para a câmara de vácuo 2 (CV₂).

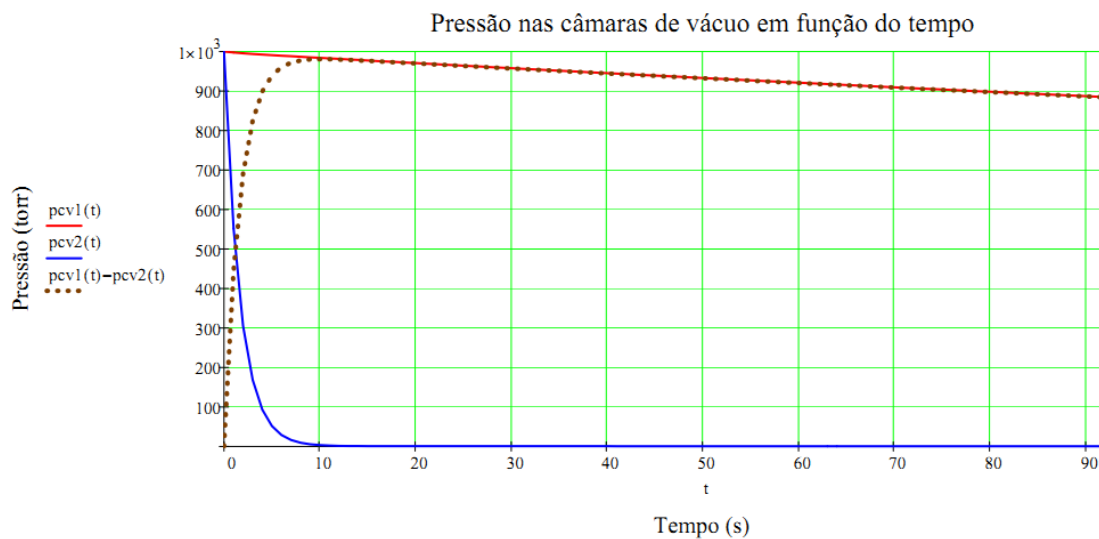


Gráfico 9 - Ampliação da curva teórica do bombeamento total do sistema de vácuo

Ainda com o Mathcad foi possível esboçar a curva da vazão em função do tempo. É interessante notar a queda da vazão perante o tempo com a diminuição das pressões tanto na câmara de vácuo 1 (CV₁) quanto na câmara de vácuo 2 (CV₂)



Gráfico 10 - Gráfico da vazão em função do tempo para o bombeamento total do sistema de vácuo

5.4 Experimentos 4,5 e 6

Os dados obtidos foram calculados através da equação da vazão, porém considerando a pressão constante como já explicado no capítulo 4.

$$Q = p \times \frac{dV}{dt}$$

O gráfico 11 mostra que a vazão para o sistema se dá de forma constante possibilitando assim a validação dos cálculos realizados.

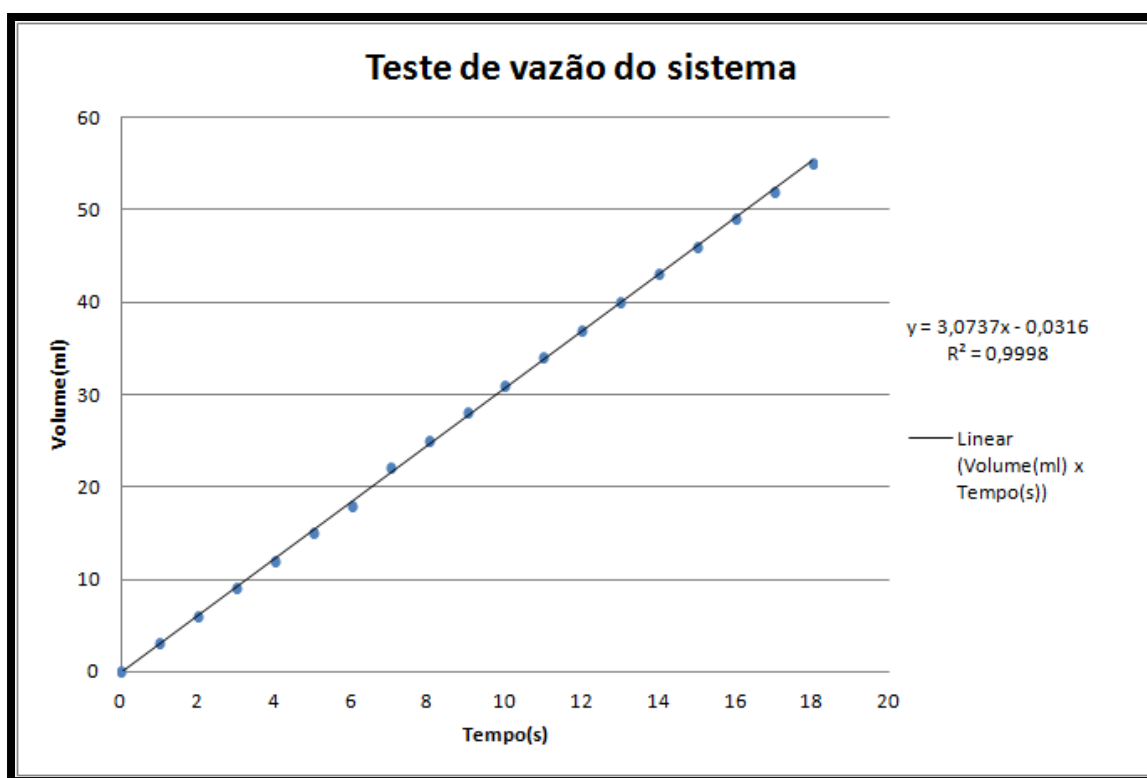


Gráfico 11 - Gráfico da vazão do sistema no tempo

Com todos os dados em mãos calculamos os valores da vazão do sistema através do **Microsoft Excel** onde os valores foram calculados de maneira automática como é possível ver na tabela 2 proveniente do Experimento 4 para uma abertura da válvula agulha dosadora de 6 volts.

Experimento 4 - 6 volts			
$\Delta V(l)$	$\Delta t(s)$	Média $\Delta t(s)$	Pressão Atm(torr)
0,01	16,28	16,41	700
0,01	16,4	Desvio Padrão	Vazão(torr.l/s)
0,01	16,55	0,135277493	4,27E-01

Tabela 2-Planilha utilizada para cálculo da vazão do sistema no Experimento 4

A tabela 3 mostra o valor da vazão do Experimento 5 para uma abertura da válvula agulha dosadora de 8 volts.

Experimento 5 - 8 voltas			
$\Delta V(l)$	$\Delta t(s)$	Média $\Delta t(s)$	Pressão Atm(torr)
0,01	5,45	5,456666667	700
0,01	5,46	Desvio Padrão	Vazão(torr.l/s)
0,01	5,46	0,005773503	1,28E+00

Tabela 3 - Planilha utilizada para cálculo da vazão do sistema no Experimento 5

Para o experimento 6, correspondente a 10 voltas de abertura da válvula agulha reguladora, a tabela 4 nos mostra a vazão do sistema.

Experimento 5 - 10 voltas			
$\Delta V(l)$	$\Delta t(s)$	Média $\Delta t(s)$	Pressão Atm(torr)
0,01	2,92	2,936666667	700
0,01	2,97	Desvio Padrão	Vazão(torr.l/s)
0,01	2,92	0,028867513	2,38E+00

Tabela 4 - Planilha utilizada para cálculo da vazão do sistema no Experimento 6

É possível notar o aumento da vazão do sistema com a abertura da válvula agulha dosadora.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O sistema se mostrou bem eficaz no que diz respeito ao estudo de vazões em sistemas de vácuo, cumprindo assim todas as expectativas. De forma ágil e prática conseguimos realizar diferentes experimentos de forma a observar diferentes aspectos da vazão em sistemas de vácuo.

Todos os experimentos propostos foram executados de maneira cuidadosa e metódica fornecendo assim dados bastante confiáveis, possibilitando uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos em sistemas de vácuo.

A modelagem do sistema se mostrou satisfatória e bastante promissora abrindo a possibilidade de modelagens mais complexas como, por exemplo, a modelagem dos experimentos realizados.

Como perspectiva para outros trabalhos experimentais, o sistema pode ser facilmente adaptado para a medição e caracterização de condutâncias, bem como o estudo da vazão de outros gases nas mesmas configurações de experimento deste trabalho.

7 Referências

- [1] D. M. Hoffman, B. Singh, J.H. Thomas III, **Handbook of Vacuum Science and Technology**, New Delhi, Elsevier, 2008.
- [2] J. E. O'Hanlon, **A User Guide to Vacuum Technology**, Library of Congress Cataloging in Publication Data, 2003.
- [3] D. M. Hata, **Introduction to Vacuum Technology**, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2008.
- [4] A. M. C. Moutinho, **Tecnologia de Vácuo**, Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, 1980.
- [5] S. F. da Silva, **Análise Teórico-Experimental de Condutâncias em Pré-Vácuo**, Trabalho de Graduação para Obtenção do Título de Tecnólogo em Materiais Processos e Componentes Eletrônicos, Fatec São Paulo, 2010.
- [6] F. S. Brito, **Desenvolvimento, Projeto e Construção de Arranjo Experimental Para Modelagem de Vazamentos Virtuais e Vazamentos Reais**, Trabalho de Graduação para Obtenção do Título de Tecnólogo em Materiais Processos e Componentes Eletrônicos, Fatec São Paulo, 2010.
- [7] F. T. Degasperi, **Material de Aula da Disciplina de Tecnologia do Vácuo do Curso de Materiais Processos e Componentes Eletrônicos**, Fatec São Paulo.
- [8] Disponível no site: www.phy.uct.ac.za/demoline/virtual/ [Consultado no dia 17/04/2013].

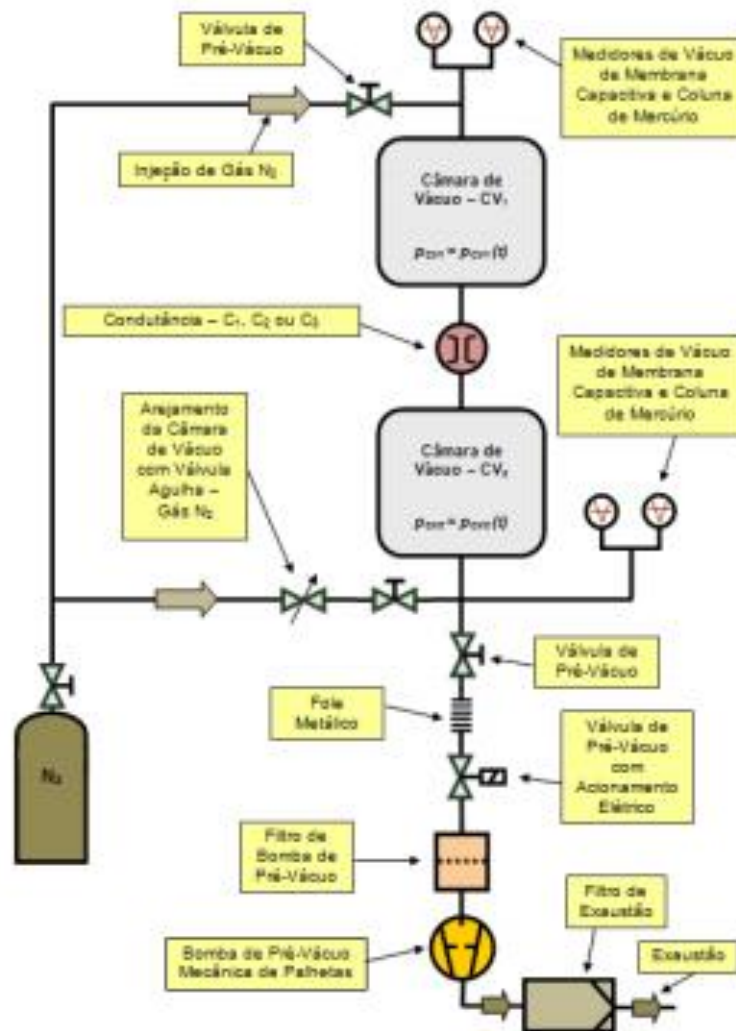
8 Apêndices

8.1 Apêndice A – Modelagem Mathcad

Modelagem e Cálculo da Pressão em Função do Tempo em Sistemas de Vácuo Complexos

Alan R. Cerqueira, Edelson Venuto, Matheus de Andrade,
Johannes S. Santos e Francisco Tadeu Degasperin.
LTV - DSE - FATEC-SP - CEETEPS
Junho 2013

- Modelagem de sistema de pré-vácuo, mais especificamente dentro do vácuo grosseiro, operando da pressão atmosférica - 760 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 m^3/h , ou ainda, 2,8 l/s.
- Os medidores utilizados nas experiências foram do seguintes tipos:
 - a) Coluna de mercúrio: montadas no Laboratório de Tecnologia do Vácuo - LTV, utilizadas em muitas medições realizadas no LTV. Possui faixa de operação que vai desde a pressão atmosférica (760 mmHg) até 1 mmHg. Mesmo sendo muito antigo este medidor de pressão, ele é bastante seguro e confiável nas medições de pressão. Depende apenas de grandezas diretamente acessíveis e com valores com pequenas incertezas. Devemos ter sempre presente que as medições de pressão com a coluna de mercúrio considera que não haja variação brusca de pressão. Veja que a coluna de mercúrio tem massa e portanto inércia. Desta forma, para variar a posição sem acelerações apreciáveis, devemos ter variações lentas de pressão (variações lentas de força). As unidades de pressão torr e mmHg são exatamente as mesmas, isto é, 1 torr=1 mmHg.
 - b) Membrana Capacitiva: foram utilizadas dois medidores sensores de membrana capacitivos modelo Ceravac, fabricados pela Oerlikon-Leybold, com faixa de operação de e 1000 torr até 10^{-2} torr para o medidor instalado na câmara de vácuo 1 (CV₁) e o outro sensor de membrana capacitivo com faixa de operação de 100 torr até 10^{-2} torr para o medidor da câmara de vácuo 2(CV₂).
- 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 .

Câmara de Vácuo 1 - CV_1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = -S_{ef1} \cdot p_{CV1}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV1}$$

Câmara de Vácuo 2 - CV_2

$$V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} = -S_{ef2} \cdot p_{CV2}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i^{CV2}$$

- 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 10⁻¹ 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 = λ/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

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

- Temos as seguintes equações diferenciais, considerando que a única fonte de gás, além certamente do gás do volume, são as fontes de gases da desgaseificação. Estas fontes de gases são importantes para pressões abaixo de 10⁻³ torr. Como trabalharemos até 1 torr, desprezaremos as desgaseificações. Fizemos testes de vazamentos e estes são menores que 10⁻⁴ torr.L/s.
- Continuando, temos ainda as seguintes simplificações pertinentes na modelagem em construção:
 - S_{ef1} é aproximadamente igual a condutância C, matematicamente S_{ef1} = C.
 - S_{ef2} é aproximadamente igual a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo mecânica de palhetas S_{BV} condutância C, matematicamente S_{ef2} = S_{BV}.
 - A grandeza C.[p_{CV1}(t) - p_{CV2}(t)] é a quantidade de gás - em termos de throughput - que deixa a câmara de vácuo CV₁ e entra na câmara de vácuo CV₂.

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = -C \cdot p_{CV1}(t)$$

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 2

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

- Continuando, inserindo as expressões da condutância C do tubo que conecta a câmara de vácuo 1 à câmara de vácuo 2 temos as seguintes equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas e não lineares.

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 1

$$V_{CV1} \frac{dp_{CV1}(t)}{dt} = -134 \frac{d^4}{L} \cdot \left[\frac{p_{CV1}(t) + p_{CV2}(t)}{2} \right] \cdot p_{CV1}(t)$$

Equação Diferencial da Câmara de Vácuo 2

$$V_{CV2} \frac{dp_{CV2}(t)}{dt} = -S_{BV} \cdot p_{CV2}(t) + 134 \frac{d^4}{L} \cdot \left[\frac{p_{CV1}(t) + p_{CV2}(t)}{2} \right] \cdot [p_{CV1}(t) - p_{CV2}(t)]$$

- Os volumes das câmaras de vácuo são os seguintes:

$$V_{cv1} = (1,30 \pm 0,10) \text{ L}$$

$$V_{cv2} = (3,70 \pm 0,10) \text{ L}$$

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

- Dados para a modelagem do sistema de vácuo:

Condutância C_1 :

- Diâmetro do tubo: $d1 := 0.022 \quad \text{cm}$
- Comprimento do Tubo: $L1 := 8.7 \quad \text{cm}$

$$\frac{d}{dt} p1(t) = \frac{1}{V_{cv1}} \left[-134 \cdot \frac{d1^4}{L1} \left[\frac{(p1(t) + p2(t))}{2} \right] \cdot p1(t) \right] \quad p1(0) = 1000 \quad \text{mbar}$$

$$\frac{d}{dt} p2(t) = \frac{1}{V_{cv2}} \left[-S_{bv} \cdot p2(t) + 134 \cdot \frac{d1^4}{L1} \left[\frac{(p1(t) + p2(t))}{2} \right] \cdot (p1(t) - p2(t)) \right] \quad p2(0) = 1000 \quad \text{mbar}$$

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