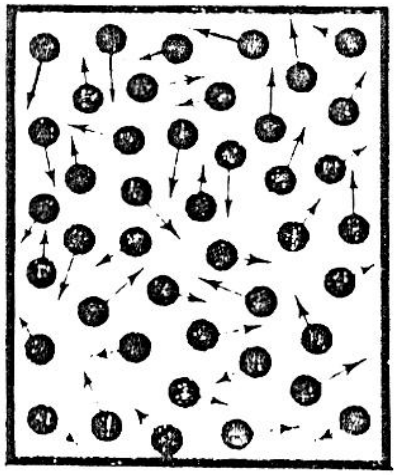
12. Conceitos de Vácuo

Muitos processos de microeletrônica, como a deposição de filmes finos por CVD, assim como, plasma etching, sputtering e evaporação, são feitas em câmaras de vácuo, em regimes de pressão reduzida e/ou em ambientes com fluxo de gases. É importante portanto, para a melhor compreensão destes processos, o conhecimento da terminologia e conceitos da tecnologia de vácuo. Abordaremos de forma bastante resumida nesta secção as definições básicas e os equipamentos utilizados para a produção e medidas de vácuo.

12.1. Comportamento dos Gases em Vácuo

As moléculas do gás numa câmara se movimentam de forma aleatória sem nenhuma direção preferencial (Fig. 1), pois no estado gasoso as moléculas são mais independentes um do outro. O estado do gás é descrito pelas seguintes características: espécie e massa do gás, o volume da câmara que contém o gás, pressão e a temperatura do gás. A pressão exercida pelo gás sobre as paredes da câmera é causada pelas colisões das moléculas do gás com as respectivas paredes.



V, T, p

Figura 1 : Gás em Equilíbrio numa Câmera

O comportamento do gás em vácuo pode ser descrito usando o conceito de "gás ideal". Um "gás ideal" é um gás cujo estado é tal que o volume total de todas as moléculas é desprezível comparado com o volume da câmera em que estão confinadas e a energia de atração entre as moléculas é desprezível comparada com a energia térmica média do gás.

Num gás ideal o volume, a pressão e a temperatura estão relacionadas por:

p.V = cte , se **T = cte** ; lei Boyle e Mariott

p/T = cte , se **V = cte** ; lei de Gay-Lussac

V/T = cte, se **p = cte** ; lei de Gay-Lussac

e

pV = nRT ; lei de Boyle/Gay-Lussac

onde

R = 8.314 J/K.mol
(constante molar dos gases)

Num gás ideal as moléculas gasosas são tratadas como se fossem minúsculas esferas de massa **m** movendo em direções aleatórias. A figura 1 ilustra o movimento molecular do gás numa câmara de volume **V**, contendo **N** moléculas. A densidade **n** de moléculas no gás é **n = N/V**. Devido ao grande número de colisões entre as moléculas e destas com as paredes internas da câmara, as velocidades estão continuamente mudando de direção e valor. Para um gás em equilíbrio e uniformemente distribuído no espaço, Maxwell encontrou que a distribuição das velocidades das moléculas é dada por:

$$(1/n)(dn_v/dv) = \sqrt{[(2m^3)/(\pi k^3 T^3)]}.v^2.\exp[-(mv^2/2kT)$$

que dá a fração das moléculas com uma velocidade absoluta **v** num intervalo unitário em torno de **v**.

n = número de moléculas/volume; $\mathbf{dn_v}$ = nº de moléculas com velocidades entre v e v+dv ; m = massa da molécula; k = constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} $J.K^{-1}$; T = temperatura absoluta.

A figura 2 ilustra a distribuição das velocidades das moléculas de nitrogênio em 2 temperaturas. As curvas representam, numa dada temperatura e num dado instante, o número de moléculas que têm uma determinada velocidade. O pico da curva dá a velocidade mais provável e a maioria das moléculas apresentam velocidades desta ordem. Mas existem uma pequena fração das moléculas que se movimentam a velocidades relativamente lentas, assim como, as que se movimentam a velocidades mais rápidas. A velocidade média é denotada por **v**. Nota-se também que não há moléculas com velocidade zero ou com velocidade infinita.

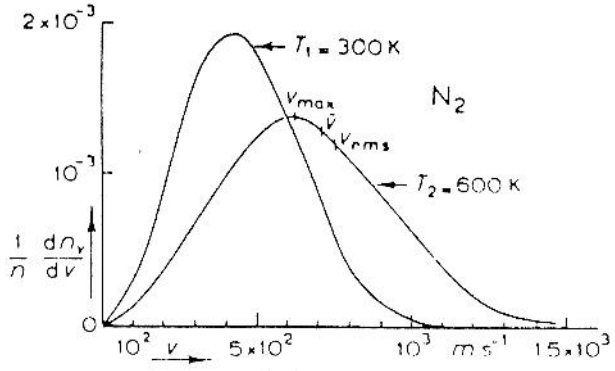


Figura 2 : Distribuição das Velocidades das Moléculas

A partir da equação de Maxwell, podemos determinar :

velocidade mais provável**:** $\mathbf{v_{máx} = \sqrt{(2kT/m)}}$ (1)

velocidade média**:** $\mathbf{v = \sqrt{[(8kT)/(\pi m)]} = 1.13\ v_{máx}}$ **(2)**

velocidade quadrática média: $\mathbf{v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{[(3kT)/m]} = 1.22\ v_{máx}}$ **(3)**

Observamos que quanto maior a temperatura T, maior é a velocidade média e que para gases diferentes, a velocidade média será maior para o gás com moléculas de menor massa (menor M). Alguns valores típicos de velocidade média a temperatura ambiente: hidrogênio - 1760 m/s; hélio - 1245 m/s; nitrogênio - 470 m/s, Argônio - 400 m/s; vapor de água - 587 m/s.

Pressão e Livre Caminho Médio

A pressão **P** exercida pelo gás pode ser calculado a partir de :

$$\mathbf{P = (1/3)nmv^2_{rms} = nkT} \qquad \mathbf{(4)}$$

Como a pressão **P** é devida a força exercida sobre a parede da câmara, resultante do impacto das moléculas do gás com as paredes da mesma : $\rightarrow$ a pressão total depende do número de impactos e do momentum (= massa x velocidade) das moléculas que colidem com as paredes (dependência com **n e T**).

Se há mais de um gás no sistema, a pressão total é a soma das pressões parciais exercidas por cada um dos gases.

Temos ainda da equação (4) : temperaturas altas levam a pressões também altas.

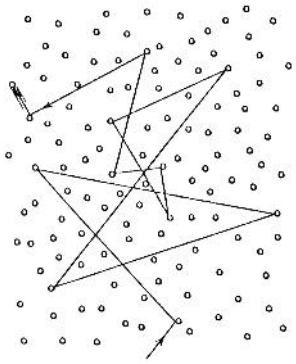
Note-se que, para uma dada temperatura, a pressão exercida pelo gás depende somente da densidade **n** de suas moléculas e não da sua identidade química. Assim, por exemplo:

os gases hélio e nitrogênio exercem a mesma pressão a uma dada temperatura, se as suas densidades **n** forem iguais, apesar de terem diferentes massas moleculares.

A razão é que as moléculas leves de hélio, embora eles movimentem bastante rápidos na média e tenham alta taxa de colisões sobre as paredes da câmara, transportam momentum mais baixos.

Outros dois parâmetros importantes para compreender o comportamento dos gases em vácuo são o fluxo das moléculas que incidem sobre as paredes e o livre caminho médio.

Como já vimos as moléculas do gás numa câmara estão aleatoriamente distribuídos e movem com velocidades diferentes. Isto implica que cada um deles caminham uma distância em linha reta diferente (caminho livre) antes de se colidir com uma outra partícula.



Movimento Aleatório das Moléculas

Nem todos os caminhos livres são de mesmo comprimento. Segundo a teoria cinética dos gases, o valor médio destes caminhos livres, λ, chamado como livre caminho médio, é dado por :

$$\lambda = 1/[2^{1/2}.\pi.d_o^2.n]$$

onde :

d_o é o diâmetro molecular e
n a concentração do gás

A concentração **n** geralmente não e conhecida. Substituindo na expressão por **n = p/kT**, temos:

$$\lambda = kT/2^{1/2}.\pi.d_o^2.p$$

O livre caminho médio λ é claramente dependente da densidade do gás, aumentado a medida que este diminui. Depende também da temperatura e da pressão.

Para o caso do ar a temperatura ambiente, o livre caminho médio pode ser estimado através de uma relação mais simples e conveniente.

$$\lambda = 6.6/p(Pa) = 0.05/p(torr)$$

Nesta aproximação, o modelo indica que :

- 63% das colisões das moléculas do sistema ocorrem numa distância menor do que λ,
- cerca de 35-37% entre λ e 5λ, e
- somente cerca de 0.6% das moléculas movem distâncias maiores que 5λ sem sofrer a colisão.

Para o nitrogênio à temperatura ambiente e pressão atmosférica, a distância λ é de 6.6×10^{-8} m ou 200 diâmetros molecular. No caso do argônio a temperatura ambiente temos : 3.3×10^{-3} mm a pressão de 1.5 torr e de 333 mm a pressão de 1.5 mtorr.

Quanto ao diâmetro das moléculas, as moléculas diatômicas simples como N_2 e O_2 é da ordem de 3 □.

A **densidade de fluxo das moléculas** ou número de colisões de moléculas por unidade de área na parede por unidade de tempo é dado por:

$$\mathbf{J = nv/4 = p/(2\pi mkT)^{1/2} = [(3.5x10^{22})/(MT)^{1/2}]p} \quad \text{colisões} x cm^{-2} s^{-1}$$

onde : p = pressão em torr;
M = peso molecular em grama; e T = temperatura em °K.

Gás de nitrogênio a temperatura ambiente e pressão atmosférica :

J é de aproximadamente $6x10^{29}$ colisões/(cm^2xs).

Unidades de Pressão e Fatores de Conversão

- pascal (Pa = 1 N/m^2) → unidade de medida de P no sistema SI.
- são também utilizadas várias outras unidades.
- torr, por exemplo, que mede a pressão que suporta 1 mm de altura de coluna de mercúrio tem sido amplamente usada para especificar os equipamentos de vácuo.

Fatores de conversão para algumas unidades:

1 pascal (Nm^{-2}) = $7.5x10^{-3}$ torr
1 torr = 133.3 Pa = $1.316x10^{-3}$ atm = $1.333x10^{-3}$ bar
1 bar = $1x10^5$ Pa = 750 torr
1 atm = $1.013x10^5$ Pa = 760 torr = 760 mm Hg = 1.013 bar
1 PSI ($lbf.in^2$) = $6.895x10^3$ Pa = 51.71 torr

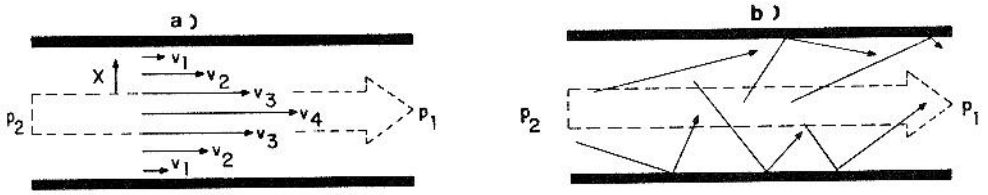
Fluxo e Escoamento de Gases

O escoamento é provocado por um gradiente na pressão ou temperatura. Mesmo um pequeno gradiente na pressão faz com que o gás flua da região de alta para a de baixa pressão.

Um dos aspectos importantes do fluxo de gases é que sua natureza pode variar consideravelmente, dependendo da pressão e da geometria da câmara ou da tubulação em que o mesmo está se movendo.

A pressões altas o livre caminho médio λ é curto, portanto, o comportamento das moléculas é praticamente regido pelas colisões com outras moléculas do gás. Em fluxos de gás deste tipo, as moléculas movem como um jato(figura a). O regime de escoamento de gases deste tipo são chamados de fluxo viscoso e podem ser:

- tipo laminar $\rightarrow$ quando as camadas de fluxo forem paralelas,
- ou viscoso turbulento $\rightarrow$ quando a velocidade do gás exceder a certos valores. As camadas de fluxo não são mais paralelas, havendo a formação de bolsões de baixa pressão entre as camadas.



Representação esquemática das velocidades das moléculas em um tubo estreito: (a) - em fluxo viscoso e (b) - em fluxo molecular.

A pressões baixas, os livres caminhos médios podem ser bastante longos e as colisões das moléculas são quase que exclusivamente com as paredes da câmara ou do tubo e não entre si.

Os movimentos das moléculas são independentes, ao contrário do caso de fluxo viscoso, quando há movimento coletivo. Fluxos deste tipo são chamados de fluxo molecular (figura b).

Em geral, temos :

- um fluxo viscoso quando a dimensão **D** da câmara de vácuo ou diâmetro do tubo em que o gás está fluindo for maior do que o livre caminho médio (**D >> λ**) e
- regime de escoamento molecular quando (**λ >> D**).

As pressões tais que **λ ≈ D** o escoamento é chamado de regime intermediário, e a freqüência de colisões molécula-molécula são da mesma ordem que a freqüência de colisões das moléculas com as paredes do tubo.

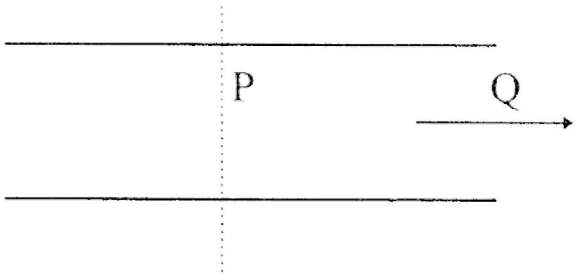
Como uma conseqüência das diferenças de comportamento do gás de um regime para outro, as condutâncias e correntes moleculares são diferentes nos três regimes.

Critério para se determinar o regime de escoamento :

- laminar se ***número de Reynolds*** $\mathbf{R_e}$, $R_e < 1100$; e
- turbulento se $R_e > 2100$.
- O limite entre o escoamento turbulento e laminar é um número entre 1100 e 2100, que depende entre outros fatores, da rugosidade interna do tubo.

Definições das Grandezas Fundamentais

Velocidade de Bombeamento e Corrente Molecular do Gás



Velocidade de Bombeamento e Corrente Molecular do Gás

O escoamento se processa na direção indicada pela seta. Seja P a pressão numa seção transversal da tubulação. Por essa seção escoa um certo volume ΔV do gás no intervalo de tempo Δt.

Chamamos de velocidade de bombeamento S, na seção considerada, a relação:

$$S = \Delta V/\Delta t \qquad (l/s)$$

A corrente molecular do gás:

$$Q = P.S \qquad (torr.l/s)$$

logo, a corrente molecular do gás é dada por:

$$Q = P.\Delta V/\Delta t \qquad (torr.l/s)$$

Admitindo : T = constante; Q pode ser equacionado em função do número de moléculas ΔN que atravessam a seção do tubo no intervalo de tempo Δt. Inicialmente, derivando a equação de estado de um gás ideal em relação ao tempo temos:

$$P(dV/dt) + V(dP/dt) = kT(dN/dt)$$

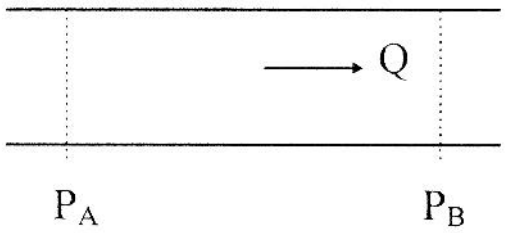
Se o escoamento se processar em regime estacionário, isto é, P independente do tempo, teremos dP/dt = 0. Então:

$$P(dV/dt) = Q = kT(dN/dt)$$

As bombas de vácuo são geralmente especificados pela velocidade de bombeamento.

Condutância do Tubo

Condutância do Tubo



Se no tubo mostrado na figura acima existe um fluxo de gás, é porque há uma diferença de pressão entre dois planos quaisquer A e B transversais ao tubo. A direção do fluxo é a do plano de pressão maior para o de menor.

Fazendo uma analogia com o fluxo de corrente elétrica num condutor, temos a definição da *condutância do tubo* limitado pelos dois planos A e B:

$$C_{AB} = Q/(P_A - P_B) \qquad (l/s)$$

com a diferença de pressão $\Delta P = P_A - P_B$ análoga a diferença de potencial elétrico. Como em eletricidade, ao inverso da condutância dá-se o nome de impedância:

$$Z_{AB} = (C_{AB})^{-1} = (P_A - P_B)/Q \qquad (s/l)$$

A condutância é geralmente medida em litro/segundo e a impedância em segundo/litro.

Fisicamente, o conceito de impedância está associado com a dificuldade (resistência) oferecida pelo tubo à passagem do gás.

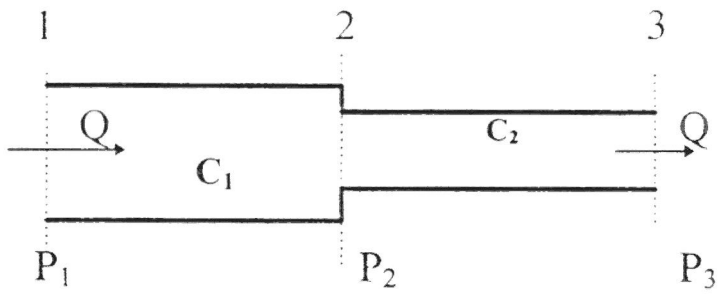
É fácil imaginar, por exemplo, que quanto mais fino for um tubo maior será a dificuldade de passagem do gás e portanto maior a sua impedância.

Um outro conceito importante está relacionado com a conservação da corrente molecular: **a corrente molecular Q tem o mesmo valor em qualquer seção de uma tubulação**. Essa afirmação é verdadeira, mesmo que a seção reta do tubo não seja uniforme. É fácil entender a conservação da corrente, se lembrarmos que uma variação da mesma ao longo do tubo implicaria num acúmulo (ou diminuição) do gás em certas regiões, o que causaria variações de P com o tempo, contrariando a hipótese de escoamento estacionário.

Enquanto Q é constante, os valores de S e P variam de ponto para ponto ao longo do comprimento de uma tubulação.

Condutâncias em Série

Os componentes de vácuo também podem ser associados em série ou em paralelo.



Associação em Série de 2 Tubos

Na figura acima, se C_1 e C_2 são as condutâncias dos dois tubos conectados em série.e P_1, P_2 e P_3 são as pressões nos planos das seções retas 1, 2 e 3, temos:

$$\mathbf{P_1 - P_2 = Q/C_1} \qquad \text{e} \qquad \mathbf{P_2 - P_3 = Q/C_2}$$

Somando as duas equações:

$$\mathbf{P_1 - P_3 = Q[(1/C_1) + (1/C_2)] = Q/C_{tot}}$$

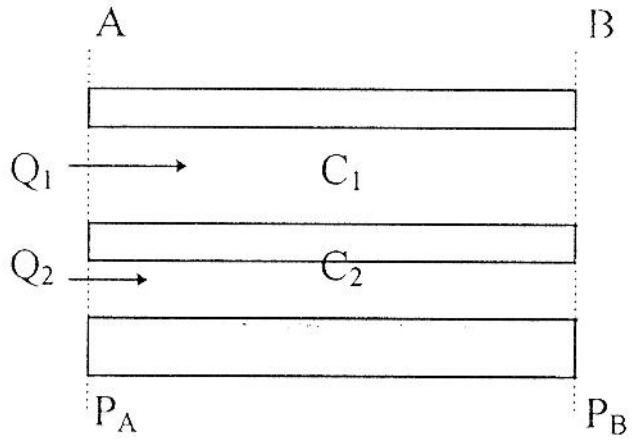
onde C_{tot} é a condutância total da associação :

$$1/C_{tot} = 1/C_1 + 1/C_2$$

Generalizando para n tubos associados em série:

$$1/C_{tot} = 1/C_1 + 1/C_2 + \quad + 1/C_n$$

Condutâncias em Paralelo



Associação em Paralelo de Tubos

Se C_1 e C_2 são as condutâncias dos dois tubos associados em paralelo e P_A e P_B são as pressões nos planos A e B, tomando cada tubo em separado temos:

$$C_1 = Q_1/(P_A - P_B) \quad e \quad C_2 = Q_2/(P_A - P_B)$$

somando, $C_1 + C_2 = (Q_1 + Q_2)/(P_A - P_B)$

Considerando a associação como um todo, a condutância total da associação será:

$$C_{tot} = Q_{tot}/(P_A - P_B)$$

onde,

Q_{tot} é a corrente molecular total ($Q_1 + Q_2$)

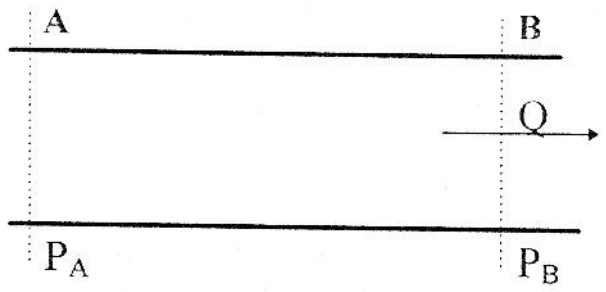
logo :

$$C_{tot} = C_1 + C_2$$

Generalizando para n tubos associados em paralelo temos:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + \quad + C_n$$

Variação da Velocidade de Bombeamento ao Longo da Tubulação



Variação da Velocidade de Bombeamento ao Longo do Tubo

A velocidade de bombeamento S em um plano qualquer de uma tubulação pode ser determinada em função da velocidade de bombeamento noutro plano e da condutância entre os dois planos. Consideremos um tubo como a mostrada na figura acima. A e B são dois planos perpendiculares ao eixo do tubo e P_A e P_B são as pressões nos planos.

No plano A a velocidade de bombeamento é:

$$S_A = Q/P_A \quad \therefore \quad 1/S_A = P_A/Q$$

No plano B a velocidade de bombeamento é de:

$$S_B = Q/P_B \quad \therefore \quad 1/S_B = P_B/Q$$

A subtração das equações acima resulta em:

$$1/S_A - 1/S_B = (P_A - P_B)/Q = 1/C_{AB}$$

Portanto, $S_A = (S_B C_{AB})/(S_B + C_{AB})$ (l/s)

Como $C_{AB}/(S_B + C_{AB}) \leq 1$, isto implica em $S_A \leq S_B$, ou seja, a velocidade de bombeamento na região de mais alta pressão é sempre menor que a velocidade de bombeamento na região de mais baixa pressão.

Faixas de Pressão

Ambiente de vácuo : várias faixas de pressão.
A divisão é no entanto, bastante flexível, sendo aproximadamente :

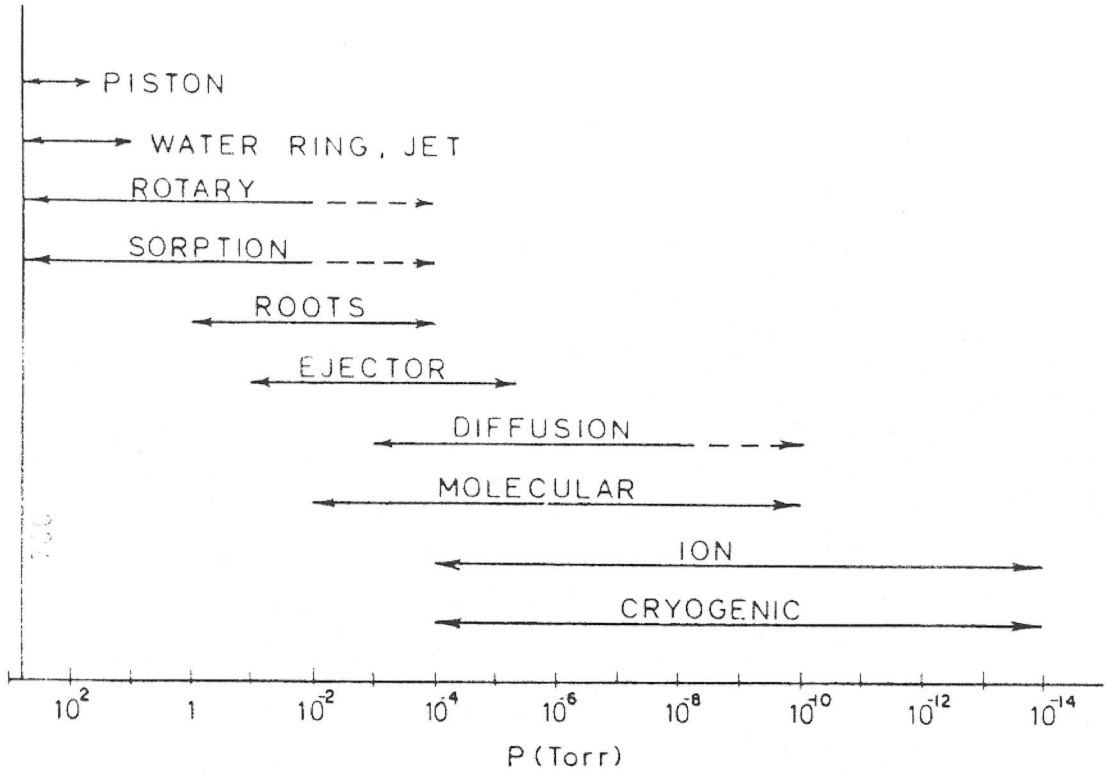
baixo(primário ou grosso) vácuo :	0.1 a 760 torr	ou	10 a 10^5 Pa
médio vácuo :	10^{-4} a 10^{-1} torr	ou	10^{-2} a 10 Pa
alto vácuo :	10^{-8} a 10^{-4} torr	ou	10^{-7} a 10^{-2} Pa
ultra alto vácuo :	< 10^{-8} torr	ou	< 10^{-7} Pa

Aplicações por faixa

- **vácuo grosso e médio : CVD, sputtering, plasma etching**
- **alto vácuo : limpeza da câmara, evaporação, implantação de íons**
- **ultra alto vácuo : MBE**

Bombas de Vácuo

- Ambiente de vácuo: dividido em várias faixas.
- Não existe bomba capaz de bombear a câmara em toda a sua extensão, ou seja, da pressão atmosférica para o alto vácuo ou ultra alto vácuo.
- Há muitas bombas mas cada qual operam efetivamente entre os níveis de pressão específicos.
- A figura abaixo mostra as faixas de pressão operacional de uma variedade de bombas de vácuo.



Região de Pressão das Bombas de Vácuo

Para bombear da pressão atmosférica para o alto vácuo, usa-se inicialmente uma bomba de vácuo primário para a evacuação da câmara até a região de médio vácuo e então, com a bomba de alto vácuo se faz o bombeamento até a pressão de alto vácuo.

Basicamente, as bombas de vácuo podem ser classificadas em duas diferentes categorias:

- bombas de transferência e
- bombas de captura.

No primeiro caso, a bomba simplesmente transfere o gás bombeado de uma região do sistema de vácuo para outra. Por exemplo, de uma câmara para um tubo de exaustão que canaliza o gás para fora do ambiente do laboratório. Nas bombas de captura, as moléculas do gás por elas bombeadas, ficam presas nas próprias bombas.

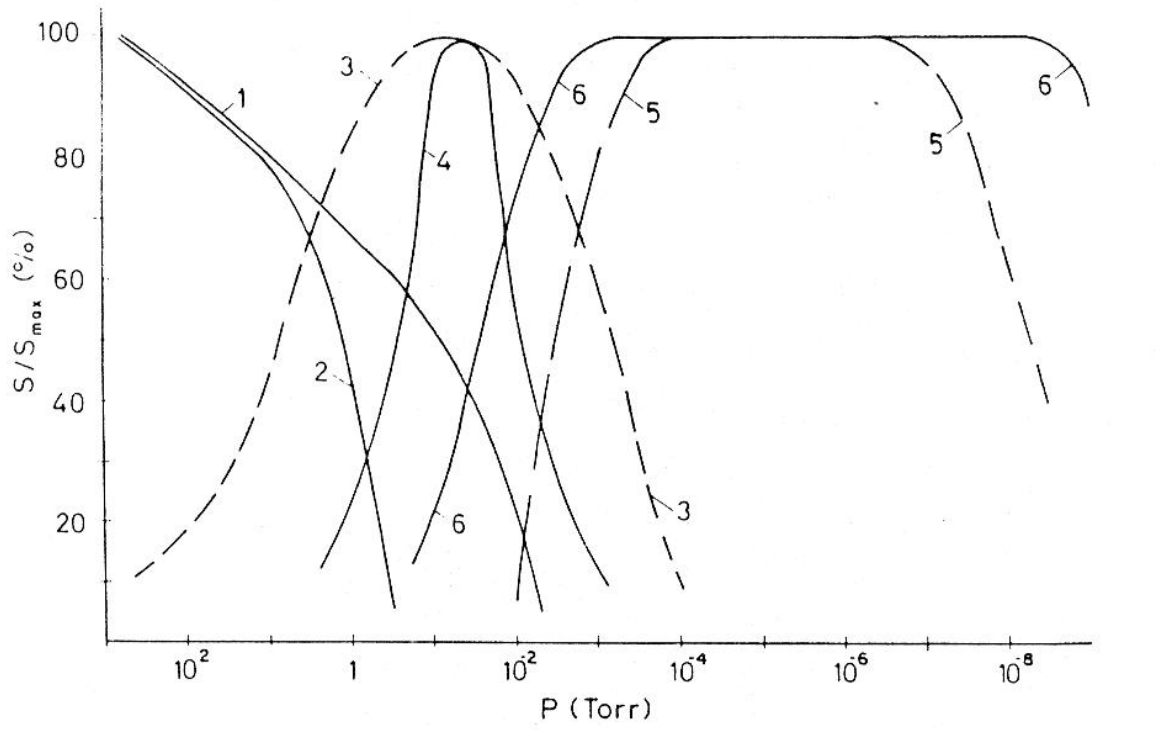
Dois fatores de grande importância em bombas de vácuo:

a) a pressão mais baixa que uma bomba pode alcançar, geralmente chamado de pressão final, e
b) a qualidade do vácuo produzido.

Com relação a este último aspecto, algumas bombas de vácuo, como as bombas de difusão, podem emitir vapores de óleo para o interior do sistema de vácuo, o que para algumas aplicações, não podem ser tolerado.

A seleção ou escolha da bomba de vácuo a ser usada é definida pelos parâmetros como : pressão desejada; o intervalo de pressão; a velocidade de bombeamento; e a pressão de exaustão.

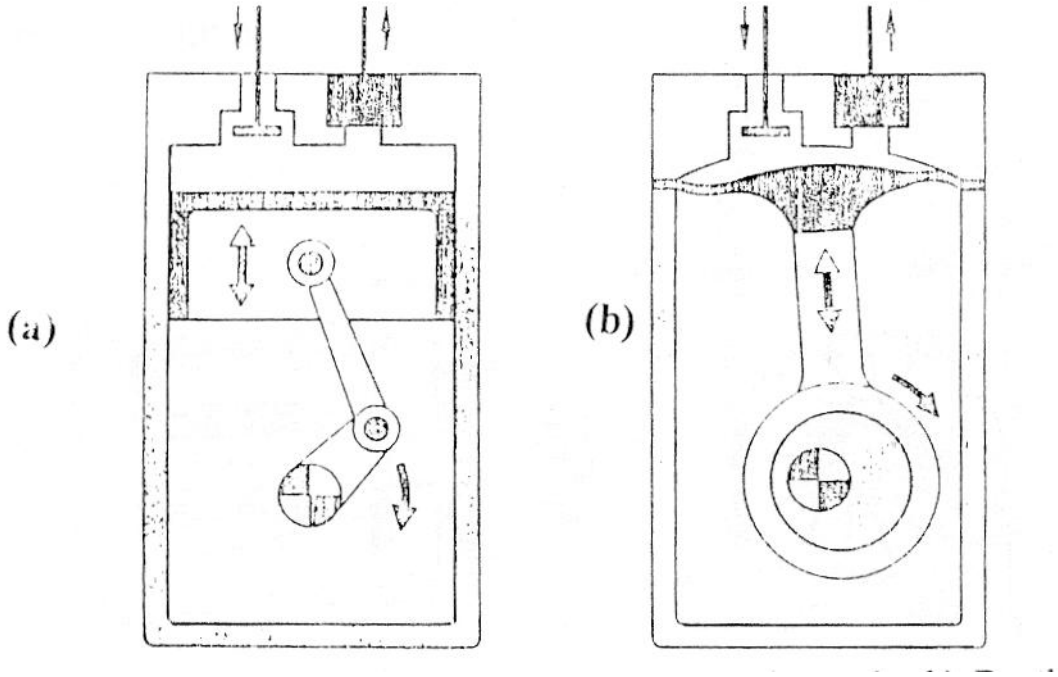
a) Pressão desejada: pressão mínima na boca da bomba;
b) Intervalo de pressão: é aquele no qual a bomba pode bombear;
c) Velocidade de bombeamento: não e constante, no entanto, é função da pressão;
d) Pressão de exaustão: é a pressão através da qual a bomba pode ser operada, que ocorre de três formas diferentes: 1) bombeamento a partir da pressão atmosférica, como por exemplo, a bomba rotativa de palheta; 2) bombeamento a partir de pressões bem abaixo da pressão atmosférica, como por exemplo, a bomba difusora, roots e a turbomolecular; 3) imobilização do gás, por exemplo, a bomba de sorção e a de ionização, que só podem ser ligadas quando a pressão da câmara estiver bem baixa.



Velocidade de bombeamento de várias bombas em termos da velocidade máxima de bombeamento $S_{máx}$. (1) - bomba rotativa de palheta de um estágio sem gás ballast; (2) - a mesma, com gás ballast; (3) - bomba roots; (4) - bomba ejectora; (5) - bomba difusora; (6) - bomba turbomolecular.

Bombas Mecânicas

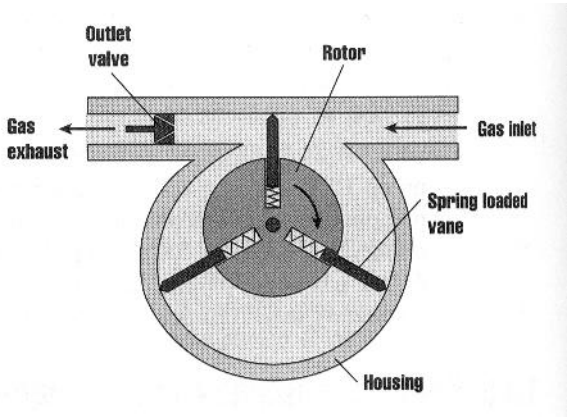
As bomba utilizadas para baixo vácuo são de deslocamento positivo do gás obtido através de movimento mecânico de um piston, palheta, êmbolo, ou diafragma. Estas bombas envolvem três etapas: **captura de um volume do gás; compressão do volume capturado e expulsão do gás**. A imagem conceitual mais simples deste tipo de bomba é a bomba de piston. Inicialmente, o movimento do piston arrasta consigo o gás a ser bombeado para dentro do cilindro através da válvula. No ciclo seguinte, a válvula se fecha e o gás é comprimido. Por final, abre-se a segunda válvula e o gás é expelido para a região de alta pressão. Em geral, as válvulas abrem automaticamente em resposta a diferença na pressão. A taxa de compressão das bombas de piston é bastante baixa. Por exemplo, se a pressão de exaustão for de 1 atm e a taxa de compressão da bomba de piston de 100:1, a pressão mais baixa que pode ser alcançada por esta bomba é de 0.01 atm ou 7.6 torr.



a) - Bomba de piston que comprime e expele o gás. B) - Bomba de diafragma comprimindo e expelindo o gás, devido ao movimento do eixo fora de centro.

As bombas de piston não são muito utilizados em processos de microeletrônica.

As bombas mais comuns utilizadas nas regiões de baixo e médio vácuo são as bombas mecânicas de palhetas rotativas, mostrada na figura abaixo.

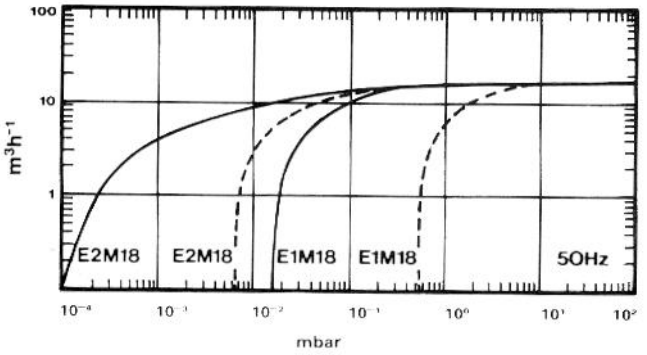


Bombas Rotativas de Palheta

Neste tipo de bomba, um rotor excêntrico com palhetas gira no interior de uma cavidade também cilíndrica (estator). O rotor é movimentado por um motor elétrico e seu eixo é paralelo ao eixo de simetria do estator na parte superior. Ele encosta bem justo no estator, com uma pequena folga da ordem de 0.001 cm, de forma para fazer a vedação entre a entrada e a saída da bomba. O rotor gira na direção que mostra a flecha. Durante o movimento, as palhetas ficam permanentemente em contato com a superfície interna do estator, devido as molas que existem entre elas dentro do canal do rotor, no qual estas estão encaixadas.

O óleo é usado para selar as palhetas e auxiliar na sua lubrificação. O óleo auxilia também no resfriamento da bomba, dissipando o calor gerado pela fricção e compressão do gás.

Um dos **problemas associados** com as bombas do tipo compressão é a condensação de vapores. Quando o gás é comprimido, se a pressão parcial de vapor dos gases for maior do que a pressão de vapor do correspondente liquido na temperatura do gás, poderá condensar formando gotículas de vapor condensado. Estas gotículas misturam com o óleo da bomba e podem causar a corrosão do mesmo. No caso da água por exemplo, como a pressão de vapor a temperatura ambiente é de 20 torr, se o gás é comprimido por um fator de 10^4, a água se condensará se a pressão parcial da água na câmara for maior do que 2 mtorr. O problema é mais sério quando bombeamos gases corrosivos condensáveis como o Cl_2 e clorosilanas. A formação de vapores condensáveis pode ser evitado utilizando um pequeno fluxo de gás inerte, N_2 na câmara da bomba(gás ballast). Porém, o uso do gás ballast limita a pressão final da bomba.

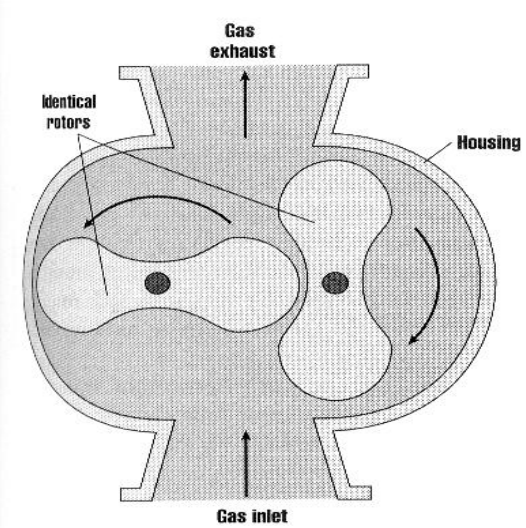


Curvas de velocidade de bombeamento vs. Pressão das bombas rotativas de um e dois estágios

A figura 14 mostra as curvas de velocidade de bombeamento em função da pressão para duas bombas rotativas de palhetas com um e dois estágios. O eixo horizontal refere-se a pressão na entrada da bomba. A linha cheia refere-se a bomba sem o gás ballast e linha tracejada com o gás ballast. A velocidade de bombeamento é aproximadamente constante numa ampla faixa de pressão. Note-se que o uso do gás ballast aumenta a pressão final alcançada pela bomba. O intervalo de pressão mostrado na figura é típico para bombas rotativas de palhetas.

A curva de velocidade de bombeamento em função da pressão é em geral o primeiro dado que se examina quando se considera uma bomba para uma dada aplicação. A velocidade de bombeamento nominal é definida como velocidade correspondente ao máximo da curva. Para as curvas da figura 14, a velocidade nominal das bombas é de aproximadamente 18 m^3/h.

Nas bombas rotativas de palhetas a corrente molecular **Q** (torr.l/s) é aproximadamente proporcional a pressão de entrada da bomba. Para aumentar este parâmetro temos duas alternativas: usar uma bomba de capacidade maior ou usar uma segunda bomba entre a



câmara e a bomba rotativa. Em muitos casos a segunda opção é a escolha mais econômica. A bomba projetada para este propósito é a bomba Roots.

Figura 15 : Ilustração do principio de funcionamento da bomba rotativa Roots

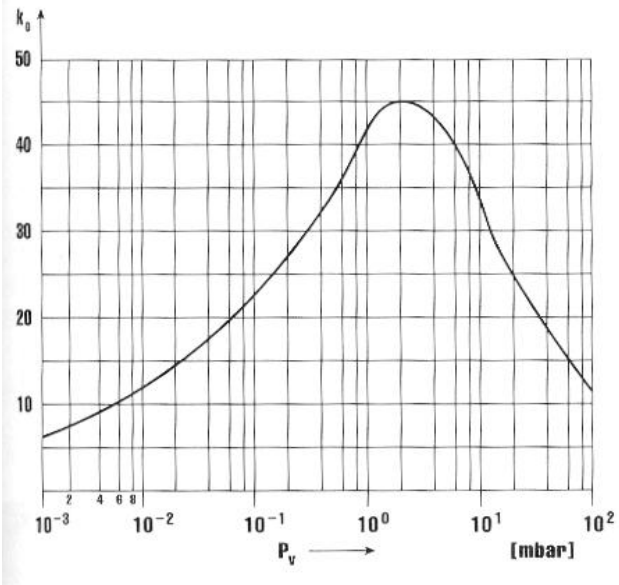


Figura 16 : Taxa de Compressão vs. pressão de entrada da bomba Roots

As bombas Roots são bombas de transferência com dois rotores em forma de 8, paralelos que giram sincronamente em sentidos opostos dentro de um estator, conforme mostrado na figura 15. Durante o movimento, um pequeno espaçamento constante menor que 0.1 mm é mantido em relação a cada um dos rotores e a superfície do estator. Como não há contato (selagem mecânica entre as superfícies), a taxa de compressão destas bombas é baixa sendo dependente da pressão, geralmente da ordem de 30:1, como mostra a figura 16. Mas como os rotores podem girar em altas velocidades (3000 - 3500 rpm) sem produção de calor devido ao atrito, favorece a produção de rápidos deslocamentos de gás, ou seja, altas velocidades de bombeamento para bombas de dimensões relativamente compactas. Como a Roots comprime o gás e compressão produz calor, há o aquecimento dos rotores e estator. Se este calor for excessivo, pode ocorrer, devido a expansão térmica, contato entre os rotores, danificando a bomba. Devido a isso, as bombas Roots são usualmente operadas em série com as bombas rotativas que tenham aproximadamente 1/10 da velocidade das Roots.

Bombas Difusoras

As bombas para a região de alto vácuo utilizadas nos processos de fabricação de microeletrônica pertencem a duas categorias: as bombas que bombeam o gás por transferência de momentum para as moléculas gasosas e as bombas por aprisionamento das moléculas gasosas. Dentre estes, as bombas da primeira categoria têm sido preferidos para o bombeamento de gases corrosivos e/ou tóxicos, ou quando bombeamos elevados fluxos de gases. Enquanto que os de aprisionamento são empregados para o bombeamento de fluxos pequenos de gases inertes ou quando bombeamos a câmara para o pré-processamento. Os dois tipos de bombas mais populares de transferência de momentum, são as bombas de difusão e as bombas turbomoleculares.

.

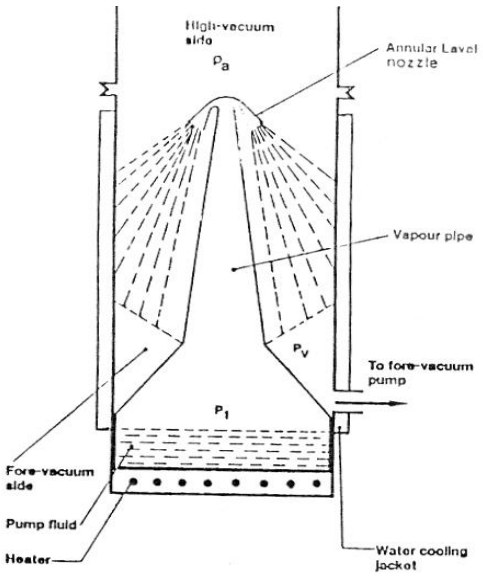


Figura 17 : Diagrama esquemático do princípio de funcionamento da bomba difusora

As bombas difusoras são simples e robustas

A figura 17 ilustra o principio de funcionamento de uma bomba difusora. Um aquecedor elétrico ajustado na base do corpo da bomba, aquece o fluído (óleo) a uma temperatura tal que

ocorra a formação de vapor. O vapor de óleo sobe pelo tubo de vapor e é ejetado através de uma abertura anular estreita no topo do tubo, em direção à parte inferior da bomba. Devido a uma diferença de pressão relativamente grande entre as regiões interna e externa do tubo, o jato de vapor é ejetado a uma velocidade muito alta (supersônica). Estes vapores colidem com as paredes refrigeradas da bomba, que condensam e escorrem de volta para o reservatório de fluído. Os gases são bombeados pela transferência de momentum entre o jato de vapor e as moléculas do gás, mas estas também podem ser transportadas diluídas no vapor. Como as moléculas do fluído tem peso elevado, elas transferem eficientemente momentum às moléculas do gás a ser bombeado, impulsionando-as para a parte de baixo, onde existe a saída conectada a uma bomba de apoio. Como em outros tipos de bombas, as bombas de difusão, necessitam de uma bomba de apoio para operar, geralmente uma bomba rotativa de palhetas.

As bombas difusoras possibilitam obter taxas de compressão da ordem de 10^8. Estas bombas têm uma velocidade de bombeamento bastante elevada se a pressão de entrada estiver em regime de fluxo molecular.

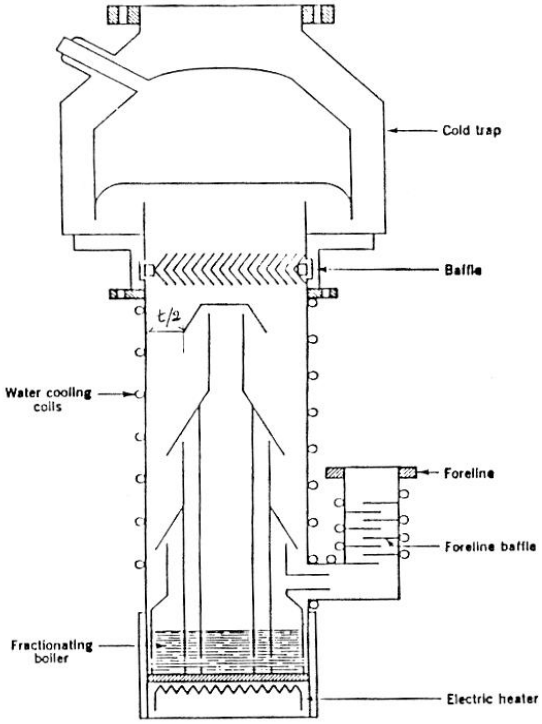


Figura 17 : Bomba difusora de múltiplo estágio com armadilha(trap) na parte superior

A grande maioria das bombas de difusão empregadas tem várias aberturas de ejeção de fluído e são chamadas de bombas multiestágio. A figura 17 ilustra uma bomba com três estágios(ejetores) e alguns acessórios. A câmara a ser bombeada é conectada no flange superior e a bomba de apoio é acoplada no flange inferior(foreline). Um problema inerente as bombas de difusoras é a perda de fluído cujo vapor se difunde para fora da bomba. A perda através do tubo de saída pode ser diminuída usando série de placas refrigeradas(baffle), que re-condensam o fluído, devolvendo-o ao reservatório. A perda através do topo da bomba pode ter conseqüências mais sérias uma vez que o vapor de óleo pode migrar para o sistema de vácuo(backstream), contaminando a câmara de vácuo e o processo de fabricação. Este problema pode ser evitado em grande parte pela utilização de um dispositivo chamado de "armadilhas" (traps), com superfícies frias muito eficientes para reter o vapor de fluído. A primeira dessas armadilhas(baffle) é projetada de tal forma que as moléculas de gás ou vapor não atravesse sem colidir pelo menos uma vez com a superfície da placa. As moléculas de

vapor que cruzam esta armadilha, terão chance de serem capturadas na segunda armadilha(cold trap) resfriada à baixa temperatura, com nitrogênio líquido.

Bombas Turbomoleculares

A bomba turbomolecular é uma bomba do tipo compressão que funciona de forma similar a bomba difusora. A diferença é de que ao em vez da transferência de momentum por colisões com jato de vapor ejetado a alta velocidade, no caso da bomba turbomolecular, o momentum é transferido por impacto das moléculas com as palhetas que giram em alta velocidade. Uma bomba turbomolecular moderna, conforme mostrada na figura 18a, apresenta uma estrutura semelhante a uma turbina de avião a jato. Vários sistemas de palhetas são presos a um mesmo eixo impulsionado por um motor de alta rotação (rotor). Este sistema movimenta a uma velocidade extremamente alta, maior do que 20 000 rpm. Um outro sistema de palhetas está preso à carcaça da bomba (estator). O espaçamento entre o estator(palhetas fixas) e rotor(palhetas móveis) é da ordem de 1 mm.

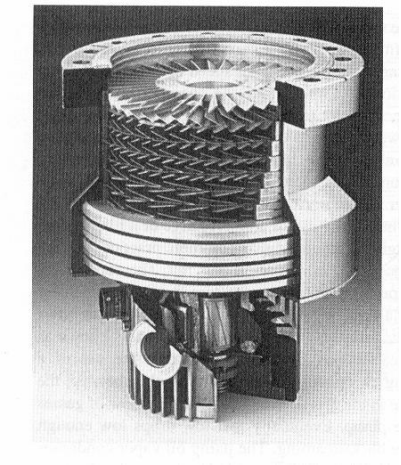


Figura 18a : Ilustração de uma bomba turbo molecular - Corte longitudinal.

As bombas turbomoleculares sempre necessitam de uma bomba de apoio, geralmente uma bomba rotativa de palhetas, que é conectado no lado da alta pressão, visto que a pressão de saída deve ser mantida a baixa pressão. Como a transferência de momentum depende da massa da molécula gasosa, a taxa de compressão também depende do gás a ser bombeado. A taxa de compressão das bombas turbomoleculares podem chegar a 10^9. A figura 18b mostra o comportamento da velocidade de bombeamento e da taxa de compressão de uma bomba turbomolecular típica, em função da pressão de entrada, para vários gases. Uma bomba típica que tenha taxa de compressão de 10^9 para N_2, terá uma taxa de compressão de 10^3 para H_2.

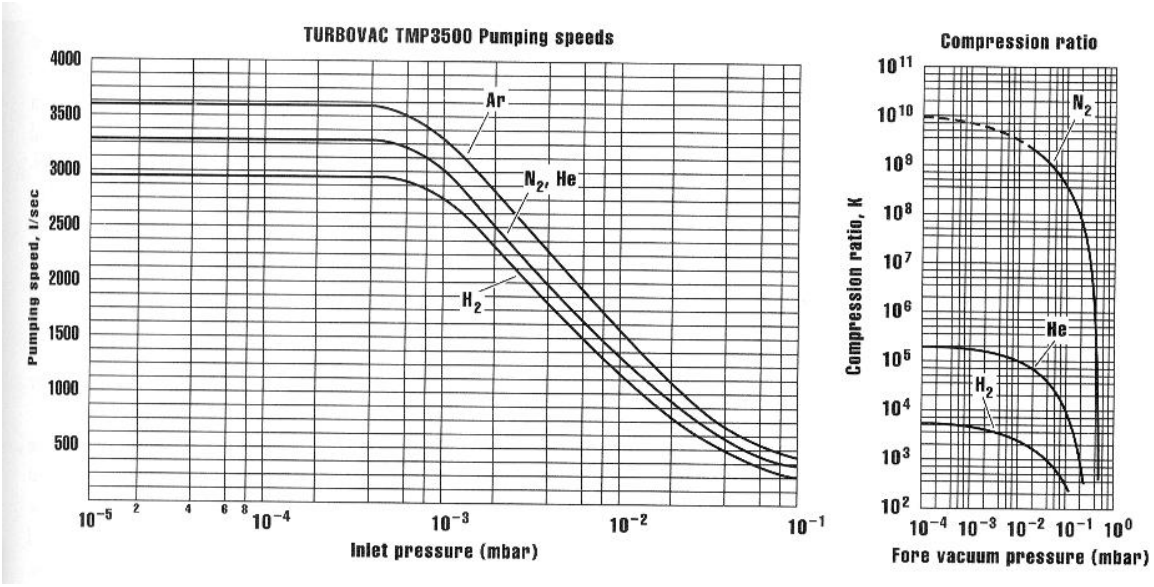


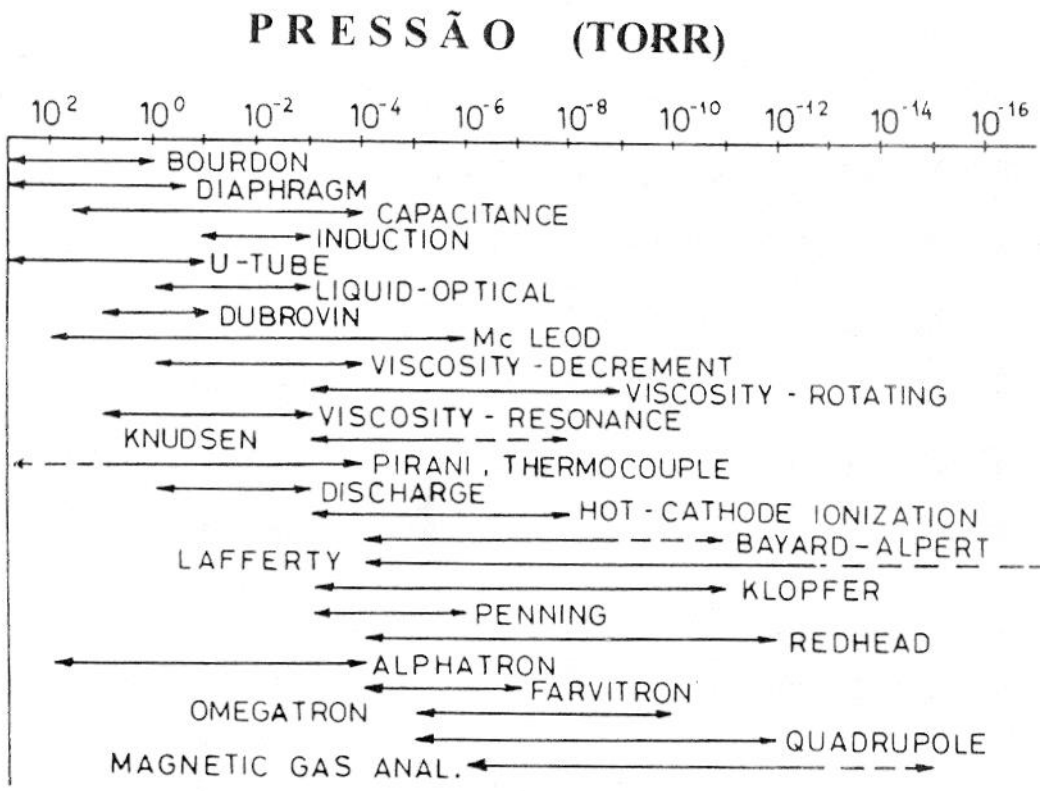
Figura 18b : Velocidade de bombeamento e taxa de compressão de uma bomba turbomolecular típica em função da pressão de entrada

Medidores de Pressão

Região da tecnologia de vácuo: estende a cerca de 19 ordens de grandezas abaixo da pressão atmosférica, isto é, aproximadamente 10^{-16} torr.

Não existe medidores para medir intervalos tão grandes.

Na prática, existem vários medidores para diferentes regiões. Conforme mostra a figura abaixo, cada tipo de medidor é sensível a variação de pressão numa região específica.

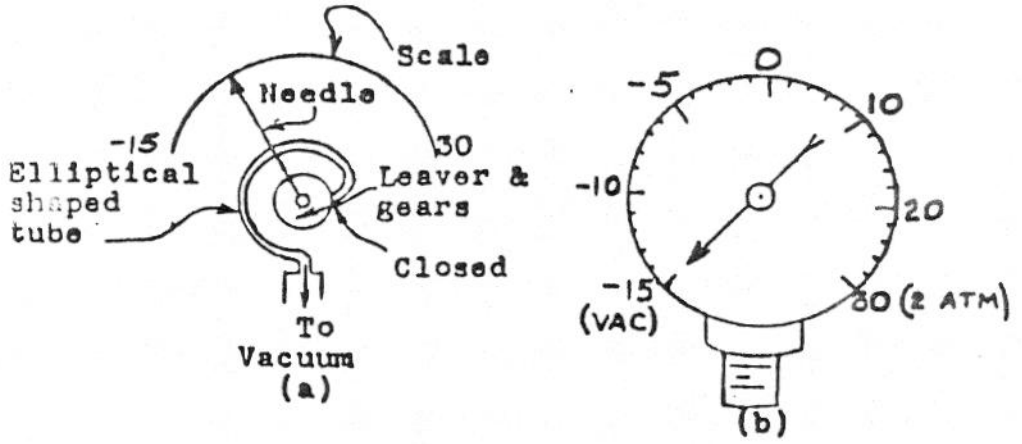


Região de pressão dos medidores de vácuo

Quando vamos escolher um medidor para um determinado propósito devemos levar em consideração:

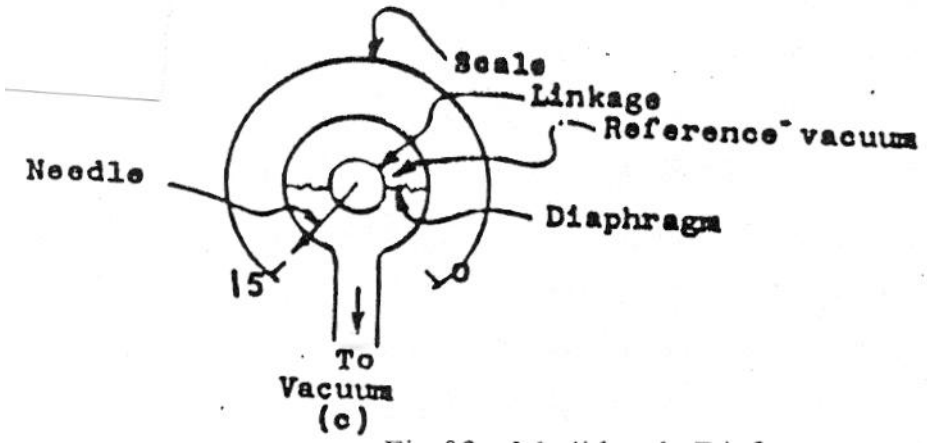
- a região de pressão para o qual o medidor é desejado;
- se queremos medir a pressão total ou parcial;
- se a leitura do medidor pode ser dependente do tipo de gás ou não;
- a precisão da medida desejada e tipo de montagem.

Medidores Bordon



Medidor Bordon

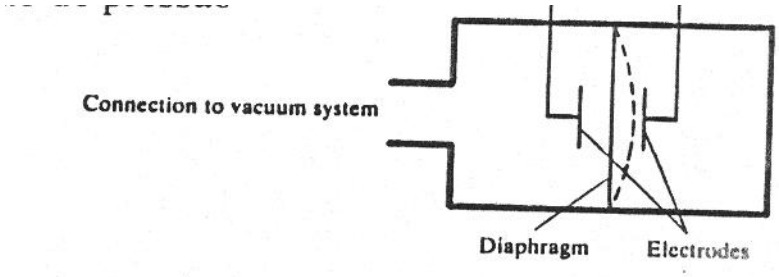
O medidor Bordon consiste basicamente de um tubo flexível recurvado. Uma das extremidades do tubo é ligada ao sistema de vácuo e a outra é selada. Quando há uma mudança de pressão no interior do tubo, a sua curvatura se modifica, o que causa uma mudança da indicação do ponteiro.



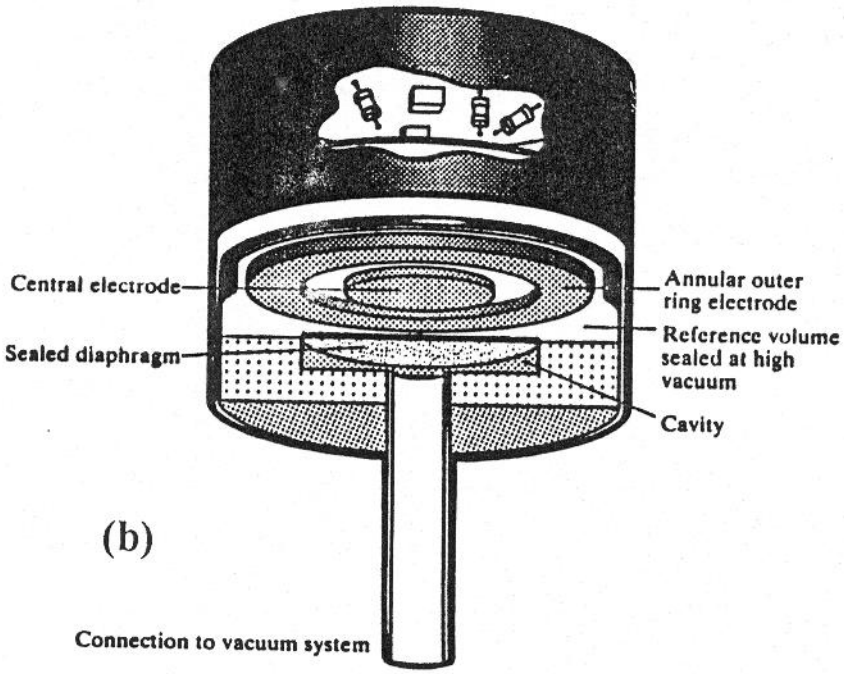
Medidor de Diafragma

Principio: a pressão causa uma deformação no diafragma.
O movimento de deformação do diafragma, desloca o ponteiro que se move sobre uma escala calibrada.
As escalas dos medidores Bordon e Diafragma independem do gás. São calibrados nos intervalos de 0 - 25; 0 - 50; 0 - 125 e 0 - 1000 mbar. Precisão : ±5%.

Medidores de Membrana Capacitiva - Baratron



(a) Double-sided symmetrical configuration



Medidor de Membrana Capacitiva (Barocel)

Um medidor de membrana consiste basicamente de uma placa sensora (um lado de um capacitor plano) isolada do meio por uma membrana sensível.

A variação de pressão exercida pelo meio na membrana, provoca uma deflexão desta em relação à placa sensora.

Se mantermos o dielétrico constante, teremos uma variação da capacitância proporcional à pressão exercida sobre a membrana.

O circuito eletrônico básico usado para a medida da variação da capacitância, é um oscilador "LC" onde um dos capacitores é o próprio elemento sensor. Assim, pela variação da capacitância deste, teremos uma variação da freqüência do oscilador, que é convertida em tensão.

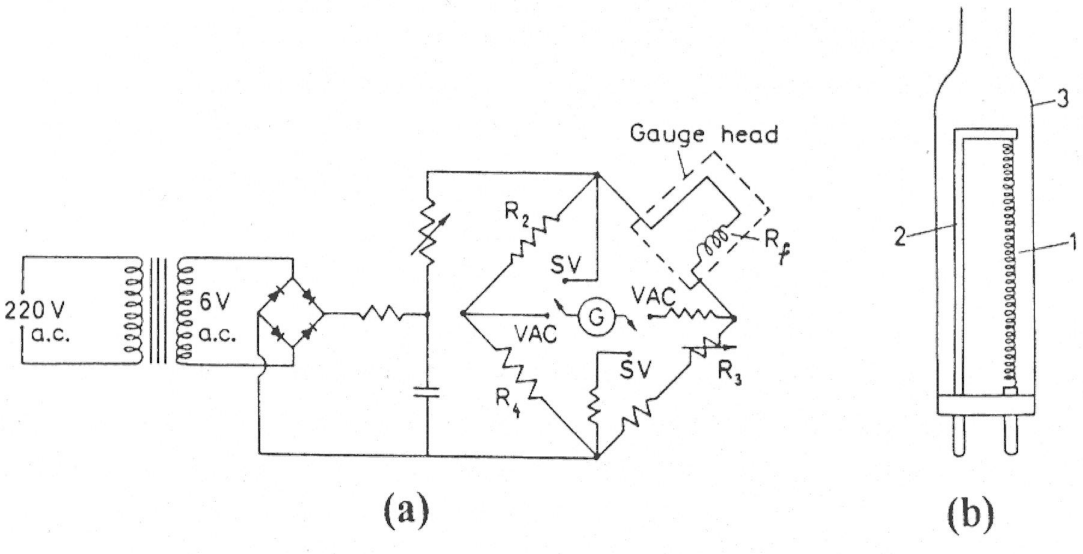
O medidor mede desde a pressão atmosférica até 10^{-6} mbar, com a precisão de 0.05 - 3 %.

Vantagens: robustez, vida útil longa, maior sensibilidade, maior faixa de operação, e pode ser utilizado em temperaturas elevadas e em ambientes altamente corrosivos.

Medidor de Condutividade Térmica (Pirani)

O principio de funcionamento de um medidor de vácuo tipo Pirani é o da condutividade térmica dos gases.

Um filamento é aquecido por uma corrente elétrica na atmosfera do gás cuja pressão se quer medir. Devido a presença do gás, o filamento irá dissipar energia térmica por condução. A dissipação será tanto maior quanto maior for a pressão. Consequentemente, a temperatura do filamento é uma função da pressão ($\Delta T \alpha P$), decrescendo monotonicamente com a mesma.



a) circuito para o medidor Pirani; b) cabeça do medidor; (1) filamento; (2) suporte do filamento; (3) capa (envelope)

O sensor de um medidor Pirani consiste de um tubo contendo o filamento e se acopla ao sistema de vácuo.

No esquema do circuito elétrico de medição associado ao sensor, o filamento R_f constitui um dos braços da ponte de Wheatstone. Os outros braços são R_2, R_3 e R_4.

R_2 é um resistor idêntico a R_f encapsulado a vácuo dentro de um tubo de vidro. Esse tubo é colocado em posição adjacente a R_f de modo a compensar flutuações de voltagem na ponte devida as variações de temperatura na região onde se instala o sensor. R_3 e R_4 são resistores variáveis.

Uma maneira de se medir R_f (e consequentemente determinar P, quando se conhece a curva de calibração), é ajustar os valores de R_3 e R_4 de modo a zerar a corrente do galvanômetro G. Nesse caso:

$$\mathbf{R_f = R_2 \times R_3/R_4}$$

Como a condutividade térmica varia conforme o gás, implica em curvas de calibração distintas para diferentes gases.

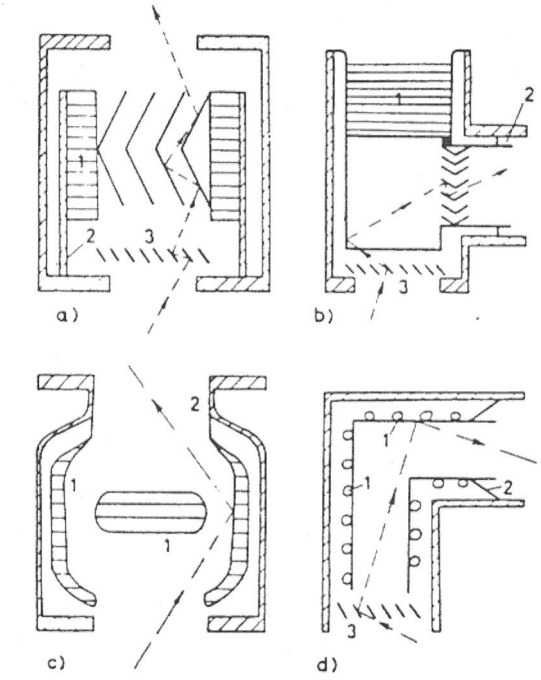
Quanto menor for a condutividade térmica de um gás, menor será a temperatura do filamento para um mesmo valor de P.

De um modo geral a escala de um medidor Pirani é calibrada para nitrogênio. A curva de calibração de um medidor Pirani não é PxT, mas P em função da resistência elétrica R do filamento.

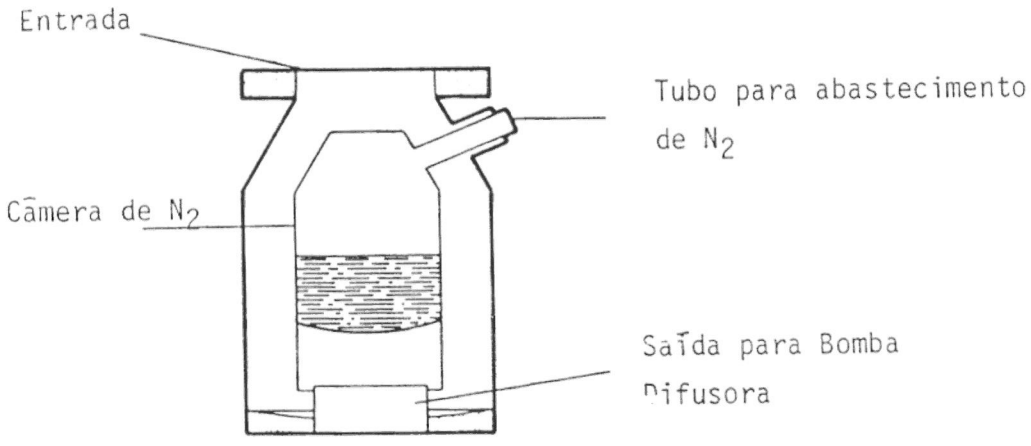
Esses dois gráficos são na realidade equivalentes, uma vez que a resistência elétrica de um condutor é uma função da sua temperatura.

Componentes e Acessórios de Sistemas de Vácuo

Armadilhas(traps)

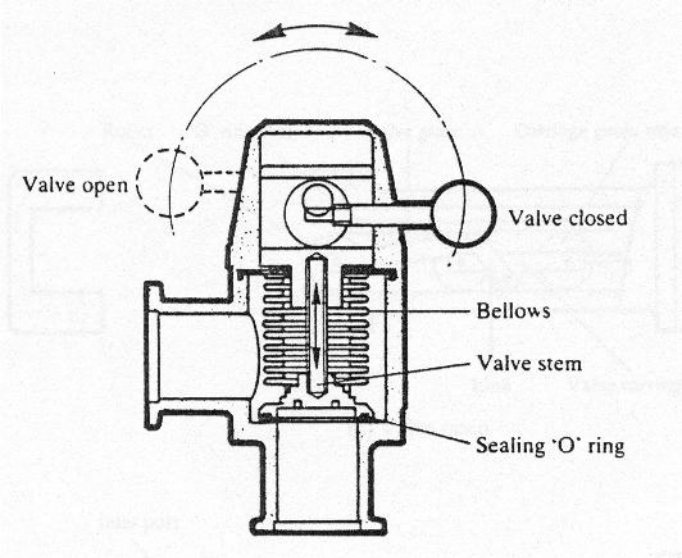


Armadilha de nitrogênio líquido. (1) - nitrogênio líquido; (2) - local de gradiente térmico; (3) - anteparo(baffle) refrigerado a água

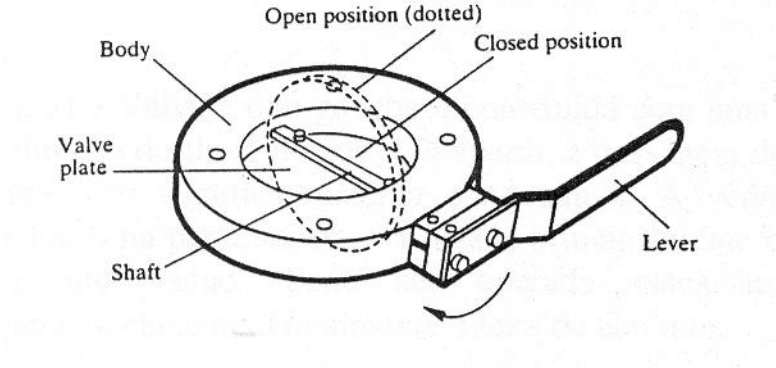


Seção transversal de uma armadilha de nitrogênio (trap)

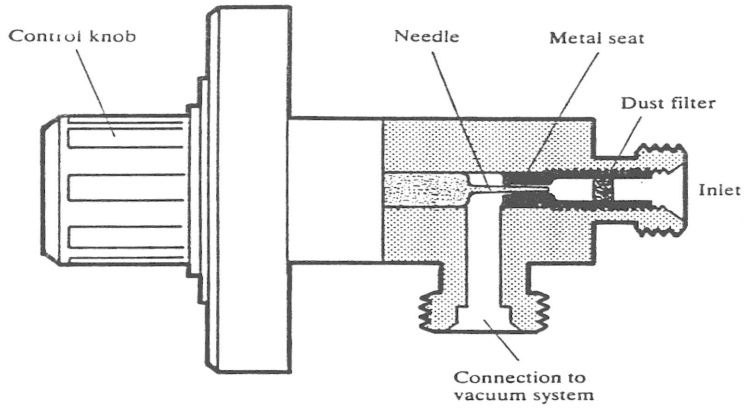
Válvulas



Válvula de Isolação tipo fole



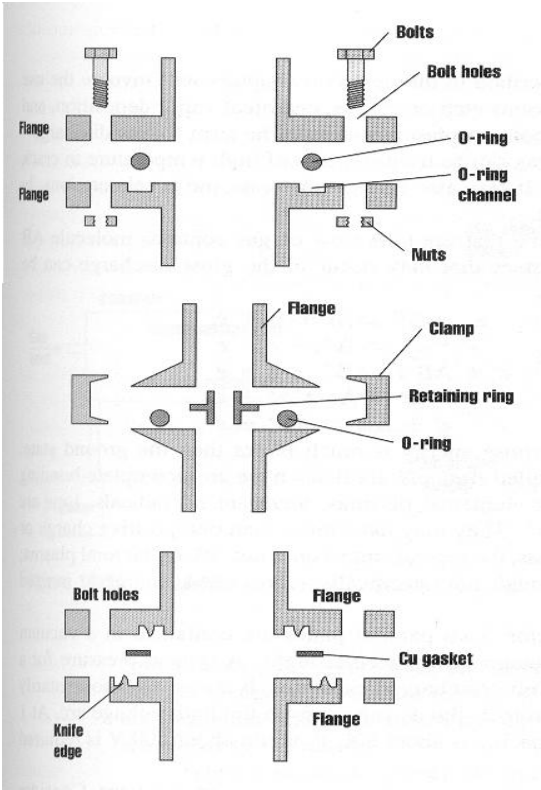
Válvula tipo borboleta (1/4 de volta)



Válvula agulha para controle de entrada de gás na câmara

Flanges, Anéis de Vedação, Selagem e Ligação de componentes

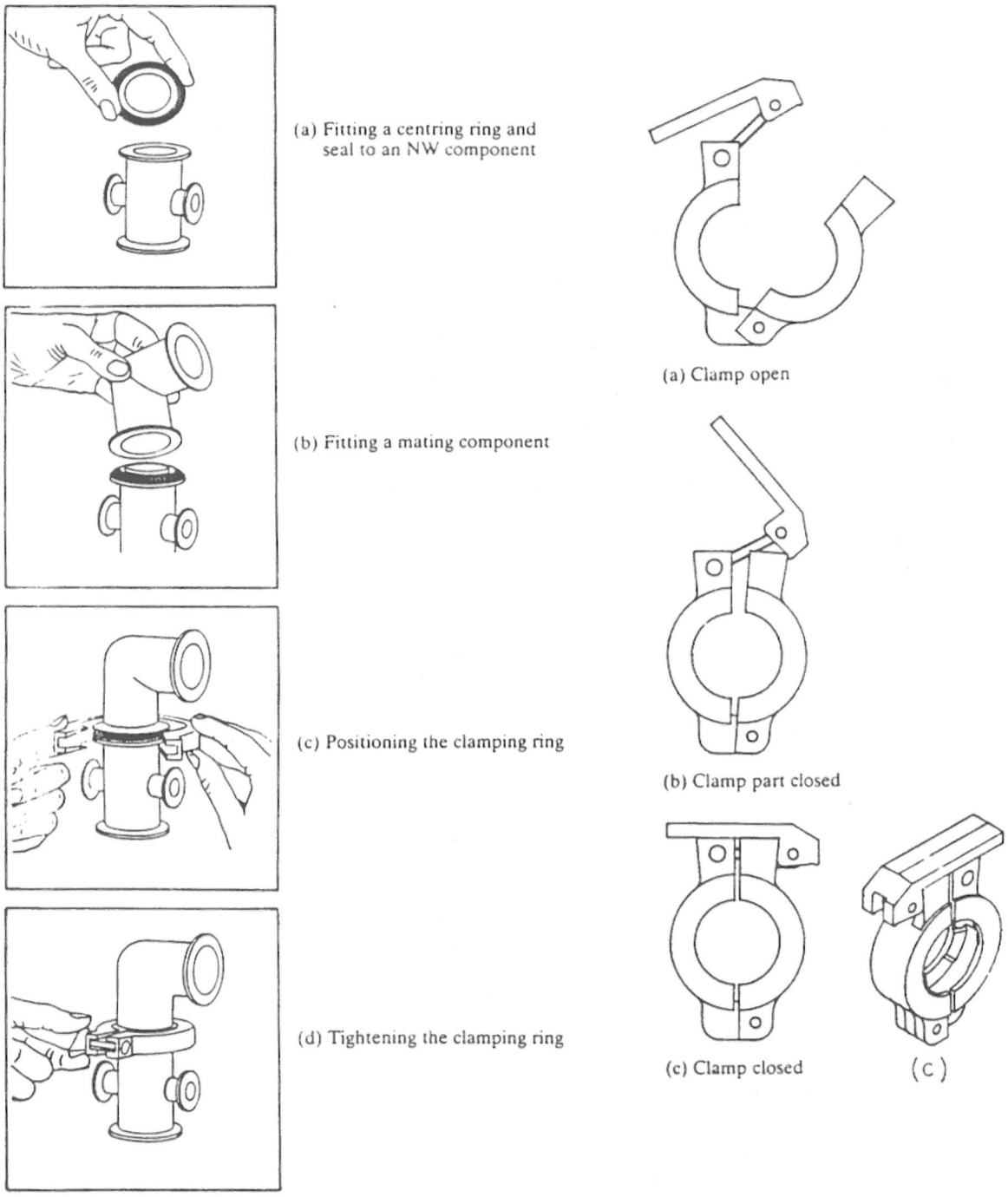
Componentes diversos de vácuo



Dois tipos de selagem com o'ring para vácuo médio e flange Conflat para selagem de sistemas auto vácuo

O'rings de viton - usado para vedação até alto vácuo. P > 10^{-7} torr apresenta vazamentos.

Flange "conflat" com anel de Cu e CuAg, usado para alto e ultra alto vácuo.



Ligação de duas componentes tubular e grampo tipo dobradiça em vários estágios de funcionamento