

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE RADIÔMETRO DE CROOKES

JOSÉ ROBERTO MIALICHI

Aluno da graduação de Física – Unicamp
jmialich@lei.ifi.unicamp.br

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO GAMA

Departamento de Física Aplicada – IFGW- Unicamp
gama@ifi.unicamp.br

RESUMO

Este projeto de Instrumentação para o Ensino (F809) se propõe ao estudo e ao desenvolvimento de um Radiômetro de Crookes, cuja finalidade é demonstrar o comportamento de moléculas sob condições de alto vácuo.

1. INTRODUÇÃO

1.1 O Conceito de Vácuo

Vácuo é um assunto que, desde que o homem adquiriu a faculdade de refletir sobre o mundo que o rodeia, tem fascinado os filósofos e cientistas. Desde o tempo de Aristóteles tem-se a noção de que o vácuo, significando um espaço vazio, é uma impossibilidade lógica. Esta idéia permaneceu aceita desde o tempo dos gregos até meados do século XVII, quando Evangelista Torricelli realizou sua famosa experiência de emborcar um tubo de vidro cheio de mercúrio em um recipiente também contendo mercúrio, e observou uma coluna de aproximadamente 76 cm sustentar-se. Esta experiência é um marco porque mostrou, pela primeira vez, que poderia haver um espaço "vazio" acima da coluna de mercúrio. Além disso, foi prova indiscutível de que o mar de ar que forma a nossa atmosfera exerce uma pressão, que poderia ser medida através da altura da coluna de mercúrio, o que foi magistralmente mostrado por Pascal e seu cunhado Perier ao levar um sistema de Torricelli ao pico de uma montanha, anotando a variação da altura da coluna.

A crença de que o vácuo era impossível ("a natureza tem horror ao vácuo") manteve-se, com aceitação geral, desde Aristóteles até Torricelli, por aproximadamente 1900 anos. A partir da verdadeira revolução científica e tecnológica iniciada por Torricelli, vimos aproximadamente 350 anos de desenvolvimentos muito marcantes nesta área, até chegarmos ao ponto em que a tecnologia de vácuo é imprescindível à ciência e tecnologia moderna.

1.2 Desenvolvimento histórico

Como colocado acima, os gregos colocaram a impossibilidade lógica da existência de vácuo, expressa no dito "a natureza tem horror ao vácuo". Esta noção foi aceita desde os tempos de Aristóteles até meados do século XVII, quando surgiram os primeiros experimentos mostrando que o ar tem peso e que também exerce uma pressão significativa. Torricelli foi o primeiro, em 1644, a mostrar e explicar o experimento da sustentação da coluna de mercúrio em um tubo de vidro emborcado em um recipiente já contendo mercúrio, como resultado do equilíbrio entre duas colunas, uma de ar e outra de mercúrio, e que o espaço livre acima do mercúrio no tubo não estava ocupado por nada – vácuo, portanto, e este vácuo impedia a transmissão de som, mas permitia a passagem de luz e da atração magnética. Imediatamente em seguida, Pascal e seu cunhado Perier mostraram, em 1648, que a pressão atmosférica varia com a altura. Este experimento mostrou, por sua vez, que a coluna de Torricelli podia ser usada como um medidor de vácuo, o que ocorreu durante muito tempo, tendo este método sobrevivido até nossos dias. A utilização do sistema Torricelliano também constitui a primeira bomba de vácuo, de um único movimento, e foi aperfeiçoada mais tarde, resultando na chamada bomba de Sprengel, a ser descrita abaixo.

Iniciando em 1640, Otto von Guericke na Alemanha realizou diversos experimentos sobre vácuo, que o levou ao desenvolvimento da primeira bomba mecânica de vácuo. Seus primeiros experimentos usaram uma bomba d'água adaptada para esvaziar um barril de água. Dada a dificuldade desta empreitada, von Guericke modificou a bomba para a retirada de ar do barril, mas a impossibilidade de vedação levou-o a usar hemisférios de cobre selados com tiras de couro (molhadas com mistura de cera com terebentina). Com isso, von Guericke demonstrou a possibilidade de usar vácuo para exercer grandes forças, como espetacularmente demonstrado pelo seu famoso experimento dos hemisférios de Magdeburgo, em 1654, em que duas parselhas de oito cavalos não foram capazes de separar dois hemisférios de diâmetro de 119 cm. Com isso, von Guericke aperfeiçoou a bomba mecânica de vácuo, melhorando sua vedação, aperfeiçoando a válvula de saída (cujo esquema ainda é usado hoje, substituindo água por óleo) e diminuindo o espaço morto no corpo da bomba. Desenvolvimentos posteriores seguiram a trajetória de aperfeiçoar o esquema de von Guericke, que se estendeu até o final do século XIX, seguido de um retorno ao conceito torricelliano de bombas de "pistão" líquido de mercúrio, seguido do aparecimento das bombas mecânicas rotativas, e de adaptações de bombas de jato de

vapor, turbo-mecânicas e finalmente bombas baseadas em ionização, combinação química, adsorção e adsorção criogênica. O desenvolvimento das bombas de vácuo levou ao correspondente desenvolvimento de medidores de vácuo. O primeiro deles foi a própria coluna de mercúrio de Torricelli (desenvolvida por Boyle ao redor de 1660) capaz, com adaptação de verniers ou sistemas ópticos, de medir pressões com precisão de 0,001 mm de Hg. Em seguida, em 1874, H. G. McLeod introduziu o seu medidor, no qual se comprime um grande volume de gás a baixa pressão no pequeno volume de um capilar, e utilizando a lei de Boyle, pode determinar, com precisão, a pressão inicial do gás. Este tipo de medidor é absoluto, e embora difícil (complicado) para usar, constitui até hoje um padrão primário para medidas de pressão desde 1 até 10^{-6} mm Hg. No final do século XIX (1897) surgiram os medidores baseados em viscosidade dos gases, cuja aceitação não foi muito grande. No início do século XX (Pirani, 1906) tivemos o desenvolvimento dos primeiros medidores de vácuo baseados na medida da condutividade térmica de gases, que, devido à facilidade de manuseio e à sua robustez e resistência mecânica, tiveram ampla aceitação até os dias de hoje. Quase que simultaneamente houve o desenvolvimento dos medidores de vácuo radiométricos por Knudsen em 1910, cuja aceitação, tal como aconteceu com os medidores à base de viscosidade, foi menor que a dos medidores de condutividade térmica. Também no início do século XX tivemos o aparecimento dos primeiros medidores de vácuo baseados em ionização do gás residual, levando-se ao desenvolvimento de medidores chamados de catodo quente (1916) ou catodo frio (1937). Os medidores de ionização de catodo quente sofreram diversos melhoramentos, chegando a um limite inferior de medida de aproximadamente 10^{-8} mm Hg, quando foi demonstrado que esse limite advinha da geração de raios X moles que forneciam uma foto-corrente cujo valor correspondia a este limite de pressão. Bayard e Alpert (1950) modificaram o projeto do medidor de modo a minimizar esta foto-corrente, levando o limite do medidor a 10^{-10} mm Hg, e permitindo, pela primeira vez, medidas de vácuo no intervalo de pressões que hoje denominamos de ultra-alto-vácuo. Hoje em dia, modificações deste tipo de medidor levam a medidas até o limite inferior de 10^{-14} mm Hg (Lafferty, 1961), podendo-se estender este limite para 10^{-18} mm Hg. Também o medidor de catodo frio sofreu diversas modificações, tendo seu limite inferior levado para 10^{-12} mm Hg. Estes medidores são bastante robustos, e com os medidores de condutividade térmica, formam um par para medidas de vácuo desde pressões ambientes até 10^{-7} mm Hg, de alta popularidade nos dias de hoje.

O Radiômetro de Crookes

Um dos primeiros instrumentos a serem usados para detectar gases a baixa pressão foi o radiômetro inventado por Sir William Crookes, em 1873. O instrumento consiste de um bulbo de vidro no qual um pequeno cilindro está montado no eixo vertical. O cilindro possui quatro braceletes de alumínio nos quais estão encaixados quatro placas finas de mica, sendo um dos lados (de cada placa) revestido de tinta preta, e o outro lado revestido de um filme fino de prata depositado, dispostas de modo alternado. Estas placas estão colocadas de modo que seus planos são paralelos ao eixo do cilindro.

Se uma fonte de luz ou calor é colocada próxima ao bulbo, e a rarefação dentro do bulbo estiver ajustada em um valor determinado, as placas giram. Este fenômeno era explicado devido a diferença de momento exercida pela pressão de radiação nas placas; mas para pressões muito baixas, a rotação das placas praticamente cessa, em desacordo com o fundamento apresentado.

A teoria do funcionamento do dispositivo não foi compreendida, aparentemente, por um longo tempo, e a tentativa de usá-lo como medidor de baixas pressões levava a resultados insatisfatórios. Alguns anos depois, W. E. Ruder, do Laboratório de Pesquisas da General Electric, desenvolveu um método de uso do radiômetro para medidas da pressão residual de gases em lâmpadas incandescentes.

Como resultado destas investigações das leis de transferência de calor em gases a baixa pressão, M. Knudsen chegou a uma explicação clara do funcionamento do radiômetro e desenvolveu, nesta mesma linha, um acurado instrumento de medida de pressões extremamente baixas.

De acordo com Knudsen, a força mecânica que gira as placas é exercida entre duas superfícies mantidas a diferentes temperaturas a baixas pressões. Isto se deve ao fato de que moléculas que colidem em uma superfície quente são ricocheteadas com energia cinética média maior do que aquelas que colidem com uma superfície fria. No caso do radiômetro, a superfície escura absorve calor da fonte de luz, e as moléculas ricocheteadas das placas estão em uma temperatura maior do que aquelas que colidem com as paredes do bulbo e com o lado das placas pintado de branco. Consequentemente o momento resultante é comunicado às placas que tendem a girar.

Modelo Teórico

O princípio deste aparato pode ser explicado através da figura abaixo.



Vamos considerar duas placas paralelas A e B colocadas a uma distância menor que o livre caminho médio das moléculas. Esteja A a mesma temperatura T_0 do gás residual, enquanto B é mantido a uma temperatura maior T_1 . O lado oposto de A em relação a B será bombardeado por moléculas advindas do gás residual a temperatura T_0 com velocidade média dada pela equação:

$$V_0 = (3R_0T_0 / M)^{1/2}$$

O lado de A cuja face está voltada para B será bombardeada por moléculas provenientes de B a temperatura T_1 , com velocidade média dada pela equação:

$$V_1 = (3R_0T_1 / M)^{1/2}$$

Consequentemente A receberá uma taxa de momentum maior neste lado em relação ao lado oposto, ocasionando um torque que repelem as placas A e B.

Se a distância entre as superfícies A e B for menor que o livre caminho médio, a força F é dada pela taxa que o momentum é transferido por unidade de área de A para B, isto é:

$$F = [nV_0(mV_1 - mV_0)] / 6$$

$$F = 3kP_{ub}[(T_1T_0)^{1/2} - T_0] / 6kT_0$$

$$F = P_{ub}[(T_1 / T_0)^{1/2} - 1] / 2$$

Para pequenas diferenças de temperatura, para o propósito da medida de pressão, esta equação pode ser reescrita da forma:

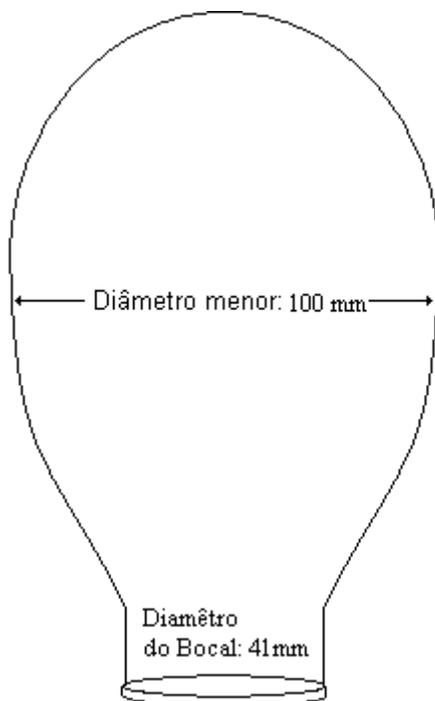
$$P_{ub} = 4F[T_0 / (T_1 - T_0)]$$

Assim, para o valor constante de $(T_1 - T_0) / T_0$, a força é proporcional a pressão e é independente do peso molecular do gás.

Sem prejuízo da aplicação do modelo teórico apresentado, em nosso aparato o arranjo das placas A e B é substituído por uma mesma placa cujos lados são isolados termicamente (placa de mica) e mantidos a diferentes temperaturas decorrente da absorvidade que apresentam, quando exposta a uma intensa fonte de luz incandescente. Para que esta propriedade fosse implementada, um dos lados de cada placa foi revestido de tinta preta para absorver luz e sobre o outro lado foi depositado um filme fino de prata para refletir luz.

Descrição Técnica

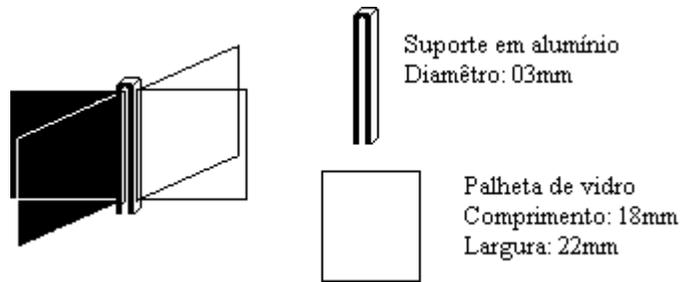
A construção do radiômetro de Crookes consiste em um balão de pirex de diâmetro pequeno (da ordem de 100 mm).



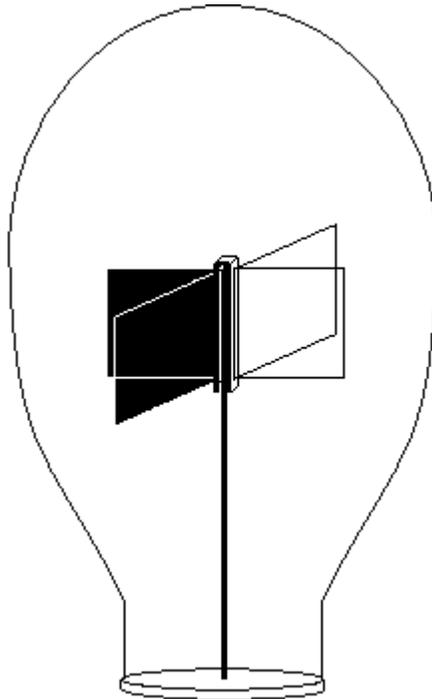
Uma base contendo uma haste metálica vertical (chamado de agulha-eixo) suporta o aparato em que as palhetas de mica revolverão.



O conjunto palhetas-eixo será construído utilizando-se um pequeno tubo fechado e emborcado, em cujas laterais externas serão encaixadas as quatro palhetas, cujas faces são revestidas alternadamente de tinta preta e de filme fino de prata depositado.



Este pequeno tubo contendo as palhetas será então emborcado e ajustado no topo da agulha, de modo a poder girar com o mínimo de atrito. A base (contendo a agulha-eixo e o conjunto de palhetas) será encaixada na boca do balão, que será então soldado a um tubo que permitirá a sua ligação a um sistema de alto vácuo, consistindo de bomba mecânica rotativa e uma bomba difusora.



Paralelamente à ligação radiômetro-sistema de vácuo, serão colocados dois medidores de vácuo, um Piranii para medidas até 10^{-3} torr e um Penning para medidas até 10^{-6} torr e uma válvula agulha para permitir a entrada de quantidade controlada de ar de modo a se poder variar a pressão à vontade do experimentador. Finalmente, usar-se-á a lâmpada para iluminar as palhetas de mica e provocar o seu movimento.

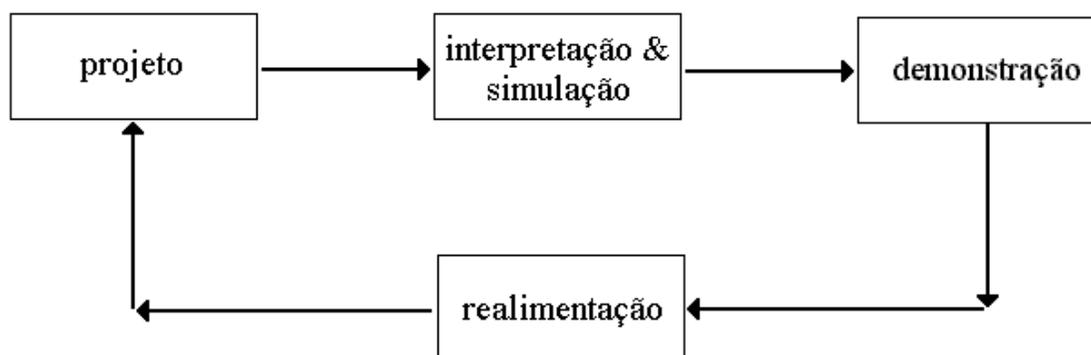
Justificativa

Em termos de um projeto de instrumentação para o ensino, o radiômetro de Crookes pode oferecer a oportunidade de discutir uma série de questões relativas à presença do ar e também dos efeitos da radiação sobre corpos sólidos. No que diz respeito à presença de ar, pode-se discutir a questão dos gases serem constituídos de moléculas que estão perpetuamente em movimento, e que, quando a pressão é abaixada utilizando-se um instrumento adequado (uma bomba de vácuo), as moléculas podem se mover distâncias maiores que em pressões mais altas. Este questionamento pode levar à discussão de pressão como resultado de choques moleculares contra uma superfície, da associação entre pressão e densidade de moléculas em um determinado volume, de livre caminho médio, dos mecanismos de troca de calor quando em pressões altas e a distinção de quando se está em pressões baixas, e finalmente do fato de que, mesmo abaixando a pressão do gás, é possível transmitir-se movimento ordenado a um sistema mecânico a partir do movimento desordenado das moléculas, o que é mais um exemplo da transformação de energia térmica em energia de movimento. Finalmente, dado o papel preponderante da intensidade luminosa no movimento das pás, é-se levado, ingenuamente (talvez se deva dizer intuitivamente) à idéia de que é a pressão da luz que causa o movimento. Desfazer esta idéia, todavia, é apenas questão de se observar cuidadosamente o movimento das pás do radiômetro. Por tudo isso, o desenvolvimento deste instrumento simples pode ser muito importante para a discussão qualitativa de muitos princípios físicos sobre gases e sobre a radiação.

Metodologia

O método de pesquisa para projeto e avaliação do Radiômetro de Crookes será vinculado às seguintes etapas:

1. desenvolvimento do projeto;
2. avaliação e interpretação das observações experimentais;
3. demonstração dos resultados obtidos com grupos de estudantes;
4. realimentação das etapas 1 e 2 através da experiência da etapa 3.



Resultados e Cronograma

Os principais resultados esperados nesta pesquisa são os seguintes:

RS1 - levantar referência bibliográfica sobre a utilização do Radiômetro de Crookes em trabalhos similares desenvolvidos no Brasil e no exterior;

Concluído.

RS2 – estudar o comportamento físico do radiômetro;

Concluído.

RS3 - desenvolver o Radiômetro de Crookes submetido a variação de pressão em uma câmara de vácuo para demonstrar seu regime de funcionamento e a teoria que explica este fenômeno;

Concluído.

RS4 - produzir relatórios de pesquisa.

Concluído.