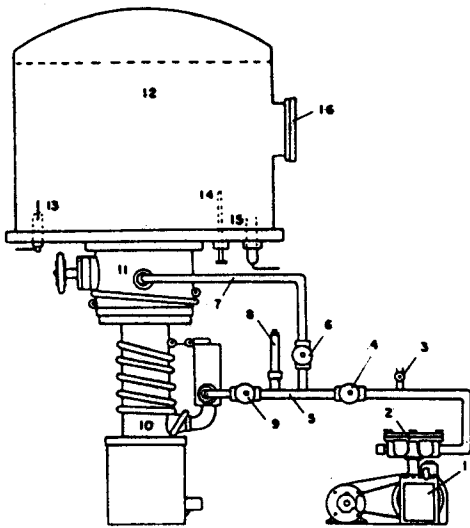


UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



*CURSO DE
TECNOLOGIA
DO VÁCUO*

MEDIDORES

I N D I C E

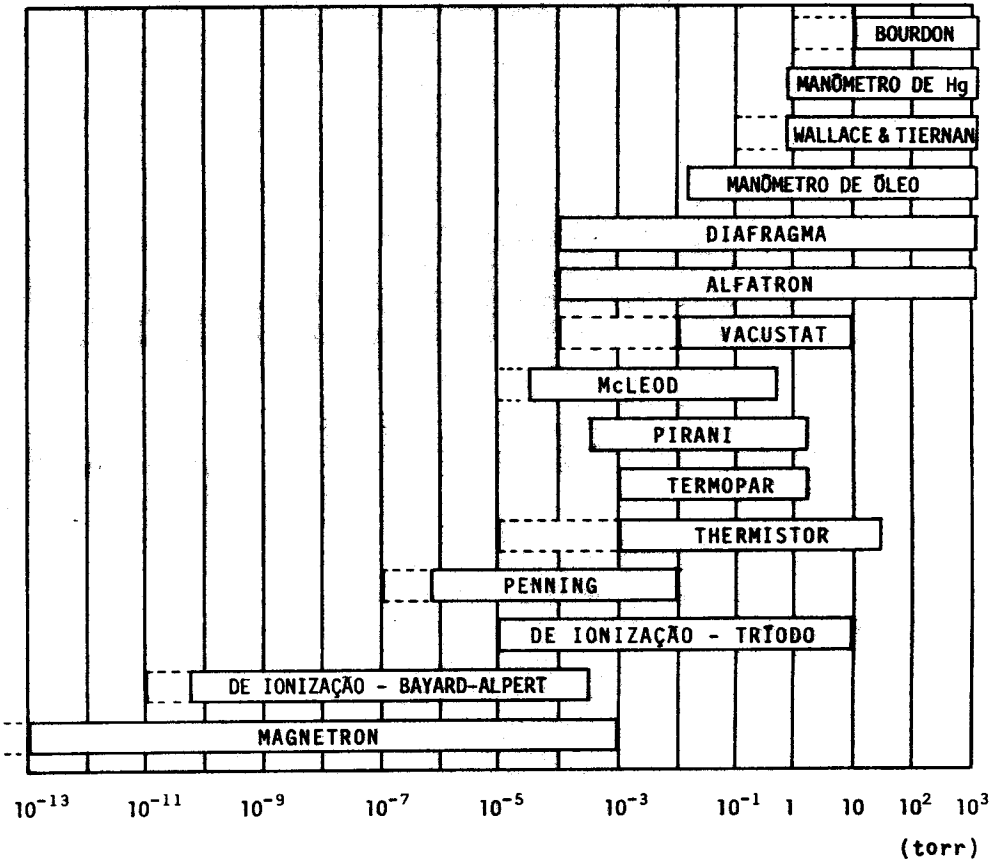
Manômetro de mercúrio e óleo	1
Manômetros mecânicos	4
Manômetro de termo-condutividade	6
Manômetro Pirani	7
Manômetro Termopar	9
Manômetro Termistor	12
Manômetro McLeod	14
Vacustat	18
Manômetro tipo Kammerer (McLeod)	21
Manômetros de ionização	22
Manômetro Bayard-Alpert	22
Manômetro de Descarga (Penning ou Philips)	25
Omegatron	28
Alphatron	30

Impresso na Gráfica do Instituto de Física da USP

* 1992 * reimpressão

MEDIDORES DE VÁCUO

Manômetros de vácuo podem ser divididos em absolutos e indiretos. Nos manômetros absolutos, a calibração é feita em função dos parâmetros geométricos como nos manômetros de óleo ou mercúrio, McLeod, etc. Os indiretos medem características de gás relacionadas com pressão; como os manômetros funcionam em faixas de pressão diferentes, a tabela em baixo mostra as relações:



MANÔMETROS DE MERCÚRIO E ÓLEO

1) Estes manômetros, em princípio, são iguais ao barômetro. Um tubo de vidro ligado de um lado ao sistema de vácuo, enquanto a outra extremidade está imersa num recipiente com mercúrio e aberta

à pressão atmosférica. A altura da coluna de mercúrio dá a pressão em milímetros. É necessário fazer uma correção para pressão atmosférica (fig. 1).

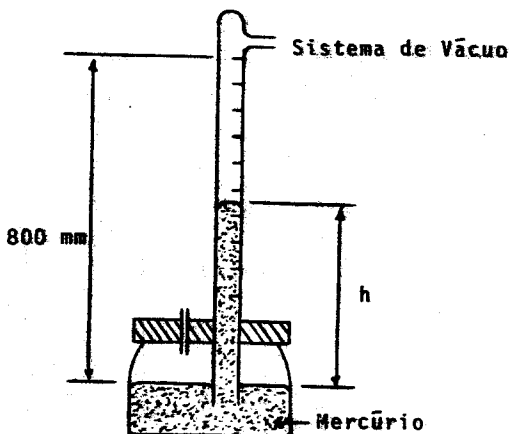


Fig. 1

Em vez de usar um tubo vertical, às vezes é mais prático usar tubo em U, onde um dos lados é aberto para a pressão atmosférica (fig. 2).

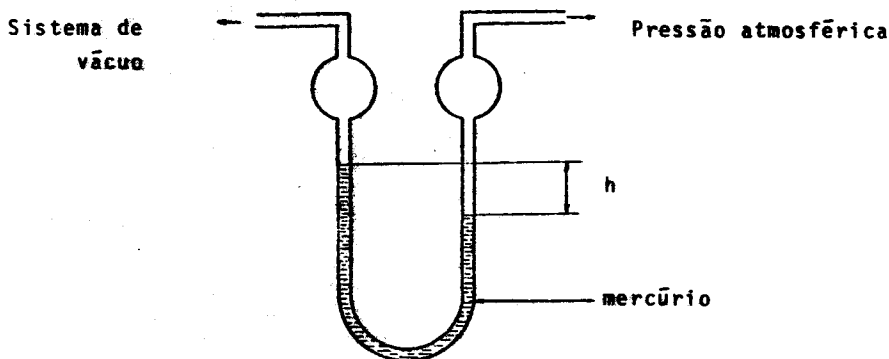


Fig. 2

2) Um tubo em U fechado numa das extremidades é preenchido com mercúrio, enquanto que a outra extremidade está ligada ao sistema de vácuo. Quando o mercúrio está no mesmo nível (fig. 3), a pressão do sistema está igual à pressão no braço fechado, que é da ordem de $1,3 \times 10^{-3}$ torr, que é a pressão de vapor do mercúrio.

Quando a pressão do sistema aumenta, o desnível em milímetros da coluna de mercúrio de qualquer um dos braços em relação ao zero dá a pressão no sistema de vácuo. Na realidade, a pressão menor que se pode medir é de 1 torr, com um erro máximo permissível de $\pm 10\%$.

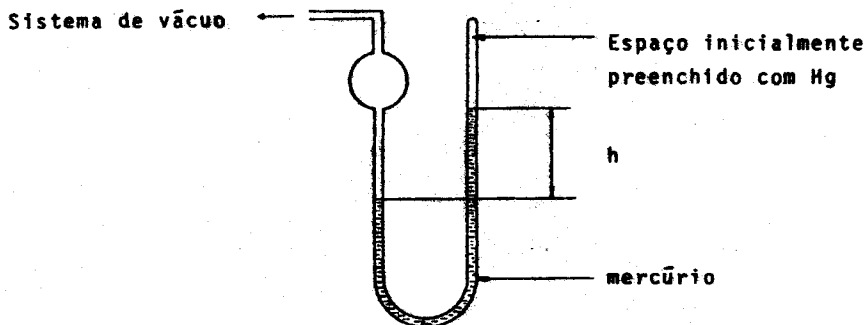


Fig. 3

3) Em vez de ter um dos braços selados no tubo em U, os dois são abertos, sendo que um dos braços está ligado a uma pressão de referência em geral muito baixa, que se pode considerar como zero. O outro braço está ligado ao sistema de vácuo. A pressão no sistema é dada por pressão de referência, pressão devida à diferença dos níveis nos dois braços, dependendo se a pressão de referência é menor ou maior que a do sistema. Em vez de mercúrio, podemos usar outro líquido, em geral um óleo de bomba de difusão, como Convoil. Neste caso, a altura ou diferença dos níveis nas colunas de mercúrio tem que ser corrigida segundo a relação:

$$\text{Pressão (mm Hg)} = \frac{\text{Altura ou dif. dos níveis (mm)} \times \text{densidade}}{13,6}$$

A vantagem do óleo sobre o mercúrio é que a densidade do óleo é da ordem de 1g/cc, enquanto que a do mercúrio é de 13,6g/cc. Assim, a sensibilidade aumenta de 10-15 vezes. Inclinando o tubo em U como na figura 4, aumenta-se a sensibilidade por um fator de 5 a 10.

Tanto para manômetros de mercúrio, como de óleo, é preciso tomar muito cuidado com a limpeza do vidro e do líquido, para evitar que o líquido se prenda nas paredes. É aconselhável usar vidro fino de diâmetro de aproximadamente 1 cm e bem uniforme nos dois braços. Como o óleo absorve gases, pode-se esquentar o manômetro com óleo em vácuo para tirar o gás. Com grandes precauções estes manômetros de óleo podem ser usados para medir pressões de até 0,05 torr.

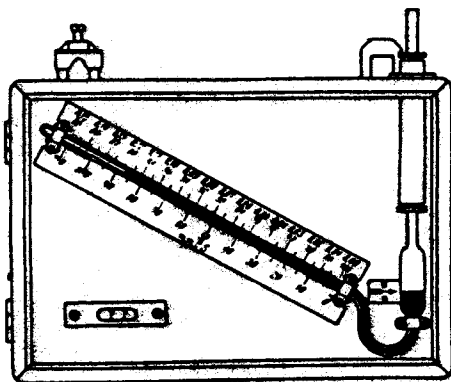
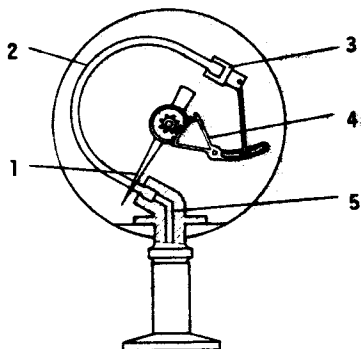


Fig. 4

MANÔMETROS MECÂNICOS

Neste manômetro, a pressão exerce uma força sobre um sistema mecânico, causando uma deformação temporária.

Bourdon: Este manômetro consiste de um tubo em forma de arco. Um lado do tubo está fechado e o outro é rigidamente fixo e ligado ao sistema de vácuo. Quando a pressão aumenta, o tu



- 1 - ponteiro
- 2 - tubo Bourdon
- 3 - extremidade fechada
- 4 - mecanismo de transmissão
- 5 - linha para o sistema de vácuo

Fig. 5

bo tende a endireitar-se. Com a diminuição da pressão, o raio de curvatura diminui também. O lado fechado do tubo está ligado a um ponteiro de escala, por meio de um sistema de engrenagem. Este tipo de manômetro não é de precisão, mas serve bem para pré-vácuo, na região de 760mm - 10mm.

Wallace & Tiernan: É um manômetro que mede a força que a pressão exerce sobre uma cápsula selada. Uma cápsula selada e evacuada está colocada numa caixa ligada ao sistema de vácuo. A cápsula está ligada a um ponteiro por meio de um sistema de alavancas. Assim, o movimento de expansão e contração, devido à variação de pressão da cápsula, movimenta o ponteiro. Este manômetro funciona para pressões de 0-800 torr, e pode-se fazer leituras até 0,1 torr, em alguns modelos.

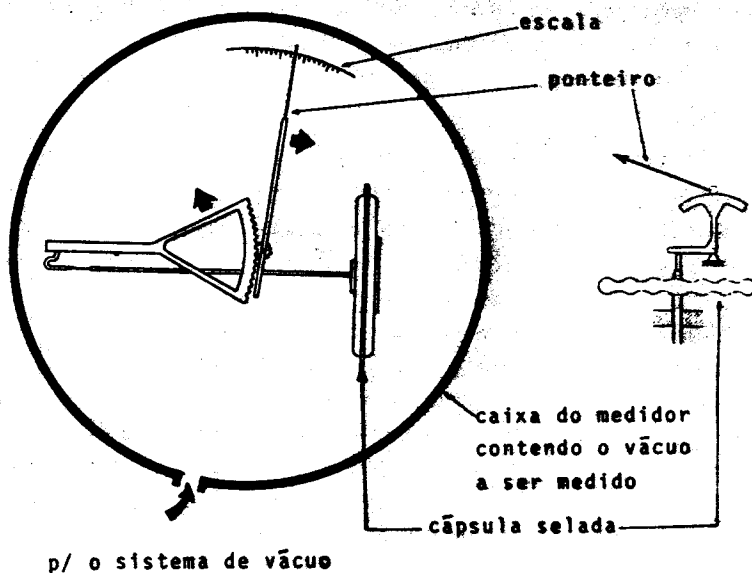


Fig. 6

MANÔMETRO DE TERMO-CONDUTIVIDADE

Há dois manômetros muito em uso hoje que dependem da variação da transferência de energia térmica através de um gás rarefeito com a pressão. Estes dois manômetros são o Pirani e o Termopar.

O princípio de funcionamento para os dois é o mesmo. A propagação de calor ocorre de três maneiras:

a) convecção - com pressão alta e temperatura baixa temos uma grande densidade de gás, e se houver um gradiente de temperatura, então há movimento de gás na direção da temperatura menor. Esta perda de calor não depende da pressão.

b) condutibilidade - em pressões mais baixas, a transferência de calor ocorre principalmente por meio de colisões entre as moléculas. Quando a pressão é suficientemente baixa, para que o caminho livre médio seja maior do que as dimensões do recipiente, isto é, na região de fluxo molecular, então as moléculas colidem muito mais com as paredes do recipiente do que entre si. Portanto, a perda de calor vai depender do número de colisões e, portanto, da pressão.

c) radiação - Quando não há mais quantidade suficiente de gás para a transferência de calor, i.e., pressão muito baixa, a perda de calor ocorre por meio da radiação, que independe da pressão. Este efeito só se torna apreciável em pressões abaixo de 10^{-5} torr.

Para pressões abaixo de 1mm, a transferência de energia térmica dentro de um gás decresce com a pressão. Coloca-se axialmente um fio metálico fino de diâmetro d , dentro de um tubo de diâmetro D , tal que $D/d > 10$. O tubo está ligado ao sistema de vácuo, e aquece-se o fio por meio de uma corrente elétrica, a uma temperatura ambiente T , enquanto que as paredes do tubo estão em temperatura ambiente T_A , tal que $T > T_A$. A razão com a qual o calor do fio passa às paredes do tubo diminui com a redução da pressão. A temperatura do fio, e portanto a resistividade do fio, varia com a pressão. Suponhamos que, devido $D/d > 10$, as moléculas de gás colidam muito mais com as paredes do tubo do que com o fio axial, e portanto, estão em temperatura T_A , e só as moléculas que colidem com o fio axial adquirem energia maior correspondente à temperatura T .

Então, a energia térmica transferida do fio ao gás é:

$$E = kN (T - T_A) \quad (1)$$

onde k é uma corrente que depende do gás e da superfície do fio ; N é o número de moléculas que colidem com o fio.

No caso em que o caminho livre médio é maior que D , usando teoria cinética dos gases, temos:

$$N = k'P (MT_A)^{-1/2}$$

onde k' é uma constante que depende das unidades, P é a pressão e M é a massa molecular

$$E = \frac{kP}{MT_A} (T - T_A) \quad , \quad \text{onde } k = k'k \quad (2)$$

Portanto, a transferência de energia térmica depende linearmente da temperatura T do fio axial, mantendo-se T_A constante.

A perda de calor também vai depender da condução através do fio axial. Fazendo o fio o mais comprido possível, diminuir^{se} consideravelmente esta perda. Não se pode fazê-lo comprido demais por - que se torna difícil segurá-lo somente de um lado sem causar vibrações.

MANÔMETRO PIRANI

O manômetro Pirani consiste de um tubo de vidro ou metal, fechado de um lado, e de diâmetro aproximadamente de 1 a 2 cm.

O lado aberto está ligado por O-ring dinâmico ou tubo de borracha ao sistema de vácuo. Dentro do tubo há um filamento de tungstênio de 0,005 a 0,1mm de diâmetro, de 20 a 30cm de comprimento, enrolado numa hélice, como mostra a figura 7a. Para evitar muita perda de calor através dos fios, mantêm-se a temperatura do filamento a aproximadamente 200°C. Em geral, para assegurar que não há efeitos devido à variação de temperatura ambiente coloca-se ao lado do filamento um envelope de vidro selado e evacuado a pressão inferior a 1 militorr (fig. 7b). Este Pirani compensador serve como uma resistência no circuito eletrônico medidor. O circuito usado é uma ponte de Wheatstone (fig. 8), onde o Pirani forma um braco, e o compensador o outro braco. Em geral, em vez de medir a resistência do Pirani, mantém-se constante a

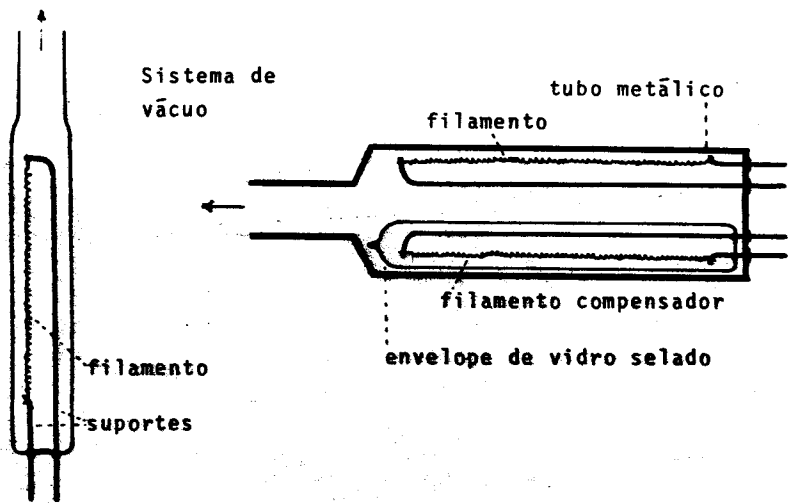


Fig. 7a

Fig. 7b

corrente na ponte e por meio da resistência R_V balanceia-se a ponte para a menor pressão que possa ser medida, i.e., 10^{-4} torr; isso dá o zero do galvanômetro. Assim, quando a pressão aumenta no Pirani, a ponte não é mais balanceada, passando a resistência do Pirani a diminuir e o galvanômetro acusa uma corrente. A calibração é feita medindo esta corrente contra a pressão medida por McLeod (fig. 9).

O manômetro Pirani mede a variação da resistência devida à variação da temperatura com a pressão.

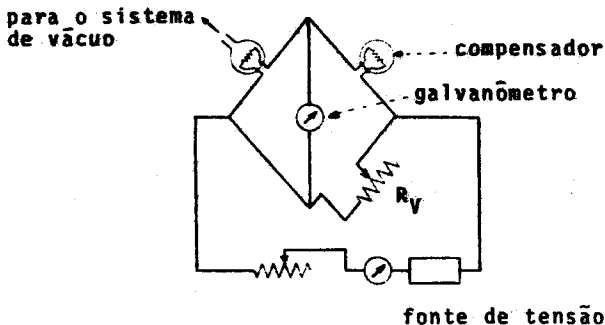


Fig. 8

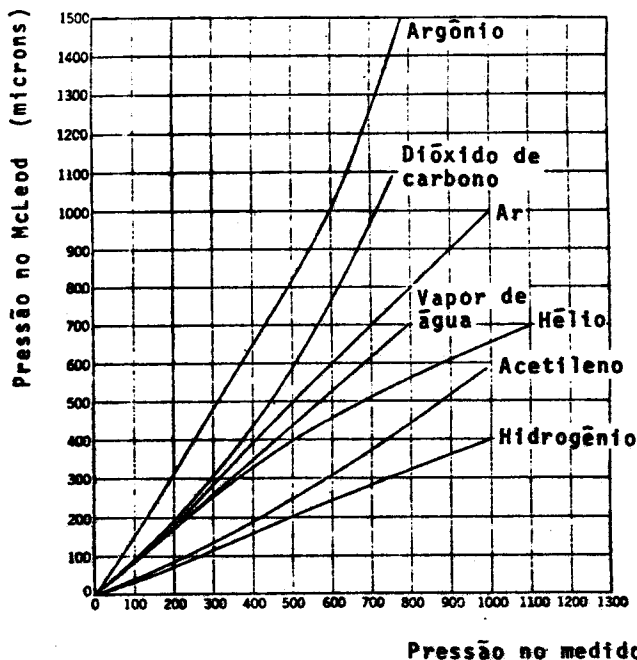


Fig. 9

TERMOPAR

O termopar também usa um filamento aquecido eletricamente, mas aqui medimos a variação da voltagem do termopar com a pressão. O filamento em geral está ligado diretamente no termopar como na figura 10. A calibração é feita da mesma maneira que a do Pirani (fig. 11).

As vantagens e desvantagens dos manômetros de condutibilidade são as seguintes:

1) O Pirani é mais sensível e estável que o Termopar. Em geral, o Termopar é usado somente como indicador se a pressão está em volta de 10^{-2} torr. Mas o Pirani já pode ser usado como medidor de pressão.

2) Os dois manômetros são de volume pequeno e de controle remoto.

Aspecto externo:

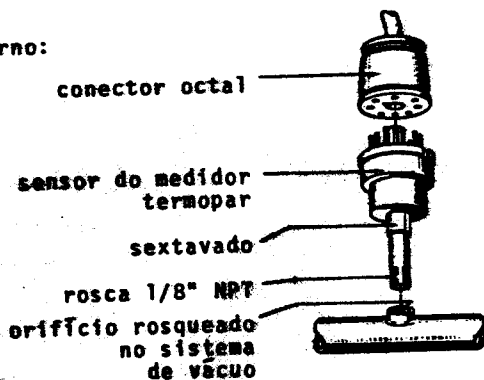


Fig. 10a

Sistema de vácuo

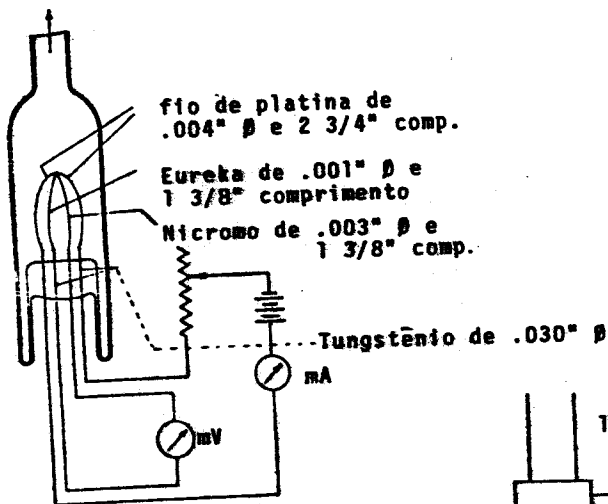


Fig. 10b

Sistema de vácuo

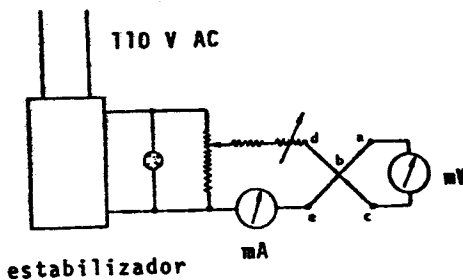
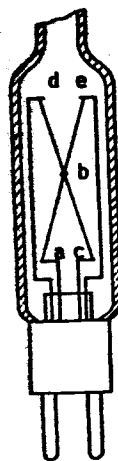


Fig. 10c

3) A leitura de pressão é instantânea, enquanto que no McLeod demoram-se alguns minutos para fazer uma leitura.

4) Os dois manômetros medem pressão total devido aos gases permanentes e vapores.

5) Estes manômetros são muito resistentes mecanicamente, e podem ser expostos à pressão atmosférica durante o funcionamento.

As principais desvantagens são as seguintes:

1) A pressão menor que pode ser medida é de 10^{-4} torr, mas em geral mede-se até 10^{-3} torr.

2) A calibração depende do gás. Da equação 2 vemos que E depende de $M^{-1/2}$ portanto, a sensibilidade do manômetro vai ser maior para H_2 do que para N_2 . Isso permite usar o Pirani como de tator de vazamento.

3) A calibração vai ser modificada se o manômetro for contaminado com óleo.

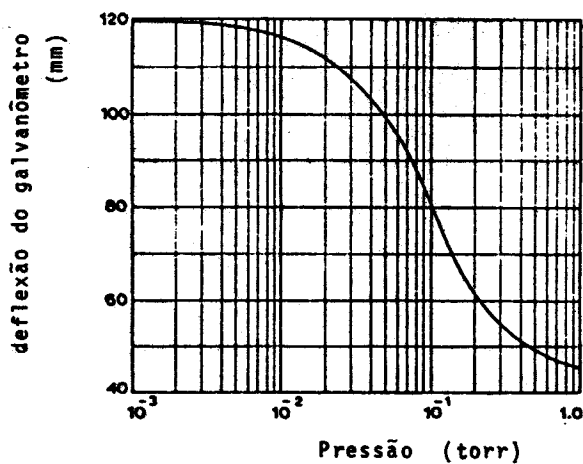


Fig. 11a

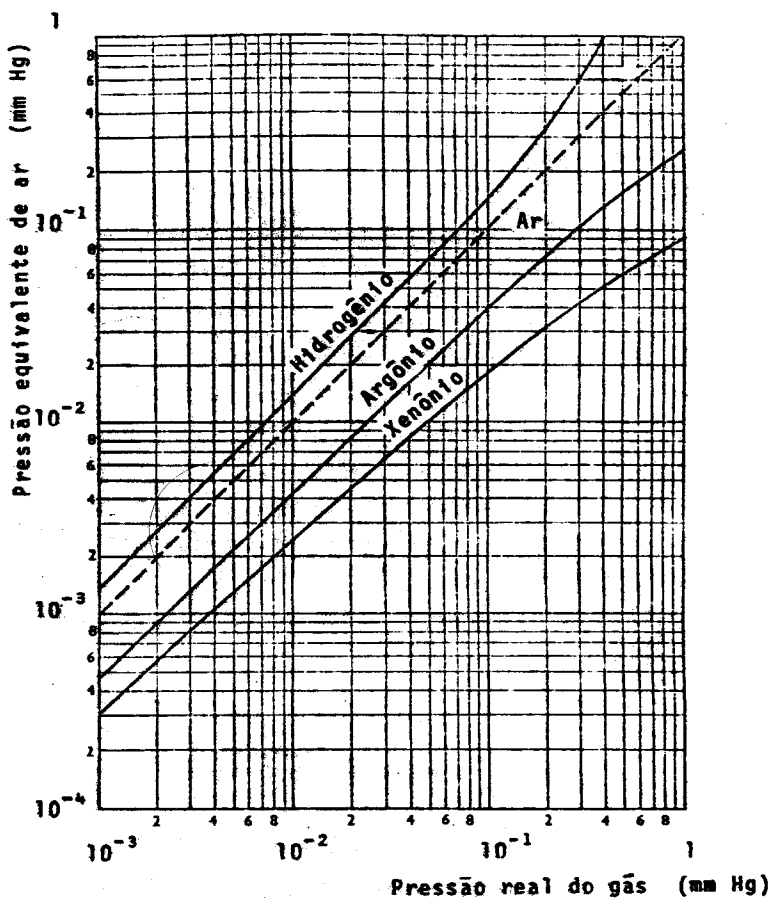


Fig. 11b

THERMISTOR

Este tipo de medidor funciona de maneira similar ao Pirani. A diferença está no elemento sensor: no Pirani, tem-se um filamento aquecido, dentro do sistema de vácuo, cuja dissipação térmica depende da quantidade de gás e, como consequência a sua resistência varia proporcionalmente desbalanceando uma ponte de Wheatstone. No medidor "Thermistor" este filamento é substituído por um resistor variável especial cuja resistência muda com a temperatura. Trata-se -

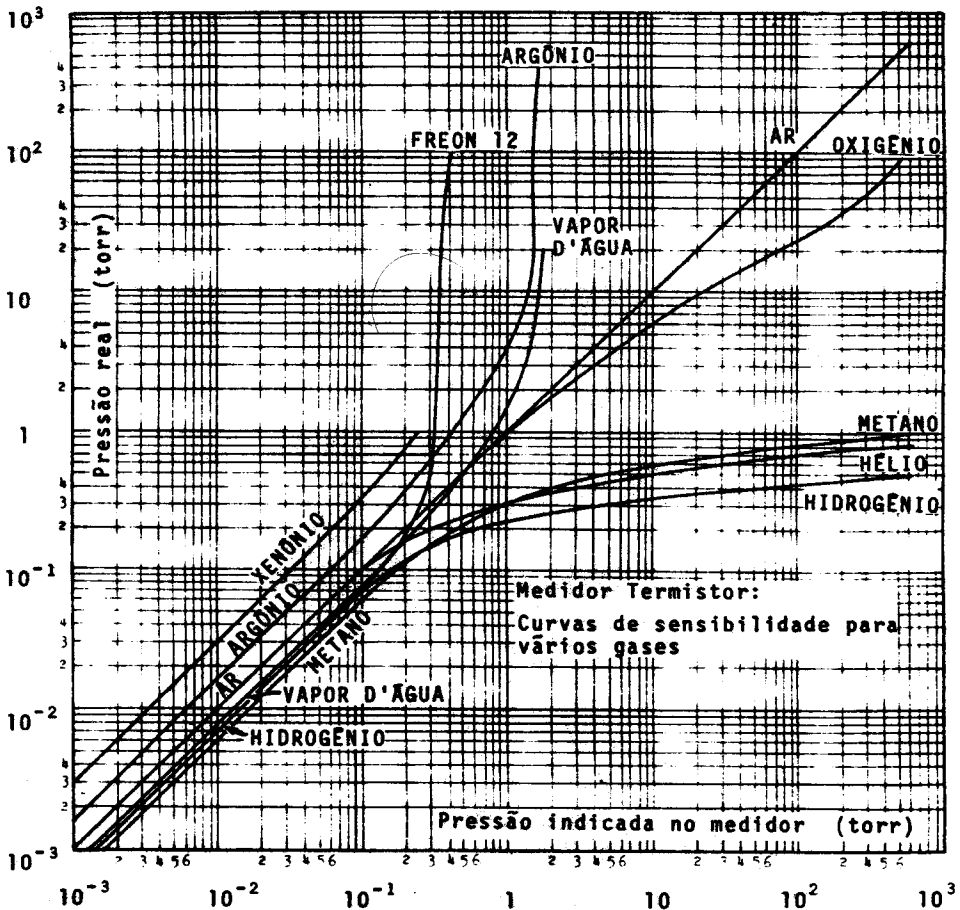


Fig. 12a

de um termistor NTC (coeficiente de temperatura negativo). A aparência física do sensor de pressão é a mesma do termopar (Fig. 12b).

O circuito fornece uma voltagem constante à ponte de Wheatstone que contém o termistor em um de seus braços. A corrente que flui através do termistor eleva a sua temperatura até aproximadamente -190°C em pressões inferiores a 10^{-3} torr. Aumentando a pressão, a dissipação térmica melhora, diminuindo a temperatura do termistor e, como se trata do tipo NTC, a sua resistência aumenta, desbalanceando a ponte. O microamperímetro acusa a corrente elétrica resultante do desbalanceamento da ponte fornecendo uma leitura em uma escala já calibrada em unidades de pressão.

A idéia deste medidor já é bastante antiga, mas a sua comercialização só se tornou possível depois da obtenção de termistores de propriedades suficientemente uniformes.

Para estender a sua faixa de trabalho até à pressão atmosférica, este elemento é montado no interior de um cilindro metálico aberto nos lados, de dimensões pequenas. Desta maneira o fluxo de calor através do gás, do termistor para as paredes do cilindro se dá através de um percurso pequeno, menor do que o caminho livre médio das moléculas do gás, condição necessária para que a condutividade térmica seja dependente da pressão (em regime viscoso a condutividade térmica não depende da pressão já que o caminho livre médio é menor do que a distância percorrida pelo fluxo de calor).

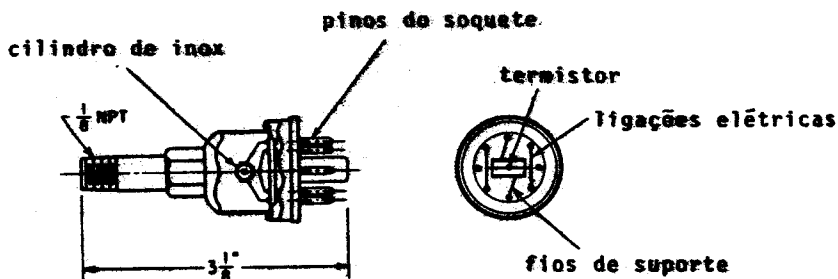


Fig. 12b

MANÔMETRO MCLEOD

O manômetro McLeod é um dos mais antigos ainda em uso hoje. É um medidor padrão para medidas absolutas de pressão, pois sua calibração depende só de parâmetros geométricos. Um manômetro de McLeod comum mede pressões desde 10^{-1} torr até 10^{-5} torr, existindo manômetros maiores, de precisão, onde, com cuidado, pode-se medir pressão de 1 torr até 10^{-6} torr. O McLeod é extensivamente usado na calibração de outros medidores, testes de bombas mecânicas etc. O funcionamento é baseado na lei de Boyle, e portanto só podemos medir pressão de gases permanentes e não de vapor. Isso decorre do fato de que, para fazer as medidas, precisamos comprimir o gás, e vapores comprimidos não obedecem mais à lei de Boyle.

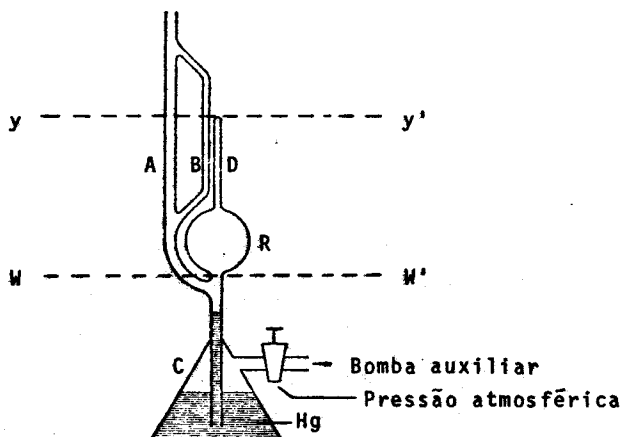


Fig. 13

O esquema do manômetro de McLeod, feito de vidro: (fig. 13). O recipiente c com mercúrio está ligado a uma bomba mecânica auxiliar por meio de uma válvula de 3 vias. Este arranjo serve para fazer o mercúrio subir, ligando a válvula para pressão atmosférica, ou fazer o mercúrio descer, se a válvula está ligada à bomba mecânica. Em geral, mantém-se uma pressão de alguns torr no recipiente c, com o nível de mercúrio como no desenho. Os capilares D e B são de mesmo diâmetro, aproximadamente 1mm, mas o tubo A é de diâmetro bem maior e serve para evacuação do recipiente R, até a pressão ser medida. O volume do recipiente R e do capilar D pode ser medido facilmente durante a construção do manômetro. Basta enchê-los com mercúrio ou água, pesar e dividir pela densidade do líquido; a seção reta do capilar pode ser medida colocando um pouco de mercúrio dentro do capilar e medindo o comprimento: temos a seção reta do capilar. O manômetro que será utilizado já se encontra calibrado.

O princípio de funcionamento deste manômetro consiste em comprimir um certo volume conhecido V de gás, a uma pressão P que se deseja medir, para um volume menor v , observando a pressão resultante p . Então, pela lei de Boyle, temos:

$$P = \frac{Pv}{v}$$

Na prática, abrindo a válvula, bem devagar, para a pressão atmosférica, o mercúrio sobe, passa o nível WW' selando o reci -

piente R do resto do sistema, e depois de preenchê-lo entre os capilares D, B e A. Mas enquanto que no capilar D o gás está sendo comprimido, o capilar B está aberto à pressão original que se quer medir e, portanto, o mercúrio sobe mais no B. Quando o mercúrio alcança um nível pré-determinado, basta fechar a válvula. Assim, a diferença entre D e B dos níveis dá a pressão do gás comprimido.

Há dois métodos para fazer estas medidas, mas os dois dependem de subir o mercúrio até um ponto fixo e medir a diferença dos níveis.

Seja V = volume de gás preso no recipiente R e capilar D acima do nível xx' ; a = seção reta dos capilares D e B; h = diferença dos níveis e p = pressão a ser medida.

a) Método da Escala Quadrática

Para fazer a medida da pressão, o mercúrio precisa subir até o nível yy' (topo do capilar D). Seja, $v = ah$ = volume de gás dentro do capilar $DP + h$ = pressão dentro do capilar pela lei de Boyle.

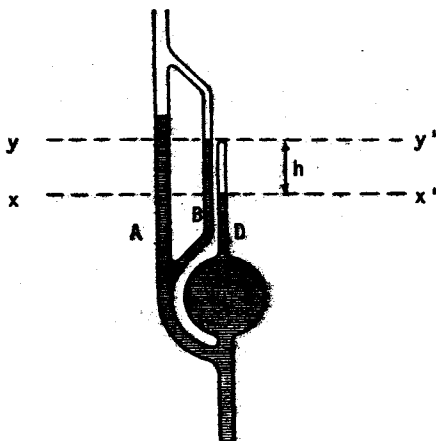


Fig. 14a

$$(P + h) ah = PV$$

$$P = \frac{ah^2}{V - ah}$$

Em geral, ah é da ordem de 1% de V , portanto, podemos desprezar o termo ah .

$$P = \frac{ah^2}{V} = kh^2 \quad K = a/V$$

k é um parâmetro geométrico.

A pressão então varia com o quadrado da diferença dos níveis. Na prática, o topo do capilar D não é reto, mas curvo, o que introduz um erro considerável, especialmente para $h=2$ mm. No Duchman "Vacuum Technique", há um método técnico para fazer esta correção.

b) Método da Escala Linear

Para diminuir o erro quadrático, e medir pressões mais elevadas, usa-se a escala linear. O mercúrio sobe até um nível fixo ZZ' . Seja h = diferença dos níveis nos capilares D e B , h_0 = altura do gás comprimido no capilar D . Então: $v = ah_0$ = volume do gás preso dentro do capilar DP + h = pressão dentro do capilar.

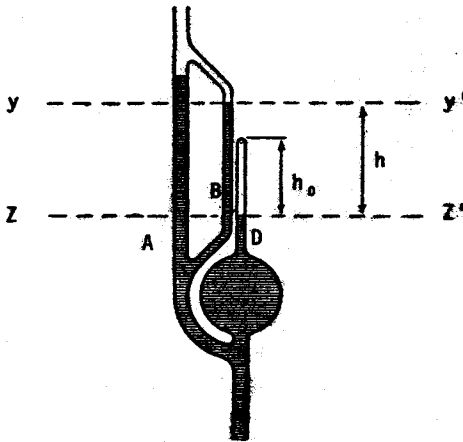


Fig. 14b

$$PV = (P + h) ah_0$$

$$P = \frac{ah_0}{V - ah_0} = \frac{ah_0}{V} \quad h = k'h$$

k é um parâmetro geométrico.

A pressão então varia linearmente com a diferença dos níveis. Tanto no método a) como no b), vê-se que, quanto menor a seção reta, e portanto o diâmetro dos capilares B e D, e maior o volume do recipiente R, maior a sensibilidade do manômetro. Mas não se pode diminuir muito o diâmetro, porque o mercúrio se prende nas paredes do capilar dando erro na leitura. Também o recipiente R não pode ser aumentado muito devido ao grande peso do mercúrio e fragilidade do vidro. Em geral, o recipiente R é de 100cc a 300cc.

O limite de precisão é dado por dois fatores: a) a incerteza da medida h (é de $\pm 10\%$ para pressão $5 \cdot 10^{-4}$ torr e 100% para $5 \cdot 10^{-5}$ torr); b) não uniformidade do capilar D.

Além desses erros, temos ainda erros acidentais. O mercúrio tem tendência a se prender nas paredes do capilar. Batendo de leve com o dedo no capilar diminui-se o erro. Além disso, é preciso extrema limpeza do aparelho e do mercúrio. Como já dissemos, o McLeod não mede pressão de vapor, portanto, não pode ser usado nos sistemas onde a pressão de vapor é grande. Também precisamos tomar cuidado com o vapor de mercúrio para não entrar no sistema de vácuo, especialmente na calibração do manômetro de ionização. Costuma-se colocar armadilha de Nitrogênio Líquido ou CO_2 sólido entre o McLeod e o sistema. Mas, mesmo assim, se a pressão de vapor for grande, o manômetro vai medir somente a pressão parcial do gás permanente.

VACUSTAT

O princípio de funcionamento do Vacustat é o mesmo que do manômetro de McLeod, só que o reservatório de mercúrio não é aberto para pressão atmosférica, e a compressão é feita pelo movimento giratório.

O vacustat é feito de vidro montado num painel de madeira. É ligado ao sistema de vácuo por meio de um tubo de borracha ou Óring dinâmico, no ponto A, através do painel, de tal maneira que se pode girar o painel com o Vacustat em torno do eixo horizontal em A. Antes de fazer medidas, coloca-se o Vacustat na posição horizontal (fig. 15a) para esvaziar o manômetro até a pressão do sistema. Nesta posição, todo o mercúrio está contido no reservatório B. Para fazer leituras, gira-se o Vacustat para a posição verti -

cal (fig. 15b). Então, o mercúrio desce do reservatório B e preenche os capilares C e F. Quando passa pelo ponto D, o gás dentro do capilar é comprimido, e então a diferença das alturas do mercúrio nos capilares C e F dá a pressão a ser medida. O uso da escala quadrática ou linear depende da quantidade de mercúrio. Para usar escala quadrática coloca-se uma quantidade de mercúrio tal que ela suba até o nível F. Para escala linear precisamos de um pouco menos de mercúrio. É sempre necessário ajustar o manômetro em torno da sua posição vertical para fazer o mercúrio subir até o nível desejado. O erro cometido neste ajuste é desprezível.

A grande vantagem do Vacustat é que é muito mais compacto e resistente do que o manômetro de McLeod. A quantidade de mercúrio necessária é de 7-8cc, e a pressão medida é de 10^{-10} torr.

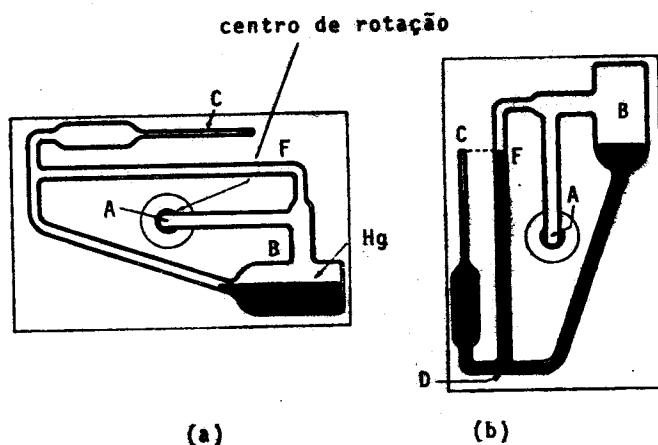
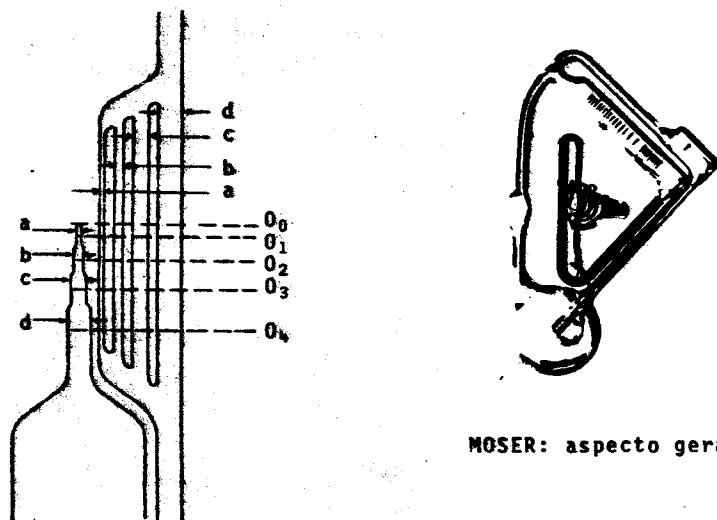


Fig. 15

O Vacustat tipo Moser, usado aqui, mede pressões de 760 a 10^{-4} torr, e é baseado num manômetro de McLeod projetado pelo Jansen e Venema.

Neste manômetro, o capilar fechado de compressão tem quatro diâmetros a, b, c e d há 4 capilares de comparação com diâmetros iguais a a, b, c e d. Para cada diâmetro, temos um nível de referência no capilar de comparação, que são O_1 , O_2 , O_3 , O_4 para a escala linear e o nível O_0 para a escala quadrática.

Este método permite medir maior intervalo de pressões. Coloca-se o Vacustat tipo Moser na posição indicada no desenho do sistema de vácuo (figura 17). Então, gira-se o Vacustat no sentido anti-horário em torno do eixo A, até que o capilar B esteja na vertical e o mercúrio atinja o nível 0_1 no capilar de comparação. Este capilar permite medir pressões de 1 atmosfera até 1 torr. Para pressões mais baixas, coloca-se o capilar na posição vertical e o mercúrio sobe até o nível 0_2 , medindo pressões de $1 - 10^{-2}$ torr.



MOSER: aspecto geral

Fig. 16

Finalmente, colocando o capilar D na posição vertical pode-se medir pressões de 10^{-1} torr até 10^{-4} torr. A grande vantagem deste Vacustat é a simplicidade das medidas. Ele é muito compacto, resistente e precisa somente de 7cc de mercúrio.

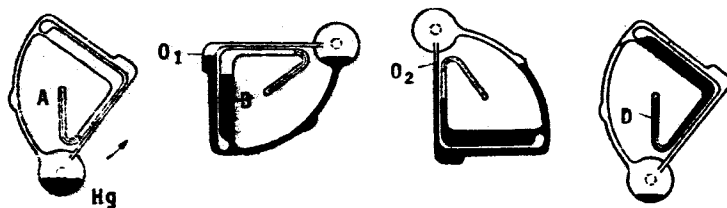


Fig. 17

MANÔMETRO TIPO KAMMERER

Este manômetro é uma combinação de McLeod e tubo U fechado num vidro, que está ligado ao sistema de vácuo. O tubo U mede pressões de 90 - 1 torr, enquanto que o McLeod mede pressões de 1 a 10^{-4} torr. No manômetro de McLeod, usa-se somente escala quadrática. Para fazer o mercúrio subir até o nível 0_1 e tomar leituras, gira-se a manivela, que movimentará a membrana, fazendo o mercúrio entrar no McLeod.

Este manômetro também é muito prático, mas requer um pouco mais de mercúrio, 16cc.

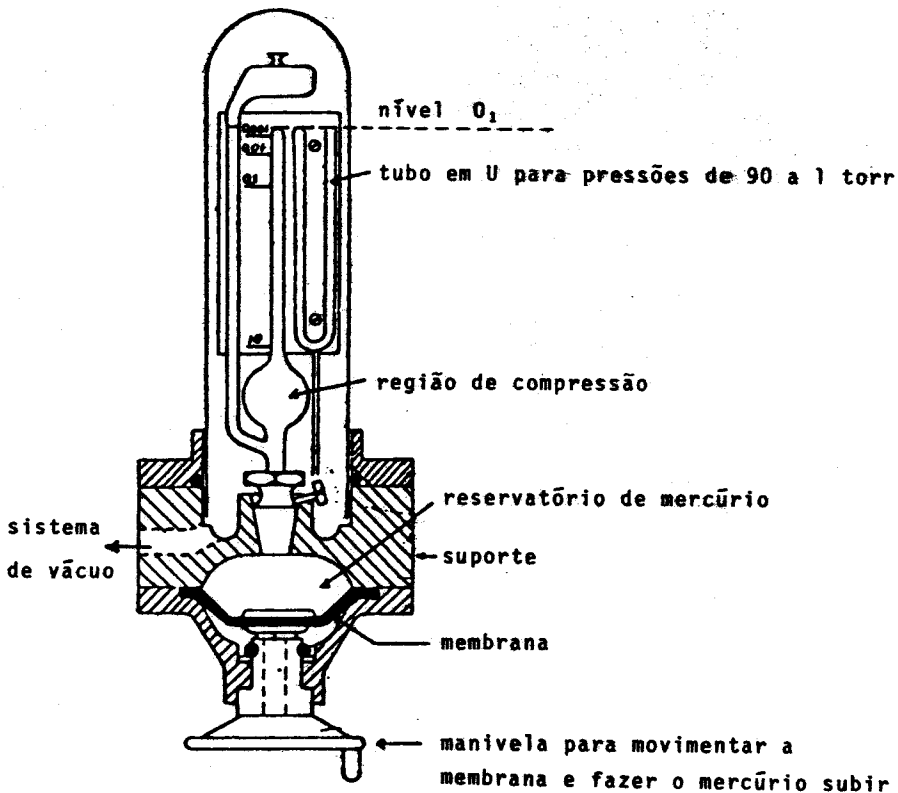


Fig. 18

MANÔMETROS DE IONIZAÇÃO

Em pressão baixa, um feixe de elétrons produz um número de íons proporcional à concentração molecular do gás. Como a pressão do gás (à temperatura constante) é diretamente proporcional à concentração molecular a corrente de íons devidamente calibrada pode dar uma medida da pressão. Esta corrente de íons depende da energia de elétrons e do tipo do gás. Foi verificado que o nº de íons por elétrons por cm do caminho percorrido à pressão de 1 torr é máximo na região de 100 MeV, e a razão entre N_2 e He nesta região é da ordem de, 7.

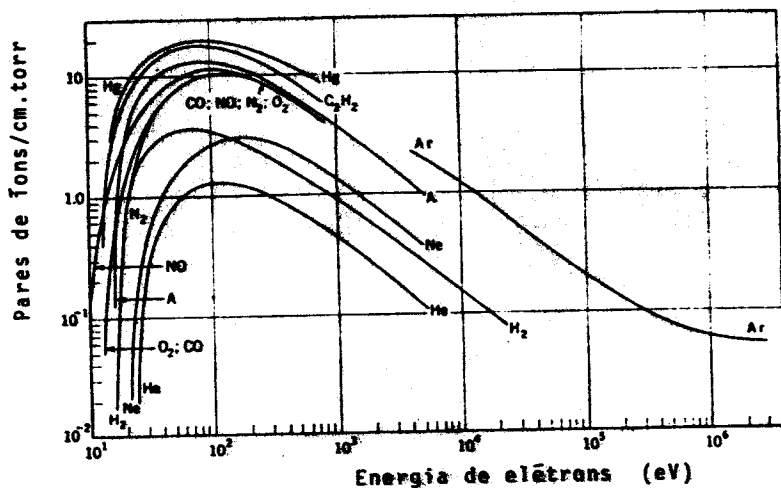


Fig. 19

a) Manômetro Bayard-Alpert

Um manômetro de ionização mais simples é um trifódo, onde os elétrons são produzidos por um filamento quente e acelerados pela grade. Os íons formados pelos elétrons são coletados pelo cátodo que é positivo em relação à grade. Se o filamento dá uma corrente constante de elétrons, então a corrente na placa vai ser proporcional à concentração molecular, e portanto, à pressão. Nota-se que há um pequeno bombeamento do gás devido à ionização do gás e coleção dos íons pelo cátodo.

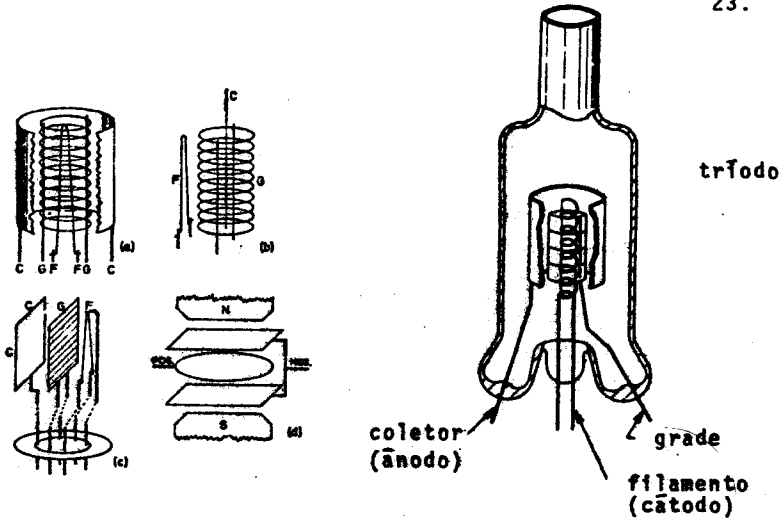


Fig. 20 Vários tipos de medidor de ionização (esquemático):
a) trífodo; b) Bayard-Alpert; c) de construção ca-seira; d) Penning ou de cátodo frio.

C - coletor G - grade
F - filamento

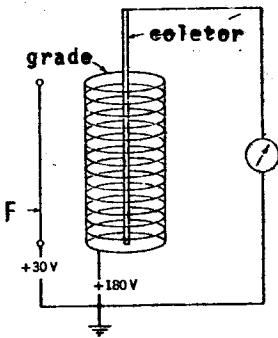


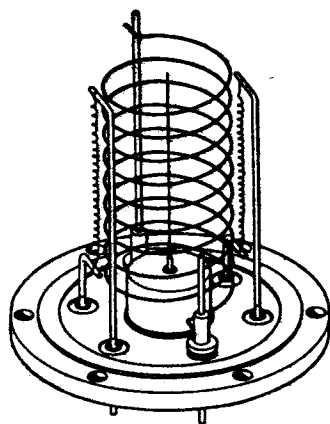
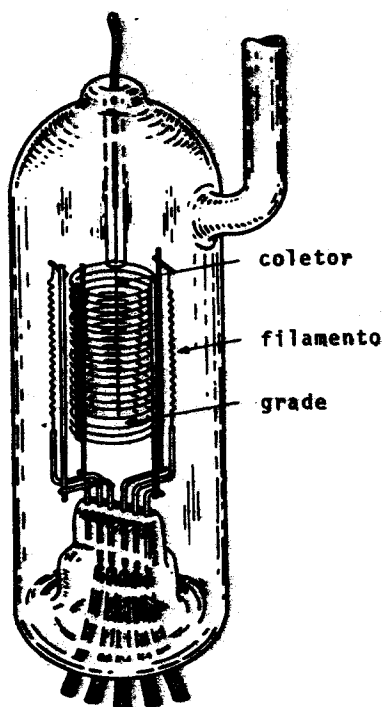
Fig. 21

O manômetro de ionização que usamos no Laboratório é Veeco RG-75, tipo Bayard-Alpert invertido. Neste manômetro, a placa é um fio central que coleta os íons positivos.

A grade é uma hélice de molibdênio em volta do coletor, e o filamento fica fora da grade. A principal vantagem deste arranjo é que, devido à pequena área do coletor, os R.X são grandemente reduzidos, possibilitando leituras de pressão até 10^{-10} torr. Esses R.X são produzidos pelos elétrons na grade. Quando os R.X irradiam, o coletor liberta foto-elétrons, o que equivale a uma corrente I_x , independente da pressão. Em pressões 10^{-8} esta corrente é igual à de íons positivos, dando assim limite inferior nas medidas de pressões. Diminuindo a área do coletor, cortou-se o efeito dos R.X por um fator 100-1000, permitindo leituras de pressões de 10^{-10} - 10^{-11} torr.

As características do Veeco RG-75 são as seguintes: grade : +180V, coletor: 0V, filamento: 3-5V em 4-6A, corrente de aquecimento potencial D.C. + 30V, degassificação da grade: 9V a 10A.

Quando o manômetro de ionização está funcionando todos os elementos e o envelope de vidro se aquecem ligeiramente devido ao filamento. Isso provoca degassificação nos elementos e no envelope, o que dá uma leitura de pressão errada. Portanto, é melhor logo aquecer bem tudo para todo o gás ser desenvolvido logo. Isso se faz passando uma corrente grande 10A na grade que aquece os outros elementos por radiação, limpando tudo. Nota-se que, quando se liga a degassificação, a pressão sobe ligeiramente, cai, torna a subir devagar, e, quando cai devagar na segunda vez, então os elementos são degassificados.



Medidor Bayard-Alpert com flange (fica dentro do sistema, sem o envoltório de vidro).

Fig. 22 Medidor de Ionização do tipo Bayard-Alpert.

Vantagens do manômetro Bayard-Alpert:

- 1) A corrente de ionização é linear com a pressão na região 10^{-4} - 10^{-10} , em alguns modelos 10^{-13} .
- 2) Fácil calibração contra McLeod na região 10^{-4} - 10^{-5} e extrapolado para pressões mais baixas.
- 3) Grande reprodutibilidade.

Desvantagens principais:

- 1) Muito frágil, fácil de queimar o filamento.
- 2) Incerteza no erro devido ao bombeamento por ionização e degassificação cuja ordem de grandeza é difícil de apurar.

b) Manômetro de Descarga (Penning ou Philips):

Neste manômetro, os elétrons são produzidos por meio de alta voltagem (2kV). Como não é possível manter a ionização em pressões baixas, a menos que o caminho livre médio dos elétrons aumente muito, e fica bem maior do que as dimensões do manômetro, Penning colocou campo magnético de 400G paralelo ao campo elétrico. O mecanismo desta descarga não é bem entendido, mas conhecem-se certos fatos gerais. Os elétrons produzidos pelo cátodo devido ao grande potencial, e baixa função de trabalho do metal, são acelerados mas não podem chegar ao ânodo, devido ao campo magnético.

Eles giram numa espiral perpendicular ao campo magnético, entre os cátodos até que finalmente chegam ao ânodo. Dessa maneira, o caminho livre médio deles é grandemente aumentado, e há ionização contínua (uma descarga luminosa), mesmo em pressão baixa. Os íons positivos não são afetados pelo campo magnético, porque têm massa grande e os elétrons secundários só alimentam a corrente eletrônica que produz a ionização. Assim, a corrente de íons positivos é proporcional à pressão. A calibração do manômetro é feita com manômetro McLeod.

Este medidor tem a grande vantagem de ser mecanicamente forte, fácil de operar, e não estraga em pressões elevadas (só fica sujo).

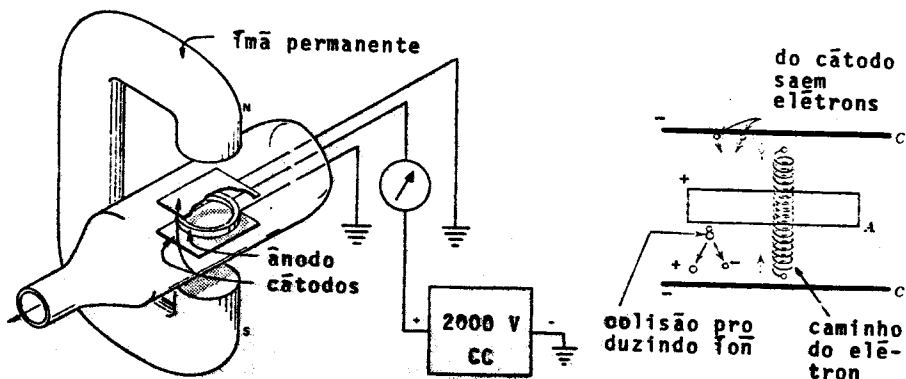


Fig. 23 Esquema de um medidor de descarga ou Penning.

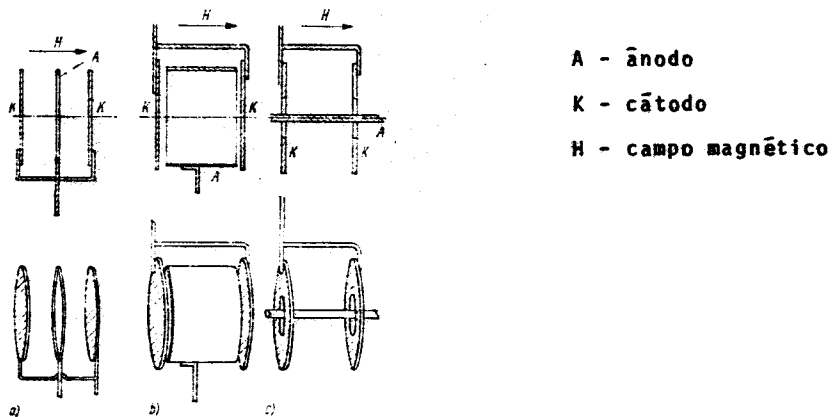


Fig. 24 Diversas geometrias dos elétrodos do medidor de Ionização de cátodo frio (Penning).

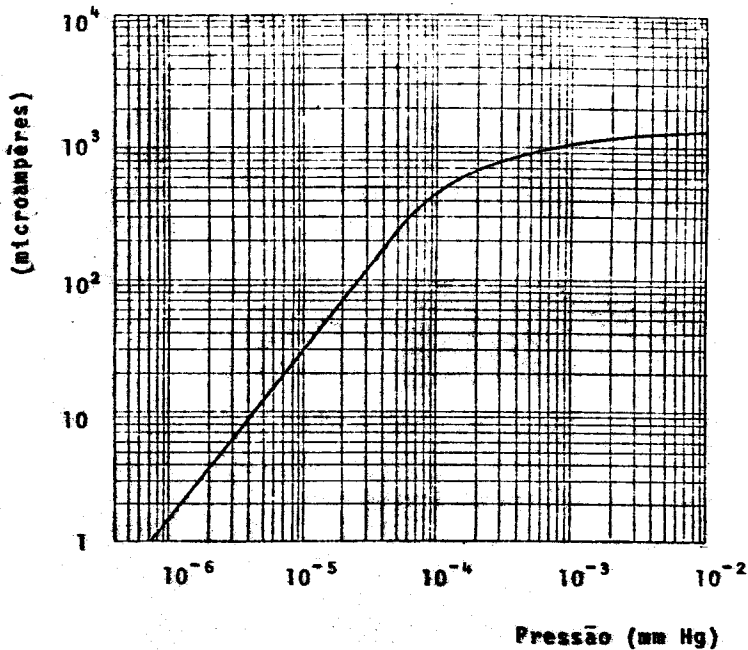


Fig. 25 Curva de calibração do medidor Penning

As desvantagens principais são:

a) não é medidor de precisão. Em pressões mais baixas, é às vezes difícil começar a descarga, e a corrente de "field emission" é comparável à de íons positivos na região de 10⁻⁶ torr.

b) da mesma maneira que o Bayard-Alpert, a sensibilidade é diferente para gases diferentes.

c) há uma instabilidade nas leituras, e mesmo na calibração, devido às oscilações eletrônicas.

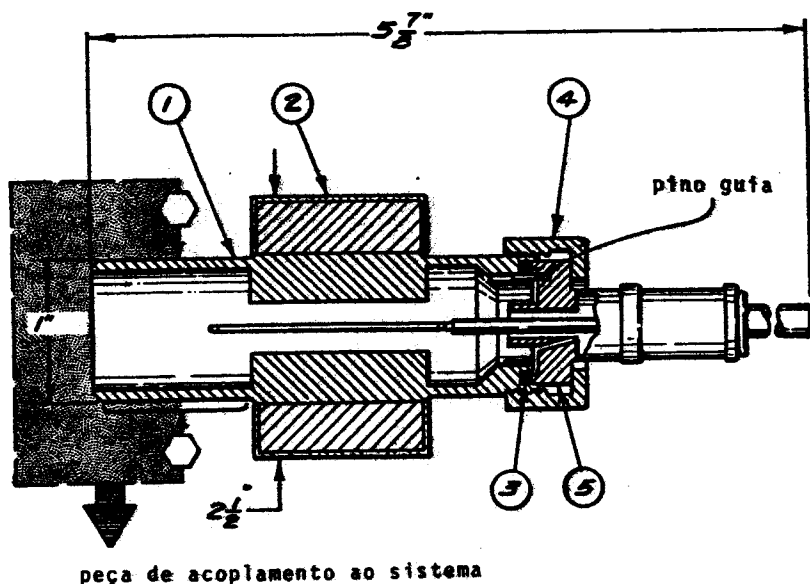


Fig. 26 Desenho esquemático de um medidor de descarga (Penning) utilizado no laboratório (CVC).

- | | |
|--|----------------------|
| 1 - Cátoda | 3 - O'ring |
| 2 - Ímã permanente | 4 - Porca de fixação |
| 5 - Passador do ânodo (isolante de cerâmica) | |

OMEGATRON

O Omeatron é um medidor de pressão parcial. Foi desenvolvido por Sommer, Thomas e Hipple em 1949, para aplicações em ultra alto vácuo. Seu princípio de funcionamento é o mesmo do ciclotron. As moléculas do gás são ionizadas por um feixe de elétrons colimado por um campo magnético. Os íons produzidos, sob a influência do campo magnético constante B e de um campo elétrico de radiofrequência per

pendicular a B descrevem trajetórias em espiral, como no cíclotron:

$$\omega = \frac{e}{m} \cdot B \quad \text{onde} \quad \omega = 2\pi\nu$$

Contudo, apenas os íons que preencherem as condições de ressonância do cíclotron, correspondentes à sua razão particular e/m , - permanecerão em fase com o campo de RF o tempo suficiente para ganhar energia continuamente e expandir a sua trajetória em espiral, conseguindo assim atingir o coletor (Fig. 27). Os demais íons possuem trajetórias de raio limitado. Estes íons ganham energia do campo de RF até que o ângulo de fase de suas trajetórias quase circulares sofra um deslocamento π . Um deslocamento adicional do ângulo de fase faz com que a energia cinética destes íons seja devolvida - ao campo de RF tornando as suas trajetórias menores; desta forma estes íons não atingem o coletor.

Os íons ressonantes ao atingirem o coletor produzem uma corrente elétrica que é amplificada e pode ser registrada. Esta corrente é estritamente proporcional à pressão parcial do gás que está sendo analisado.

O Omegatron é utilizado também como analisador de gás residual, bastando para isto variar a frequência do campo de RF. A resolução para massas pequenas é muito boa. Por exemplo, para a massa $M = 4$, é possível separar o doubleto D_2/He .

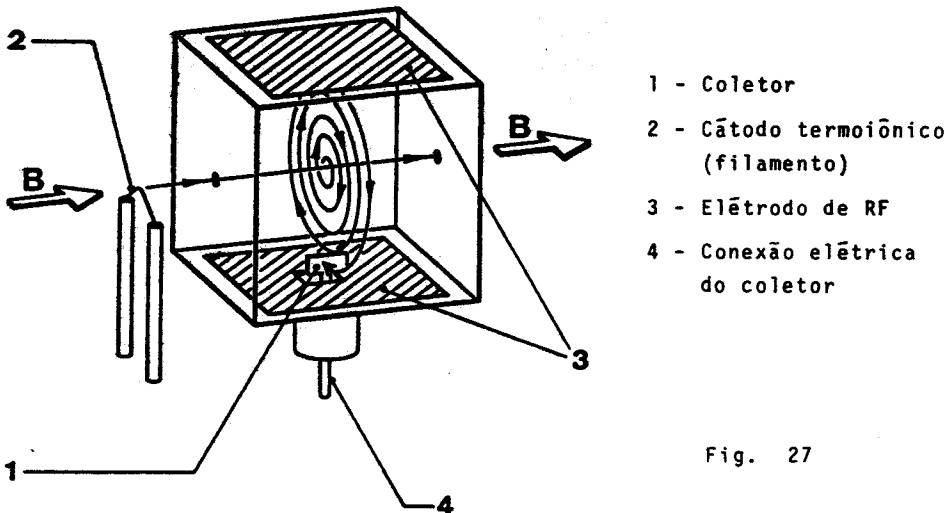


Fig. 27

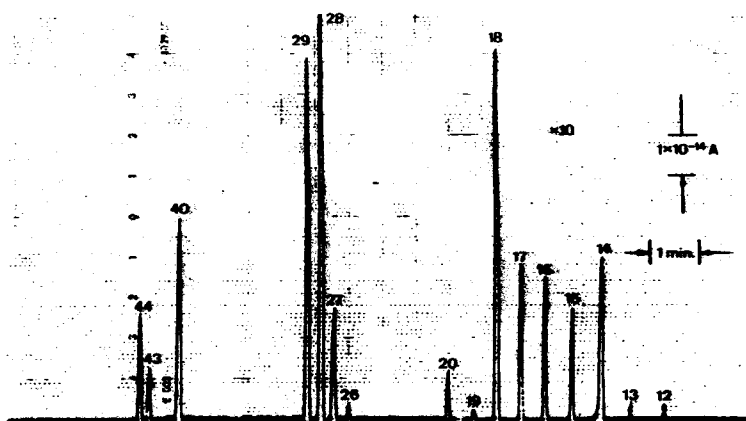


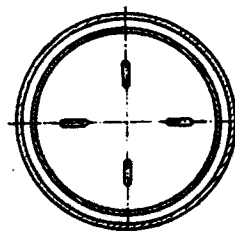
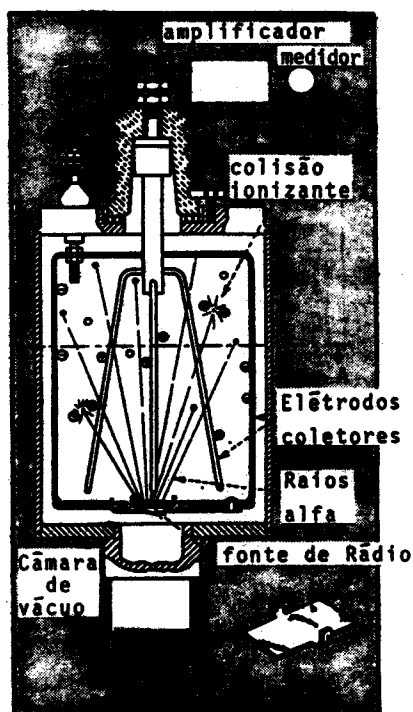
Fig. 28 Espectro de massa obtido com o Omegatron.

Uma vantagem particularmente interessante deste medidor é a corrente de emissão de elétrons ser extremamente baixa (alguns poucos microampêres). Com isto, evita-se a influência negativa de um cátodo quente e de um feixe de elétrons intenso, permitindo análises de gases residuais bastante precisas na região de ultra alto vácuo. Além disto, como o feixe de elétrons sai para fora da câmara de ressonância, a produção de raios X é quase nula, permitindo o funcionamento do Omegatron em pressões extremamente baixas. Sua desvantagem principal está no fato de necessitar um campo magnético relativamente intenso (3 - 4 kilogauss).

ALPHATRON

O Alpatron é um tipo especial de medidor desenvolvido por Downing e Mellen na NRC (hoje sob controle da Varian), e trabalha desde pressão atmosférica até 10^{-4} torr. Consiste de uma câmara de ionização onde uma fonte de rádio (por exemplo, 0,5 mg de uma liga de ouro e rádio, contendo cerca de 200 μ g deste último elemento) emite partículas α que ionizam o gás. A corrente de íons produzida no coletor é proporcional à quantidade de gás presente no sistema.

A sensibilidade do medidor depende do tipo de gás, já que as seções de choque para raios α dos diferentes gases variam. Possui também - respostas diferentes para gases e para vapores, de modo similar aos medidores de ionização já abordados anteriormente. As curvas de res- posta, contudo, são essencialmente lineares. Apresenta como vanta- gem, além da boa linearidade, a facilidade de limpeza, a ausência - de filamento; pode ser exposto à pressão atmosférica, não necessita recalibração com fontes radioativas de longa duração e pode ser uti- lizado como detetor de vazamentos. Além disto, a leitura é de pres- são total. Como desvantagem, podemos citar o custo relativamente - elevado, a necessidade de se utilizar um amplificador muito sensí- vel e portanto com problemas de instabilidade (a corrente para ar -



Corte A - A
vista de cima

Fig. 29

seco em 1 torr é da ordem de 2×10^{-10} A). Este medidor não pode ser aquecido para degasificação e a presença de uma fonte radioativa exige alguns cuidados para evitar perigo ao operador. Neste sentido foram feitas tentativas para substituir o rádio por trítio, na forma de triteto de titânio (sólido) reduzindo assim o perigo da radiação. O trítio emite raios β e pode ser utilizado em maior quantidade, aumentando a sensibilidade do medidor.

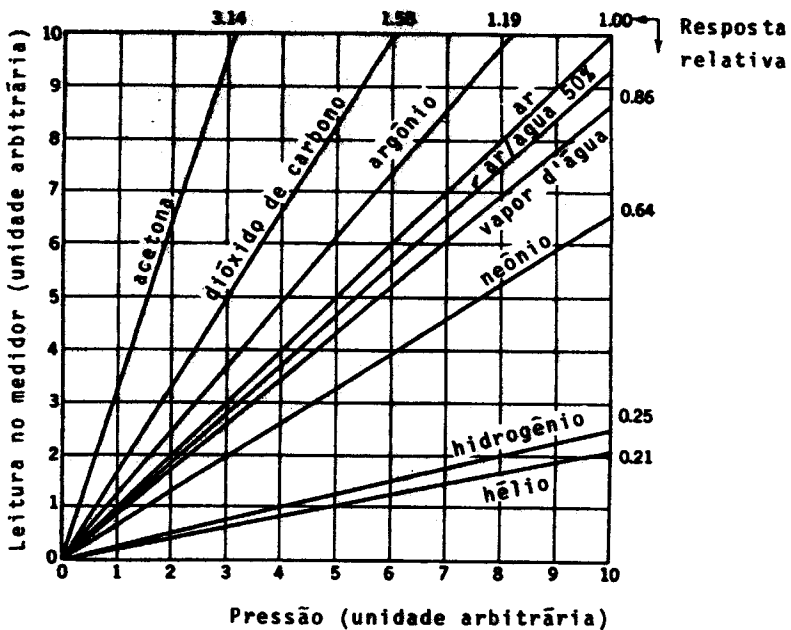


Fig. 30 Curvas de resposta do medidor Alpatron

***** // // // *****

APÊNDICE 1

FATORES DE SENSIBILIDADE s DE MEDIDORES DE IONIZAÇÃO (torr⁻¹)

a) Medidor Bayard-Alpert (Westinghouse WL-5966 PPL)								
gás	He	Ne	A	N ₂	H ₂	CO	CH ₄	N ₂ O
s	2,4	3,7	16,4	11,5	5,0	13,0	18,0	14,2
b) Medidor tipo TrÍodo (Westinghouse WL-7676)								
gás	He	N ₂	CO	H ₂	D ₂ (PPL)	H ₂ O		
s	0,06	0,40	0,42	0,21	0,24	0,56		
Potenciais dos elétrodos	coletor filamento grade	WL-5966		WL-7676				
		terra + 30 V + 180 V		terra + 60 V + 120 V				

APENDICE 2

ALGUNS MEDIDORES DE PRESSÃO TOTAL

medidor	faixa de trabalho Torr	princípio de funcionamento
McLeod	$10^{-5} - 10$	gás comprimido por Hg
Diafragma	$10^{-4} - 50(760)$	membrana móvel
Condutividade térmica (termopar, termistor, Pirani)	$10^{-3} - 30$	refrigeração de um filamento aquecido
Alphatron	$10^{-4} - 10^3$	gás ionizado por raios α , emitidos pelo elemento Ra
Bayard-Alpert	$10^{-10} - 10^{-3}$	ionização do gás por elétrons emitidos por um filamento incandescente
Medidor de ionização para pressões mais elevadas (tríodo)	$10^{-5} - 1$	ionização do gás por elétrons emitidos por um filamento incandescente
Penning ou de Descarga	$10^{-7} - 10^{-2}$	descarga em gás com cátodo frio em um campo elétrico e magnético perpendiculares entre si
Magnetron de cátodo frio	$10^{-13} - 10^{-4}$	descarga em gás com cátodo frio em campos na configuração de magnetron
Magnetron de cátodo quente	$10^{-13} - 10^{-3}$ limite inferior 10^{-16}	descarga em gás com cátodo quente em campos na configuração de magnetron

(continuação)

medidor	vantagens	desvantagens
McLeod	medidor de pressão absoluta	frágil; contém Hg; difícil de medir pressão de vapor; indicação de leitura não contínua; difícil de aquecer (degas.)
Diaphragma	medidor de pressão absoluta	aquecimento p/ degassificação possível apenas c/ baixas temperaturas
Condutividade térmica (termopar, termistor, Pirani)	barato; resistência a entradas de ar súbitas	reprodutibilidade limitada, dependendo da adsorção do gás
Alphatron	faixa de trabalho incluindo pressões mais elevadas (atm)	não pode ser aquecido; perigo leve de radiação
Bayard-Alpert	pode medir pressões bastante baixas	o gás pode reagir com o filamento incandescente; tem efeito de bombeamento e pode ser fonte de gás
Medidor de ionização para pressões mais elevadas (tríodo)	faixa de trabalho estendida a pressões mais elevadas	o gás pode reagir com o filamento incandescente
Penning ou de Descarga	simples, robusto; ausência de filamento aquecido	indicação de pressão nem sempre completamente linear ou reprodutível; - grande efeito de bombeamento
Magnetron de cátodo frio	faixa de trabalho incluindo pressões ultra-baixas; ausência de filamento quente	grande efeito de bombeamento; leva vários minutos para iniciar a leitura quando a pressão é baixa; indicação de pressão às vezes não linear
Magnetron de cátodo quente	limite inferior de pressão extremamente baixo	possui filamento incandescente. Não é disponível para comercialização

APENDICE 3

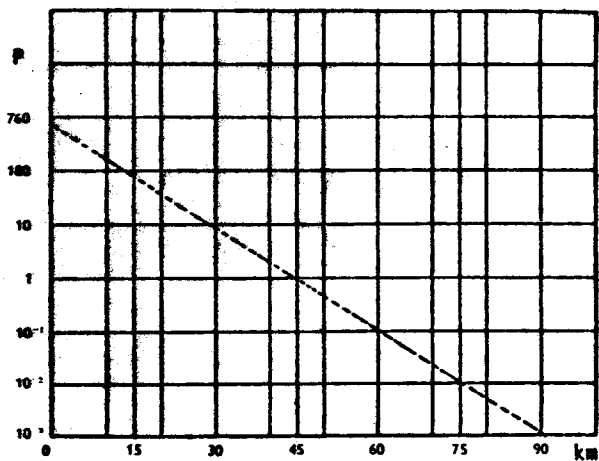
ALGUNS TERMOPARES

tipo de termopar	faixa de trabalho	
	contínuo (°C)	pouco tempo (°C)
Cobre com Constantan	-190 a 350	atê 600
Cromel com Constantan	0 a 900	atê 1100
Ferro com Constantan	0 a 900	atê 1100
Cromel com Alumel	0 a 1100	atê 1350
Platina com Platina(13% ródio)	0 a 1450	atê 1700
Platina com Platina(10% ródio)	0 a 1450	atê 1700
Tungstênio com Molibdênio	1000 a 2500	atê 2500

APENDICE 4

VARIAÇÃO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA COM A ALTITUDE

(valores médios e experimentais)



UNIDADES DE PRESSÃO (VÁCUO)

	bar	mbar	Pa	atm	torr
1 bar	1	10^3	10^5	0,986923	750,062
1 mbar	1×10^{-3}	1	10^2	$0,986923 \times 10^{-3}$	0,750062
1 Pa	10^{-5}	10^{-2}	1	$0,986923 \times 10^{-5}$	$0,750062 \times 10^{-2}$
1 atm	1,01325	$1,01325 \times 10^3$	$1,01325 \times 10^5$	1	760
1 torr	$1,333224 \times 10^{-3}$	1,333224	$1,333224 \times 10^2$	$1,315789 \times 10^{-3}$	1

De acordo com as novas regras do "Internacional System of Units", as unidades oficiais de pressão passam a ser o bar ($\text{dinas} \times \text{cm}^{-2}$), mbar e o Pascal ($\text{Pa} - \text{N} \times \text{m}^{-2}$), no lugar de atm e torr.

ALGUNS DADOS DO AR À TEMPERATURA AMBIENTE

		PRESSÃO (TORR)						
		10^{-3}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-14}	10^{-16}	
	760							
Caminho livre médio	10^{-5} cm	7 cm	7 km	700 km	7×10^5 km	7×10^6 km	7×10^8 km	
Número de moléculas por cm	$2,5 \times 10^{19}$	$3,3 \times 10^{13}$	$3,3 \times 10^8$	$3,3 \times 10^6$	$3,3 \times 10^4$	$3,3 \times 10^2$	3,3	
Número de moléculas batendo em $1 \text{ cm}^2/\text{s}$.	3×10^{23}	$3,5 \times 10^{17}$	$3,5 \times 10^{12}$	$3,5 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^8$	$3,5 \times 10^6$	$3,5 \times 10^4$	
Taxa média de colisões entre moléculas	$5 \times 10^9/\text{s}$	$6,5 \times 10^3/\text{s}$	$6,5 \times 10^{-2}/\text{s}$ 1 a cada 15,4 s.	$6,5 \times 10^{-4}/\text{s}$ 1 a cada 25,5 min.	$6,5 \times 10^{-6}/\text{s}$ 1 a cada 45 h.	$6,5 \times 10^{-8}/\text{s}$ 1 a cada 188 dias	$6,5 \times 10^{-10}/\text{s}$ 1 a cada 51,5 anos	

DADOS CINÉTICOS PARA ALGUNS GASES

Gás	Massa de uma molécula (g)	Diâmetro médio de uma molécula (cm)	Caminho livre médio (cm)		Velocidade média aritmética a 209 C (cm/s)	Condutividade térmica a 760 torr e 09 C cal/(s)(cm)(K)	Viscosidade de a 760 torr e 209 C (poise)	Número de colisões moleculares a 209 C e 209 C por cm ²	Tempo para formar uma camada de moléculas a 209 C e 10 ⁻⁶ torr (s)
			a 209 C 750 torr	a 209 C 10 ⁻³ torr					
Ar	— ⁻²⁴	—	—	5,1	4,63x10 ⁴	5,76x10 ⁻⁵	18,1 x10 ⁻⁵	—	—
Hidrogênio	3,35x10 ⁻²⁴	2,75x10 ⁻⁸	17,44x10 ⁻⁶	9,2	17,55x10 ⁴	41,9 x10 ⁻⁵	8,75x10 ⁻⁵	14,4 x10 ¹⁴	1,04
Hélio	6,64x10 ⁻²⁴	2,18x10 ⁻⁸	27,45x10 ⁻⁶	14,6	12,52x10 ⁴	34,3 x10 ⁻⁵	19,41x10 ⁻⁵	10,2 x10 ¹⁴	2,42
Argônio	66,2 x10 ⁻²⁴	3,67x10 ⁻⁸	9,88x10 ⁻⁶	5,15	3,95x10 ⁴	3,88x10 ⁻⁵	22,17x10 ⁻⁵	3,23x10 ¹⁴	2,69
Nitrogênio	46,5 x10 ⁻²⁴	3,75x10 ⁻⁸	9,29x10 ⁻⁶	4,95	4,71x10 ⁴	5,68 x10 ⁻⁵	17,6 x10 ⁻⁵	3,87x10 ¹⁴	2,14
Oxigênio	53,1 x10 ⁻²⁴	3,61x10 ⁻⁸	9,93x10 ⁻⁶	5,3	4,40x10 ⁴	5,7 x10 ⁻⁵	20,2 x10 ⁻⁵	3,62x10 ¹⁴	2,46
Monóxido de Carbono	46,5 x10 ⁻²⁴	3,15x10 ⁻⁸	9,23x10 ⁻⁶	7,0	4,71x10 ⁴	5,42x10 ⁻⁵	17,5 x10 ⁻⁵	3,87x10 ¹⁴	2,42
Dióxido de Carbono	73,0 x10 ⁻²⁴	4,59x10 ⁻⁸	6,15x10 ⁻⁶	3,3	3,76x10 ⁴	3,32x10 ⁻⁵	14,8 x10 ⁻⁵	3,08x10 ¹⁴	1,73
Vapor de Água	29,9 x10 ⁻²⁴	4,6 x10 ⁻⁸	—	3,3	5,87x10 ⁴	5,5 x10 ^{-5*}	9,8 x10 ⁻⁵	4,82x10 ¹⁴	1,11
Vapor de Mercúrio	334 x10 ⁻²⁴	4,26x10 ⁻⁸	14,70x10 ⁻⁶	3,8	1,76x10 ⁴	1,19x10 ⁻⁵	—	—	—

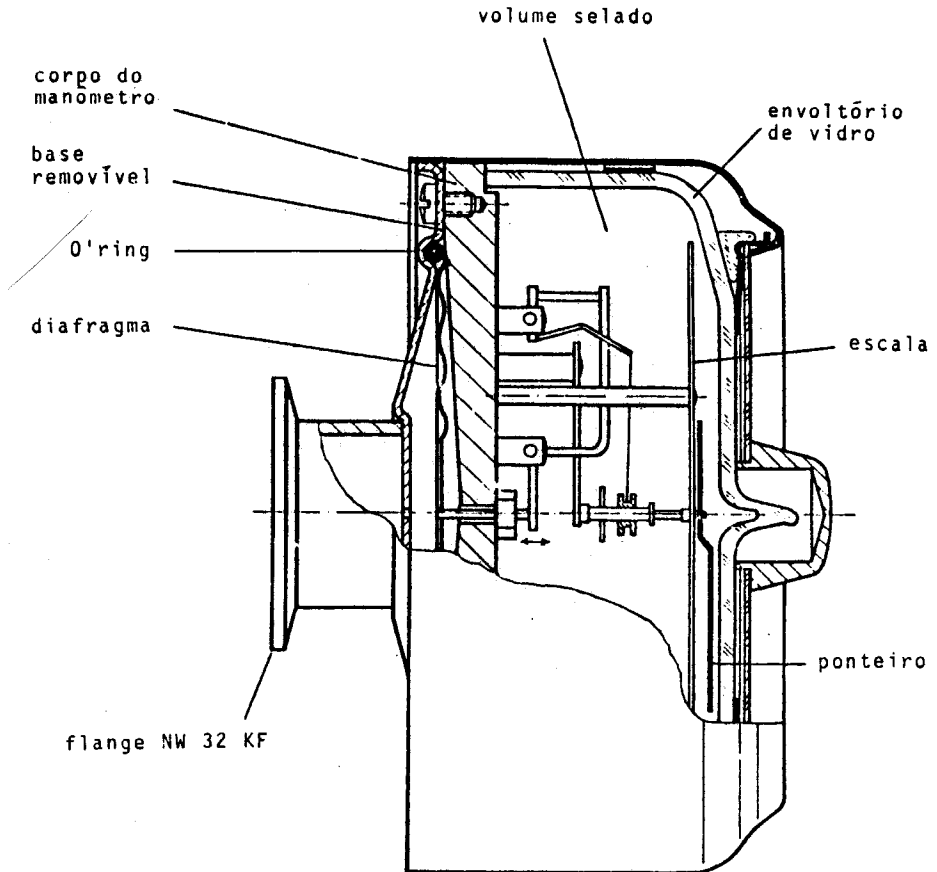
(*) a 1009 C

SENSIBILIDADE RELATIVA DOS MEDIDORES DE CONDUTIVIDADE
TERMICA PARA VÁRIOS GASES

<u>gás</u>	<u>Pirani</u>	<u>Termopar</u>	<u>Termistor</u>
AR	1,0	1,0	1,0
N ₂	1,0	1,0	1,0
O ₂	1,0	0,9	1,0
A	0,8	0,7	0,6
H ₂	1,2	1,8	1,3
He	-	0,9	1,2
CO ₂	1,0	1,0	1,0

DESENHO ESQUEMÁTICO DO MANÔMETRO DE DIAFRAGMA

DIAVAC (Leybold-Heraeus)



DESENHO DE MONTAGEM DO MEDIDOR DE DESCARGA/PENNING EDWARDS CP25

