

INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA DE VÁCUO



F-640 – 2S2026

Prof. Pascoal Pagliuso

DEQ-GPOMS Ramal 15501

pagliuso@unicamp.br



Vácuo?

➤ Definição técnica de vácuo:

São as pressões que estão abaixo da pressão atmosférica local.

P_{atm} = pressão atmosférica = 1atm

1 atm = $1,01325 \times 10^5$ Pa = 1,01325 bar

1 atm = 760 mmHg (milímetro de mercúrio)

1 atm = 760 Torr

30 PSI ~ 2 bar

1mbar = 0,75 Torr (baixo vácuo ou vácuo primário)

Alto Vácuo - $< \sim 10^{-3}$ torr

Ultra-alto vácuo - , $< \sim 10^{-9}$ torr

Para que serve?

- Existem inúmeros exemplos da realização processos industriais, pesquisas em tecnologia e em ciência básica que são realizados em baixas pressões.
- Há também os processos nos quais removemos os gases ativos, por meio da realização do vácuo e, posteriormente, introduzimos um gás inerte recuperando total ou parcial a pressão atmosférica.

Para que serve? Indústria:

- Remover os gases ativos presentes na câmara de vácuo → Os gases e vapores ativos são prejudiciais ou inconvenientes nos processos industriais.
- Diminuir a transferência de calor por condução e por convecção entre o meio interno e o meio externo à câmara de vácuo.
- Conseguir deformações mecânicas, movimentos, levantamento e/ou sustentação de peças por meio de diferenças de pressão.
- Atingir densidades gasosas para conseguir colunas de gases ionizados, plasmas frios ou plasmas de altas temperaturas.

Para que serve? Ciência:

- Aumentar o trajeto ou caminho livre de partículas elementares, átomos, elétrons, íons e moléculas para que não colidam com as moléculas da atmosfera da câmara de vácuo → **por exemplo: aceleradores**
- Remover vapores ou gases absorvidos em materiais líquidos ou sólidos.
- Obter superfícies limpas e degaseificadas.
- evitar oxidação da superfície, crescimento de filmes, física de superfícies, ...

O que acontece quando variamos a pressão:

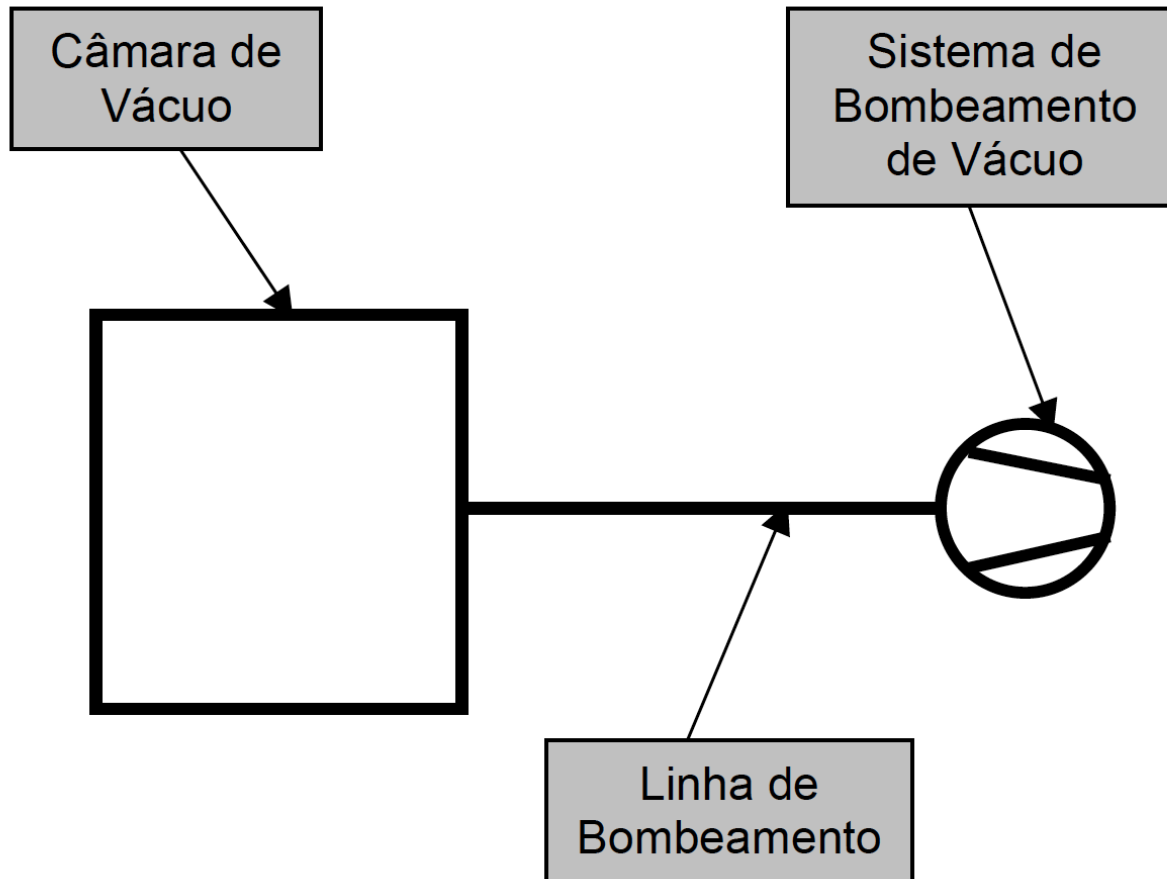
→ As seguintes grandezas físicas podem ser afetadas pela pressão:

- a densidade do gás;
- o livre caminho livre médio;
- o tempo de formação de uma camada de moléculas em uma superfície;
- fluxo de moléculas incidindo em uma superfície;
- Temperatura do gás

Projetar um sistema de vácuo

- Pressão final a ser atingida e pressão de trabalho.
- Características marcantes do processo em questão, como por exemplo se haverá gases corrosivos ou explosivos.
- Identificação do regime de escoamento dos gases e vapores.
- Cálculo das condutâncias e velocidade efetiva de bombeamento.
- Escolha das bombas de vácuo, dos sensores de pressão e dos componentes auxiliares.
- Processos de limpeza e condicionamento do sistema de vácuo.

Configuração genérica de um sistema



O que iremos estudar ao longo do semestre:

→ Teoria de gases rarefeitos:

- Equação de estado de gases ideais
- Equação de estado de gases reais → Cálculos cinético da energia das moléculas, da pressão, etc...
- Livre caminho médio

→ Escoamento de gases:

- Viscosidade do gás
- Condutância
- Velocidade de escoamento, etc...

O que iremos estudar ao longo do semestre:

- Acessórios de vácuo;
- Bombas de vácuo;
- Medidores de vácuo;
- Cuidados e limpeza quando trabalhamos com câmeras de vácuo;

Bombas de vácuo

De um modo geral, as bombas de vácuo podem ser classificadas como:

- ***bombas de transferência (ou deslocamento) de gás***, que retiram os gases de uma região de um sistema de vácuo, transferindo-os para outras, ou para a atmosfera → mecânica, difusora, turbomolecular;
- ***bombas de captura (ou fixação)***, que retém os gases dentro da própria bomba → iônica, criogênica;

Bombas de vácuo

Detalhes essenciais numa bomba de vácuo

Velocidade de bombeamento, S – por definição é a velocidade de bombeamento na entrada –ou boca - da bomba.

Curva característica da velocidade de bombeamento – é a curva $S \times P$, sendo P a pressão na boca da bomba.

Pressão mínima – é a menor pressão que se pode atingir com uma particular bomba.

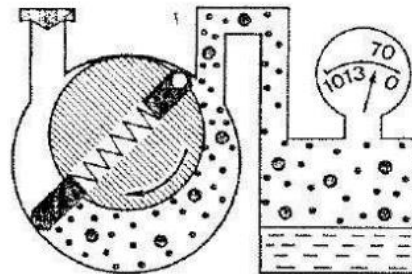
Qualidade do vácuo produzido – é a propriedade que tem uma bomba de não contaminar o sistema de vácuo com vapores indesejáveis (geralmente óleo) da própria bomba.

Bombas de vácuo

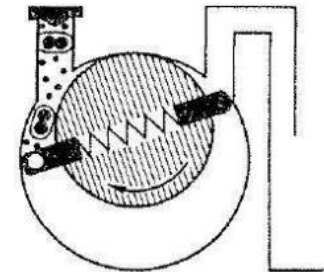


Bomba Rotativa de Palhetas

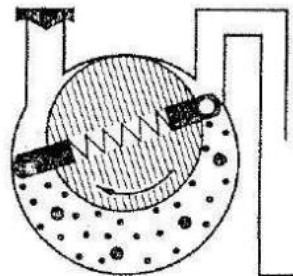
without gas ballast



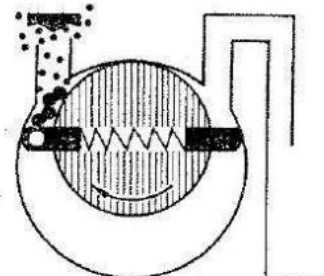
A₁



A₃



A₂



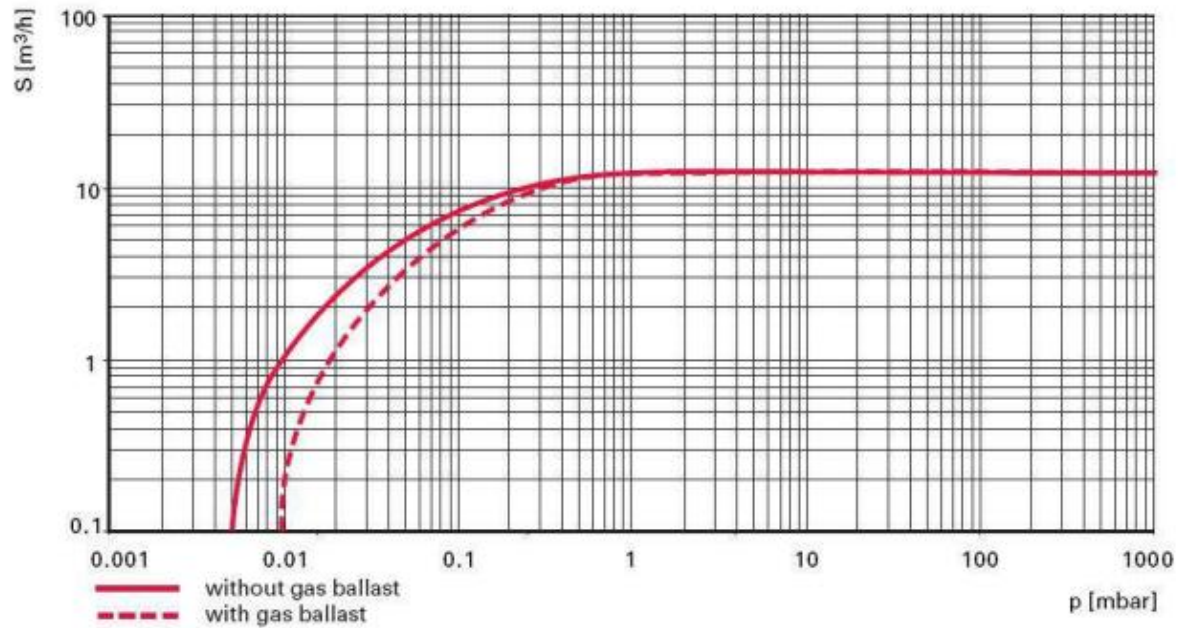
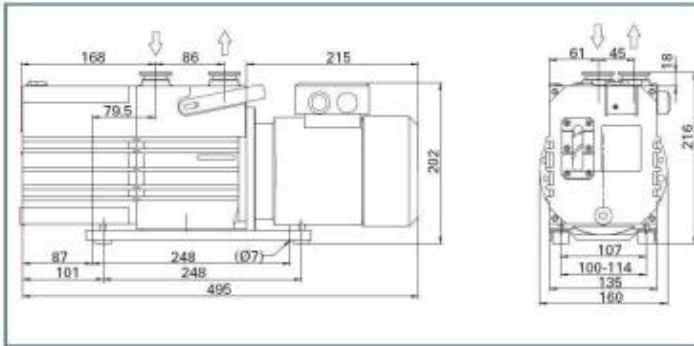
A₄

• vapour particle

• gas particle

Bombas de vacío

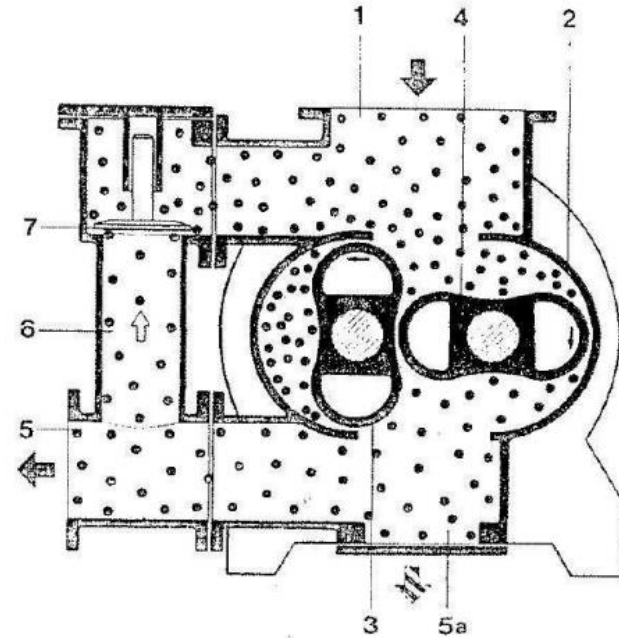
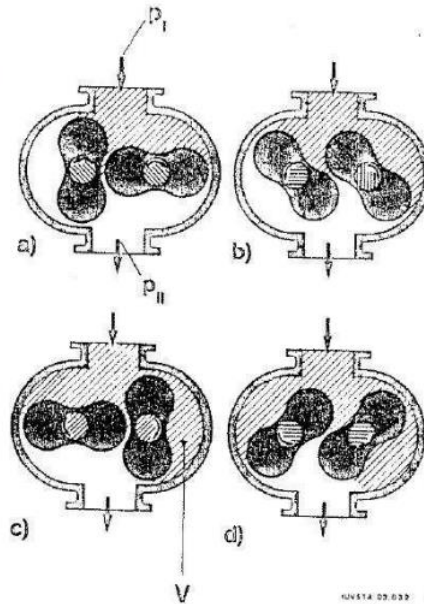
Dimensions



Bombas de vácuo



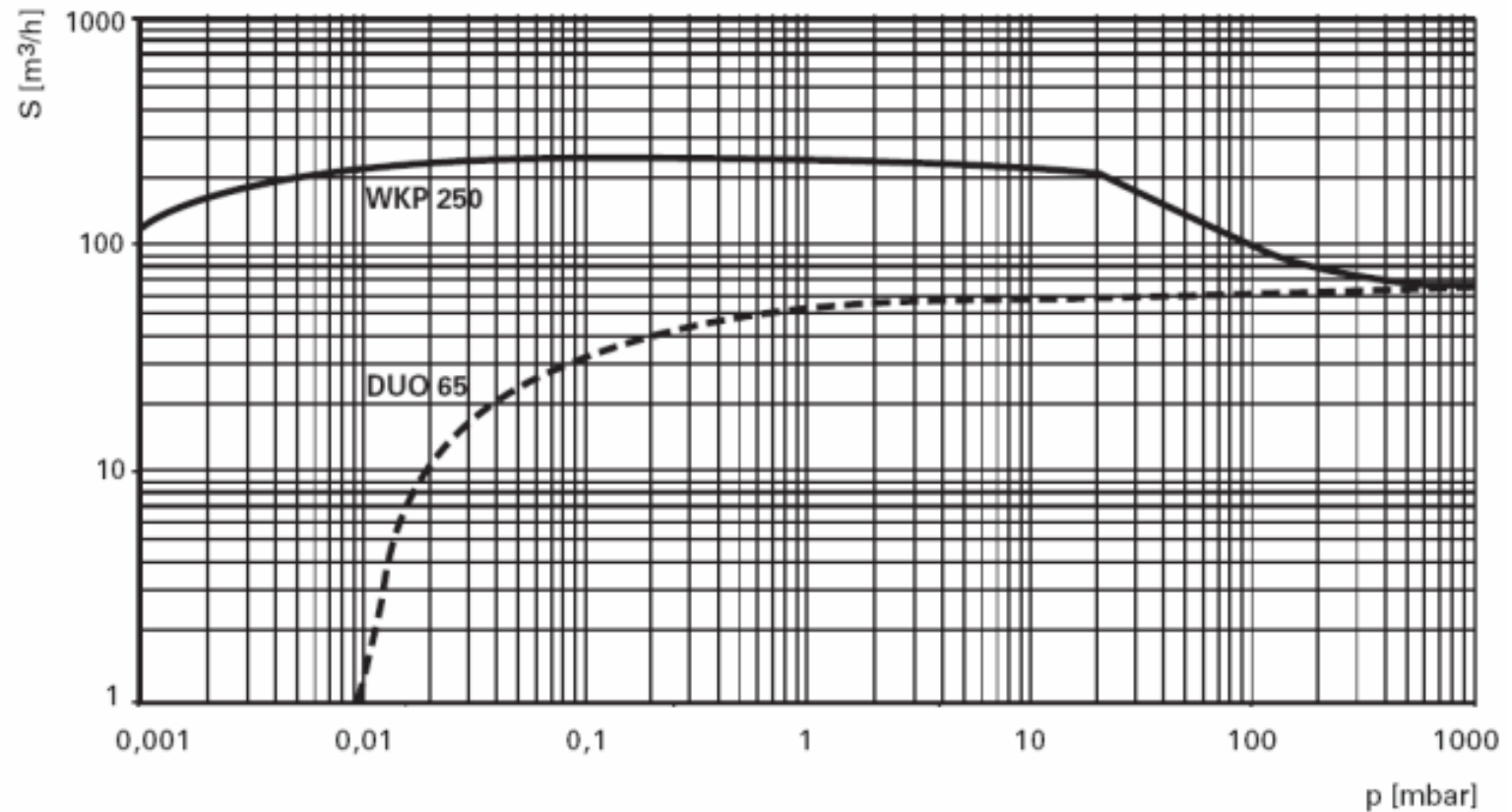
Bomba Roots



Bombas de vácuo



Bomba Roots



Bombas de vácuo

Bomba de Diafragma

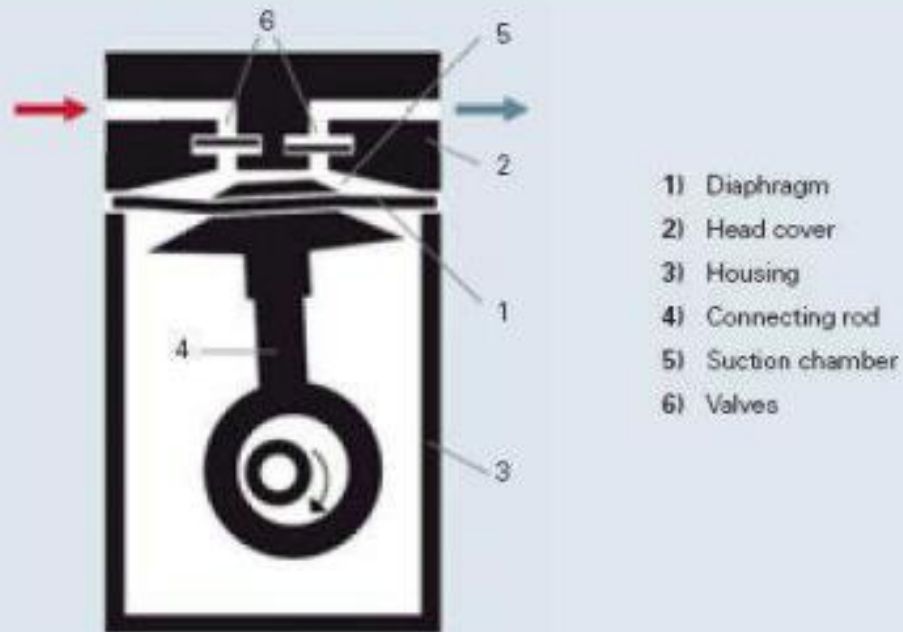


Figure 2.5: Operating principle of a diaphragm pump

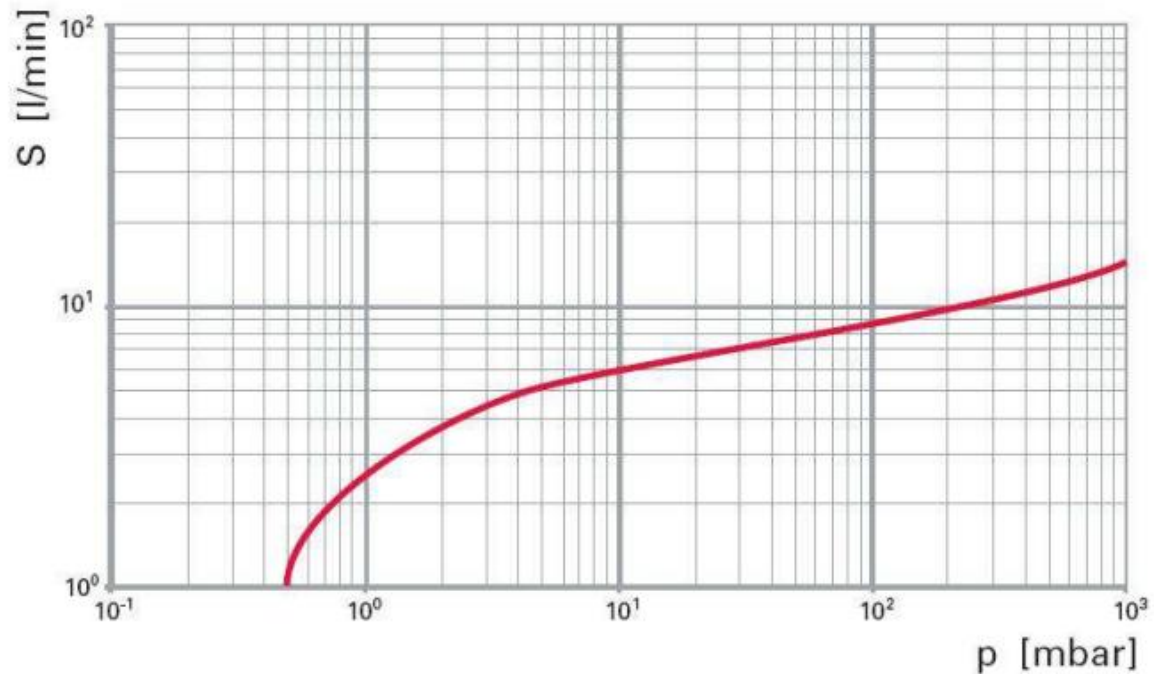
Bombas de vácuo

MVP 015



Bomba de Diafragma

MVP 015-4 (60 Hz)



Bombas de vácuo

Bomba de Pistão

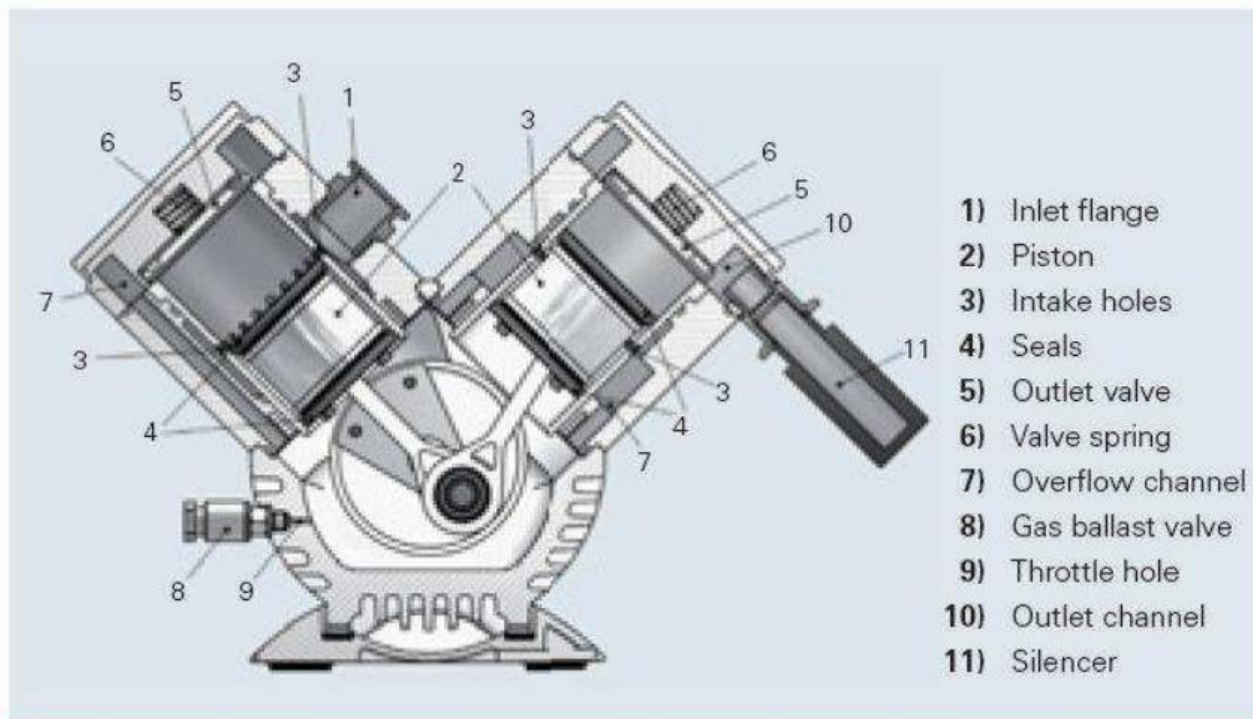


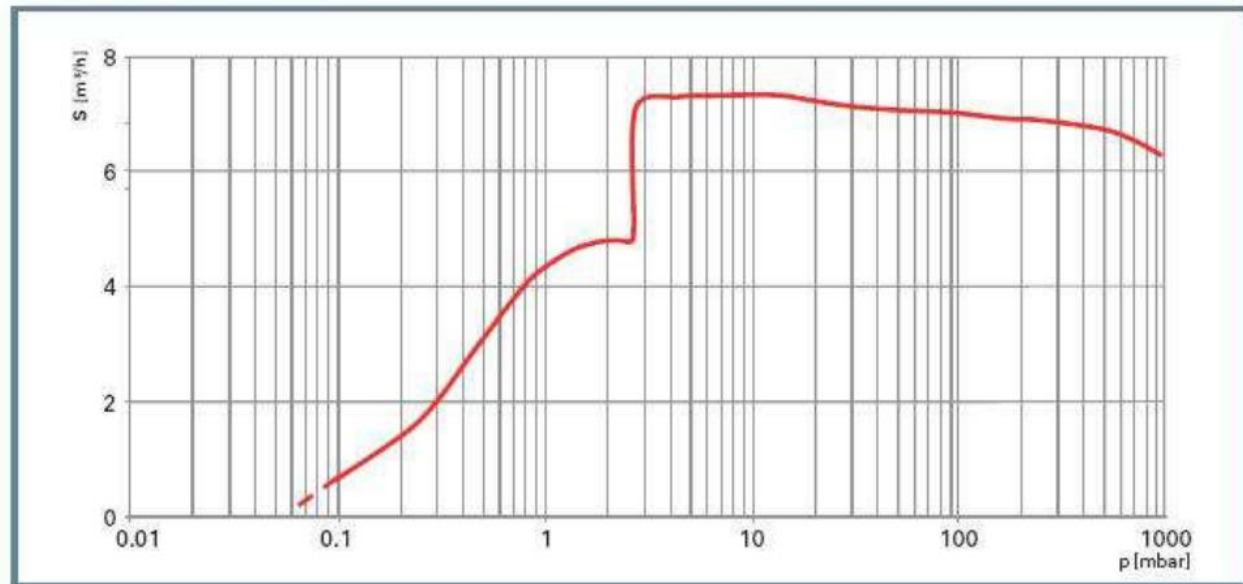
Figure 2.7: Operating principle of a piston pump

Bombas de vácuo



Bomba de Pistão

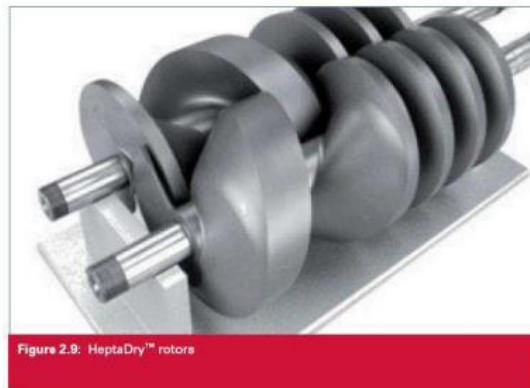
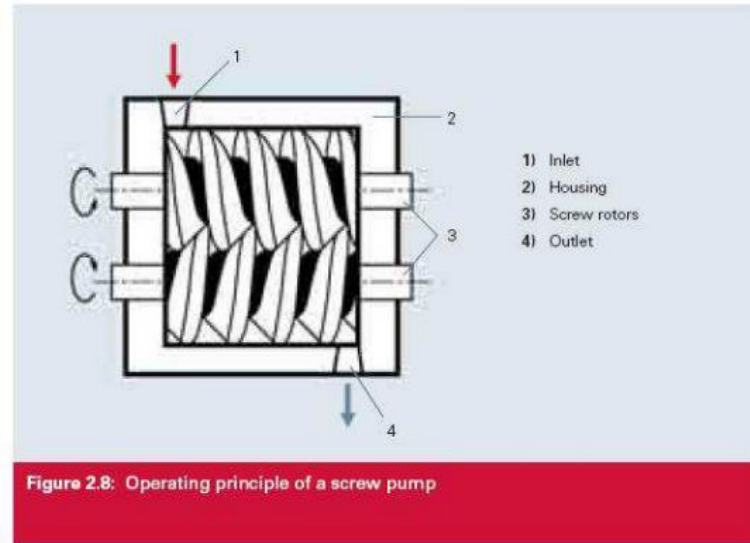
Pumping speed



XtraDry™ 150-2

Bombas de vácuo

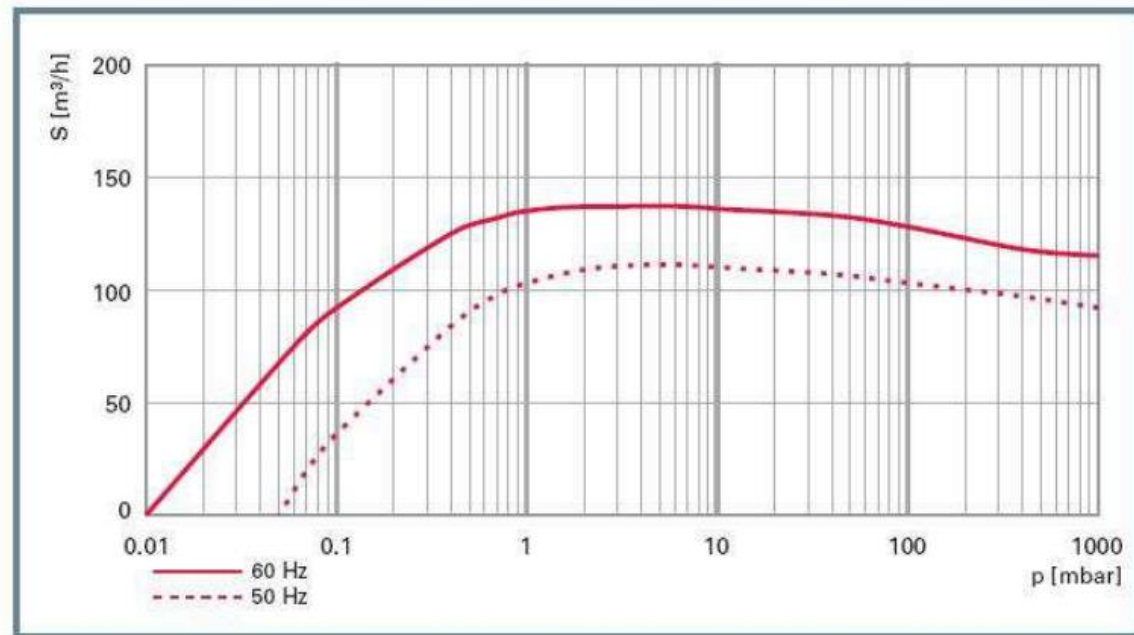
Bomba de Parafuso



Bombas de vácuo



Bomba de Parafuso

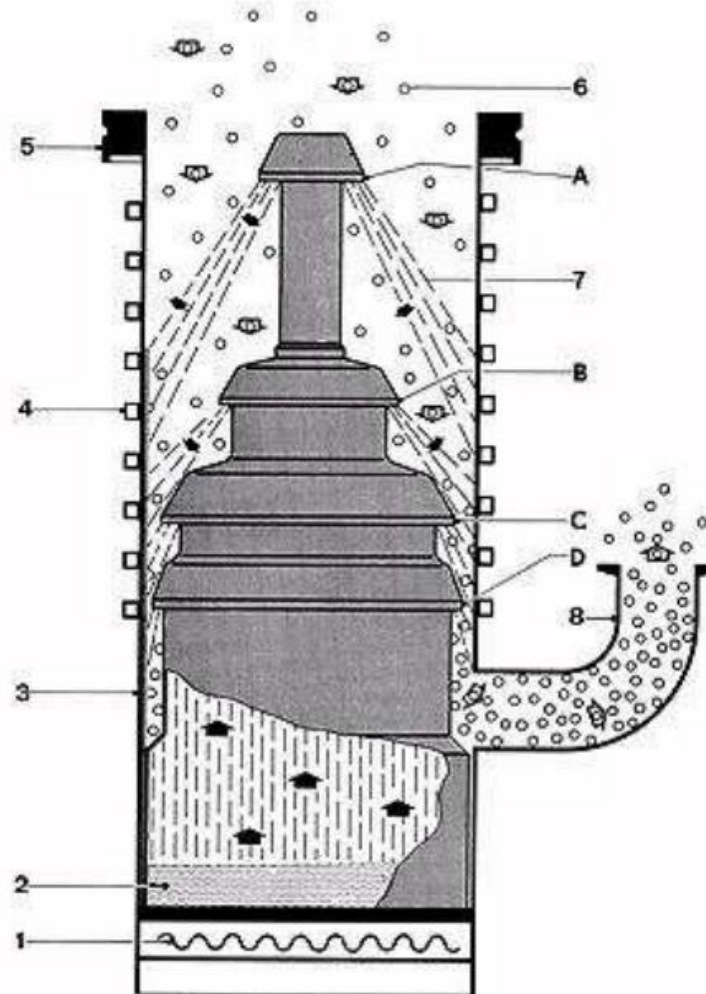


Bombas de vácuo

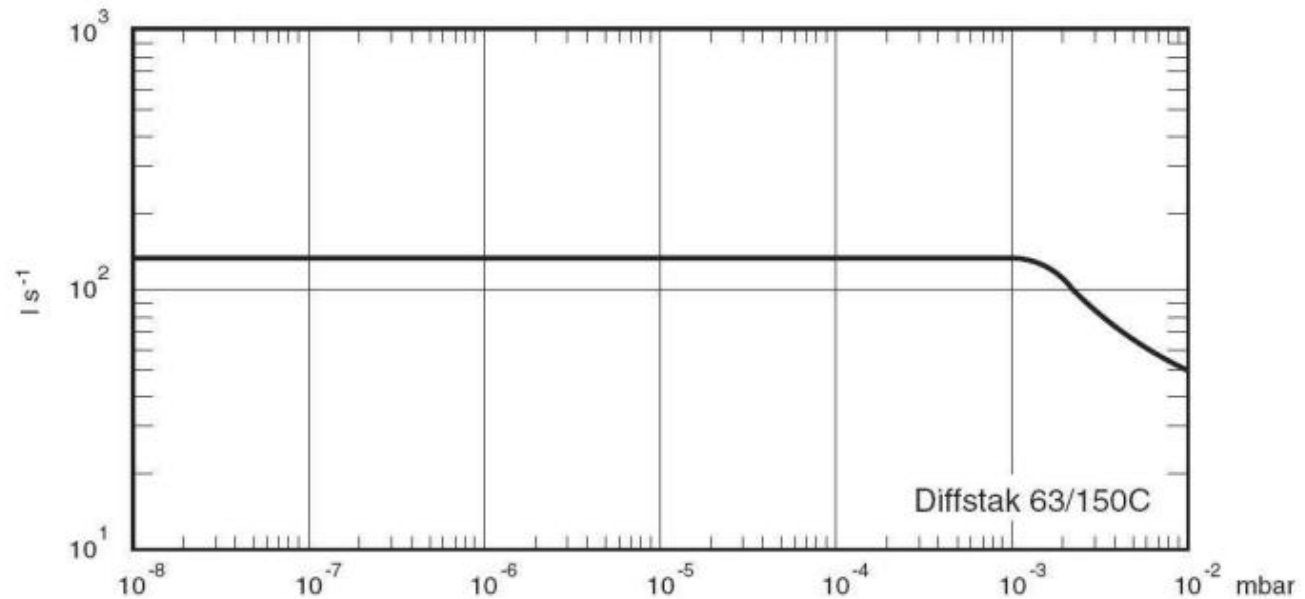
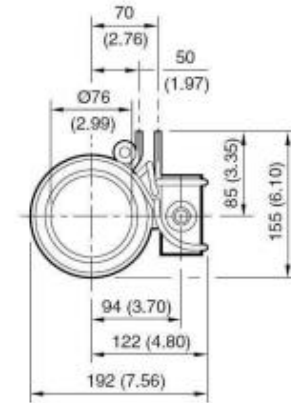
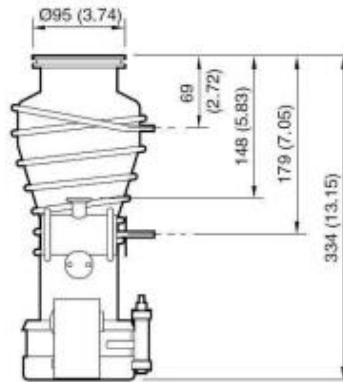
Bomba de Difusão

- 1 Heater
- 2 Boiler
- 3 Pump body
- 4 Cooling coil
- 5 High vacuum flange
- 6 Gas molecules
- 7 Vapor jet
- 8 Backing vacuum connection

A
B
C
D } Nozzles



Bombas de vácuo



Bombas de vácuo

Bomba Turbomolecular

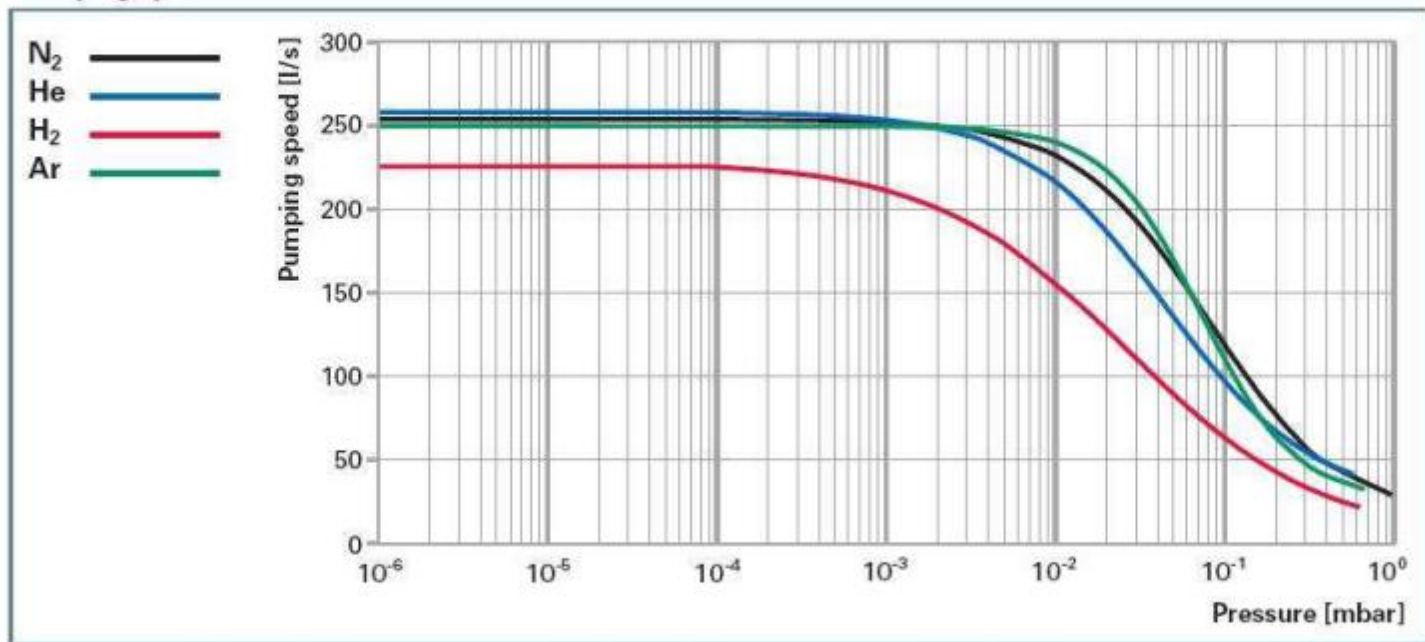


Bomba Turbomolecular



Bombas de vácuo

Bomba Turbomolecular



Bombas de vácuo

Bomba Magneto-lônica



Bomba Magneto-lônica

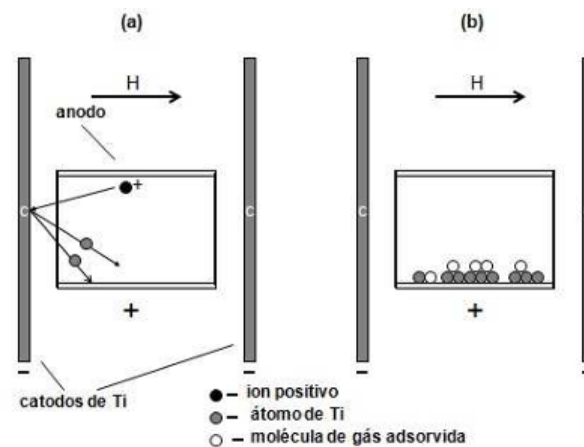
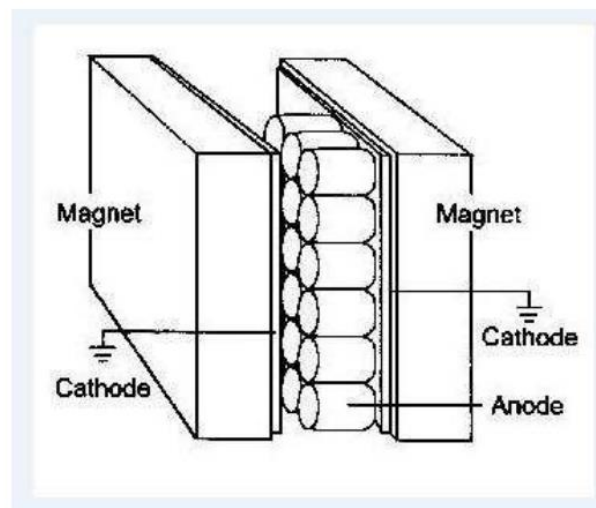
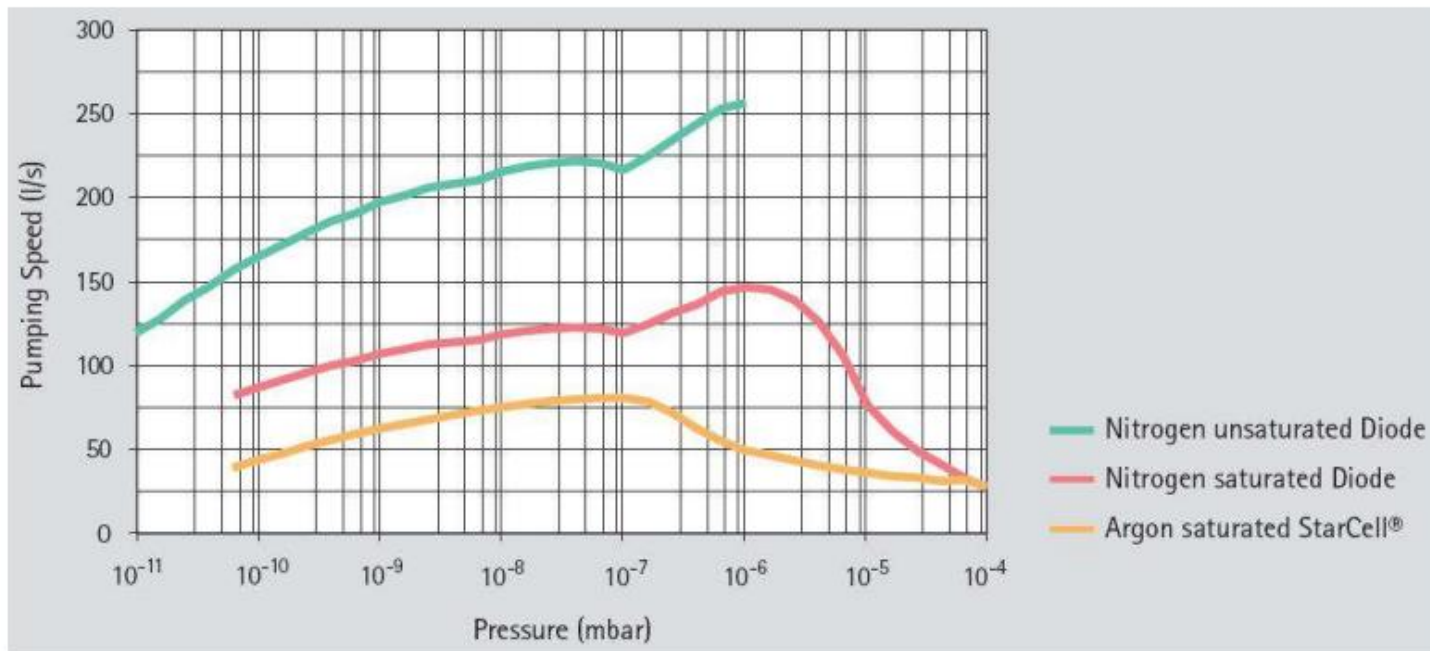


Figura 3. Representação esquemática dos catodos e de uma célula do anodo de uma bomba diodo. (a) *Sputtering* do catodo de titânio; (b) captura das espécies gasosas pelo titânio depositado.

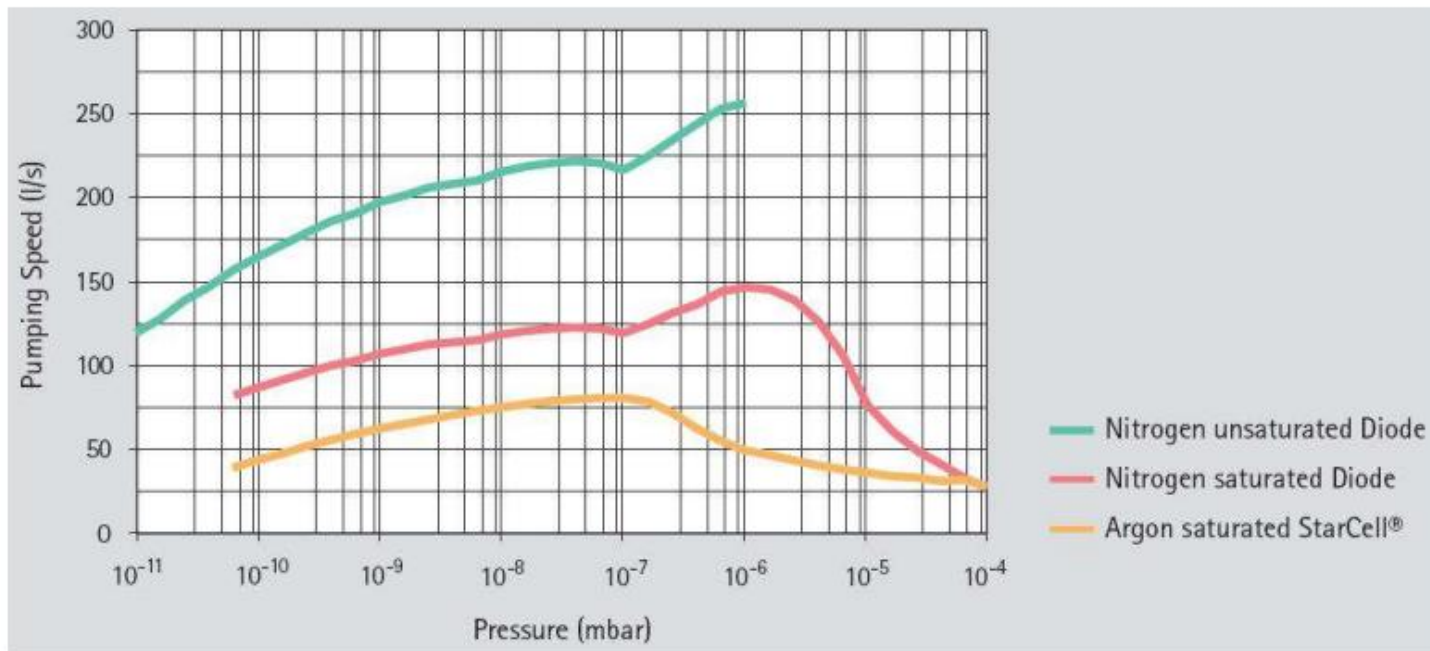
Bombas de vácuo

Bomba Magneto-lônica

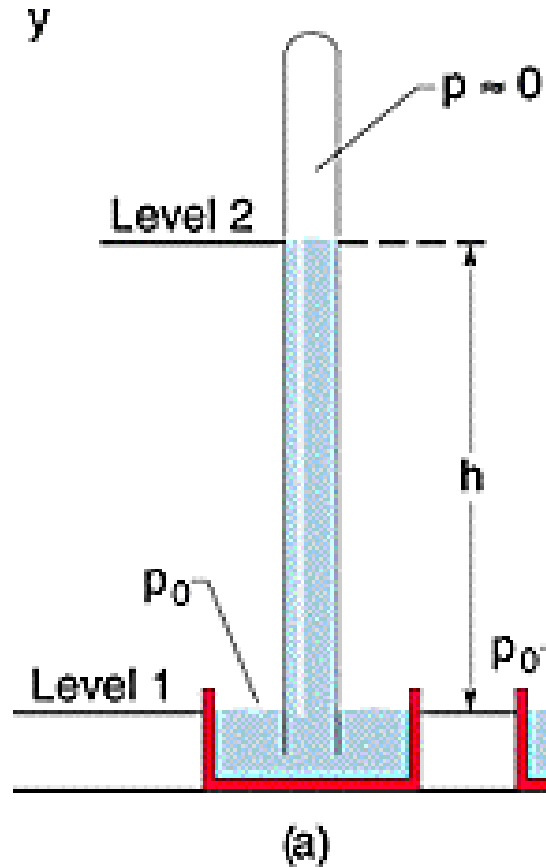


Bombas de vácuo

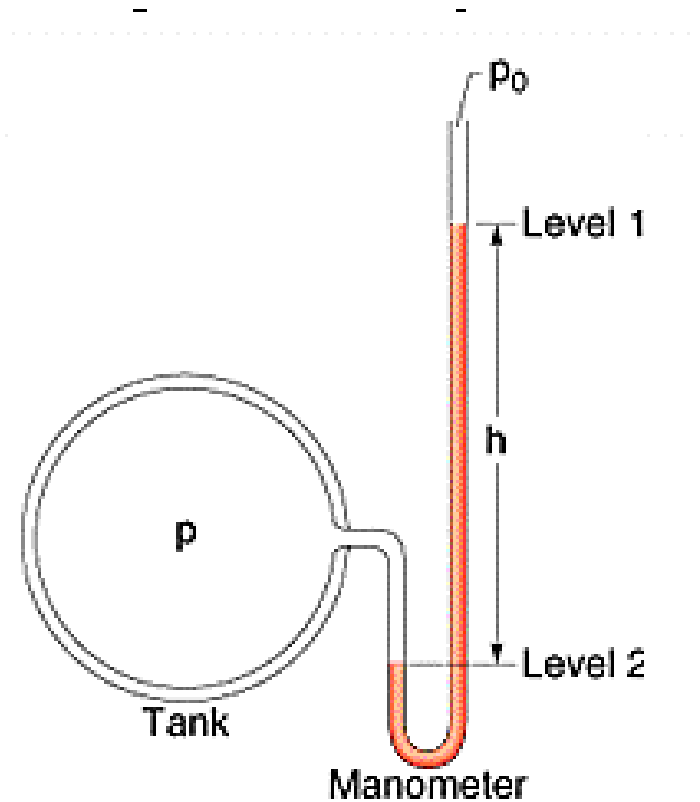
Bomba Magneto-lônica



Medidores de pressão...

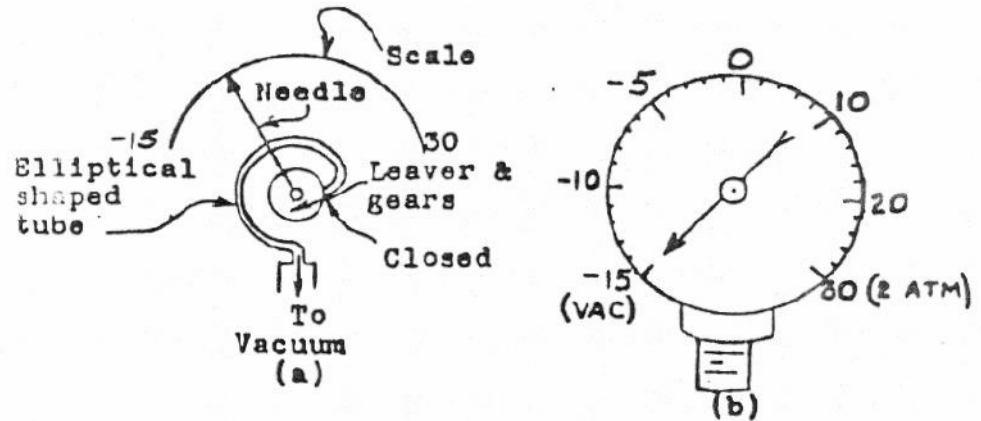


O Barômetro de Mercúrio



O Manômetro de Tudo aberto

Medidores de pressão...

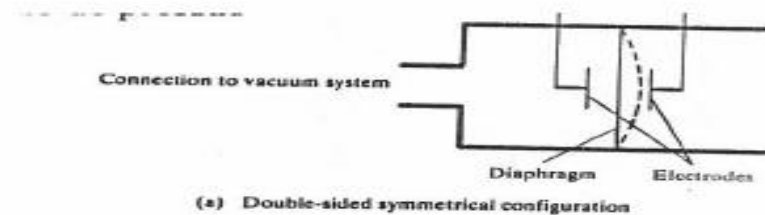


Medidor Bordon

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.

Medidores de pressão...

Medidores de Membrana Capacitiva - Baratron



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.

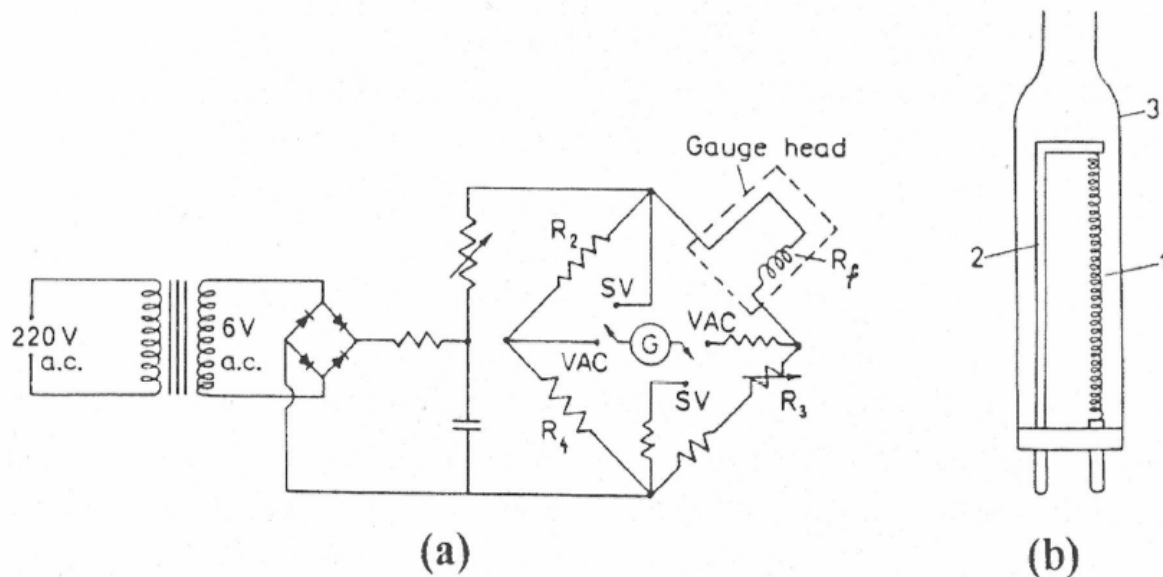
Se mantermos o dielétrico constante, teremos uma variação da capacitância proporcional à pressão exercida sobre a membrana.

Medidores de pressão...

Medidor de Condutividade Térmica (Pirani)

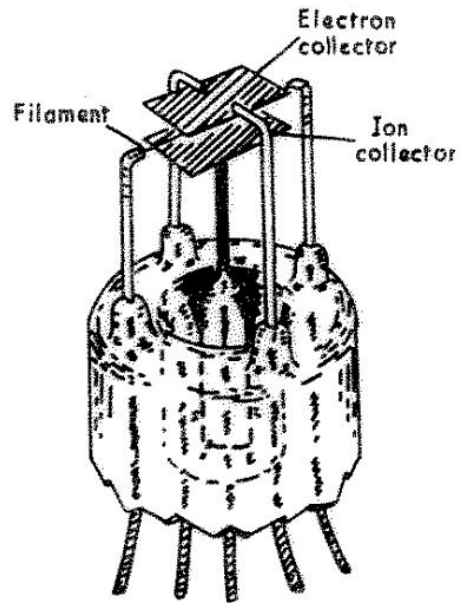
O princípio de funcionamento de um medidor de vácuo tipo Pirani é o da condutividade térmica dos gases.

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 ($\Delta T \propto P$), decrescendo monotonicamente com a mesma.

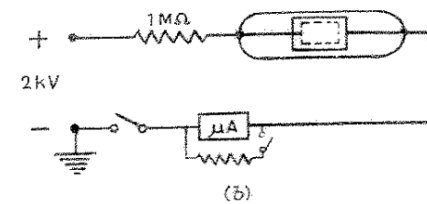
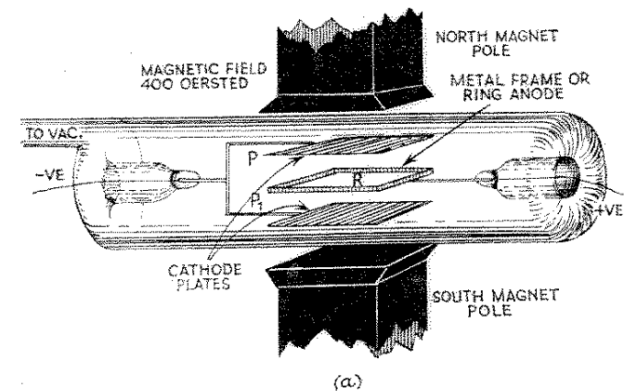


Medidores de pressão por ionização

- *Ionização de Catodo quente (direita) ou frio. (i depende de P)*

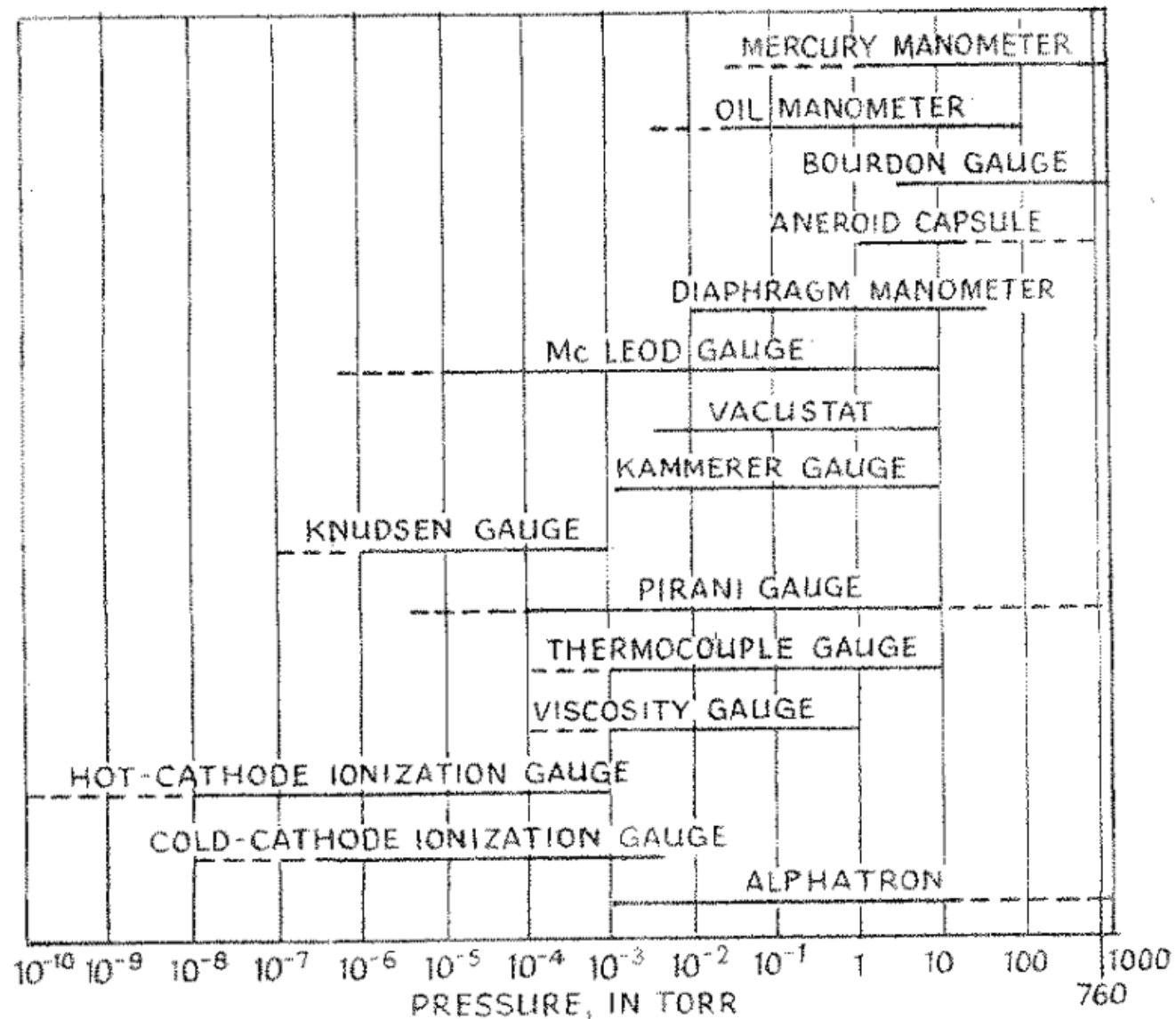


The ionization gauge designed by Schulz and Phelps for high-pressure operation.



The Penning cold-cathode ionization gauge

Comparação entre medidores....



O que iremos estudar ao longo do semestre:

→ Teoria de gases rarefeitos:

- Equação de estado de gases ideais
- Equação de estado de gases reais → Cálculos cinético da energia das moléculas, da pressão, etc...
- Livre caminho médio

→ Escoamento de gases:

- Viscosidade do gás
- Condutância
- Velocidade de escoamento, etc...

Equação de estado dos gases ideais

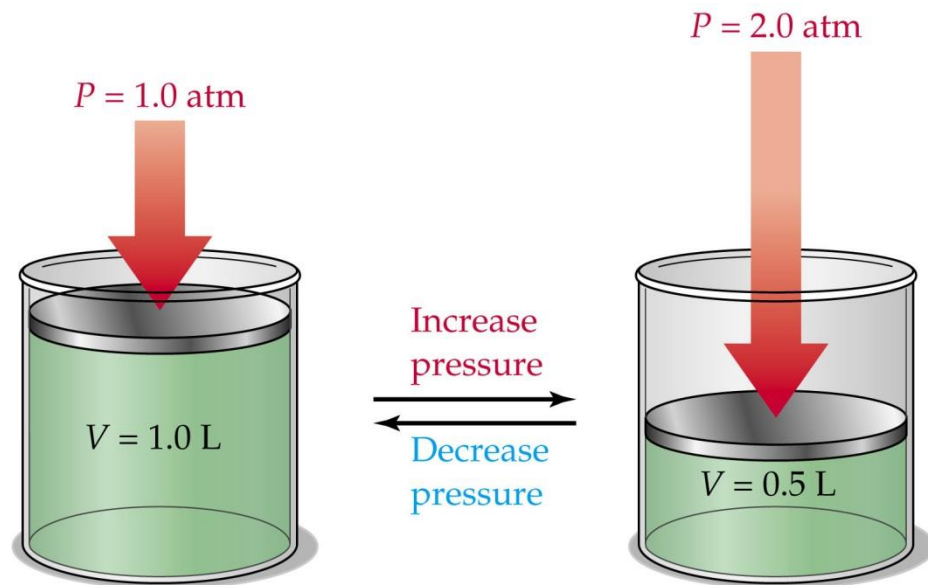
- Qualquer objeto macroscópico em *equilíbrio termodinâmico* tem o seu estado descrito por um conjunto de variáveis macroscópicas que denominamos *variáveis de estado* do sistema.
- No caso particular de fluidos homogêneos o estado do sistema fica caracterizado por qualquer par escolhido entre (P , V , T) que obedecem à chamada *equação de estado*

Equação de estado dos gases ideais

A lei de Boyle

medida de $P = P(V)$ a T constante

O volume de uma dada quantidade de gás, a temperatura constante, varia inversamente com a pressão



$$PV = \text{const.}$$

Equação de estado dos gases ideais

A lei de Charles

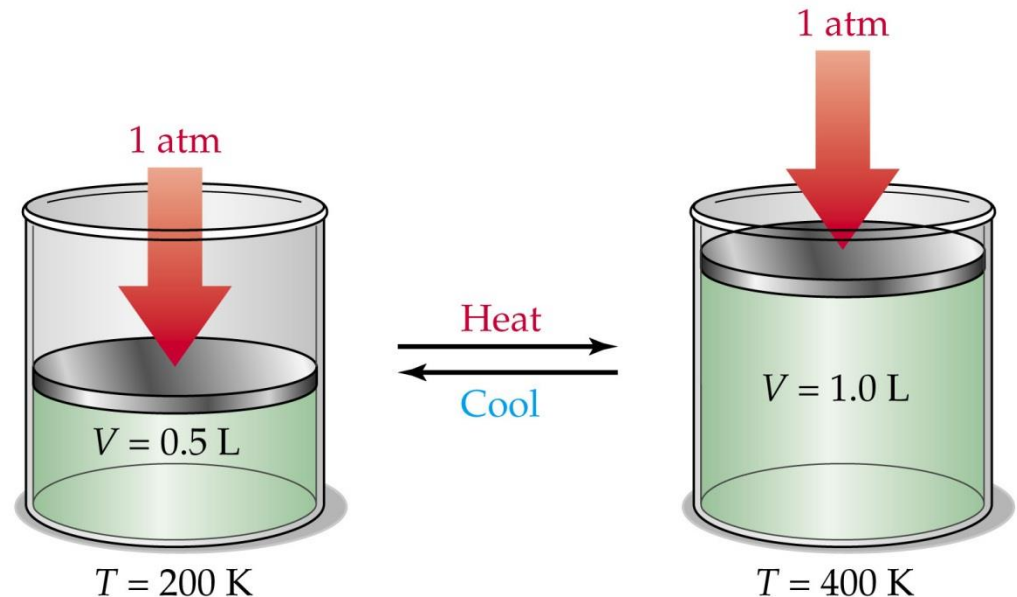
medida de $V = V(T)$ a P constante

Basicamente medir a dilatação volumétrica

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T \quad (P = 1 \text{ atm})$$

$$V_\theta = V_0(1 + \beta \Delta T)$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

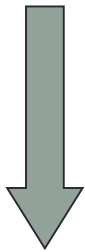


Equação de estado dos gases ideais

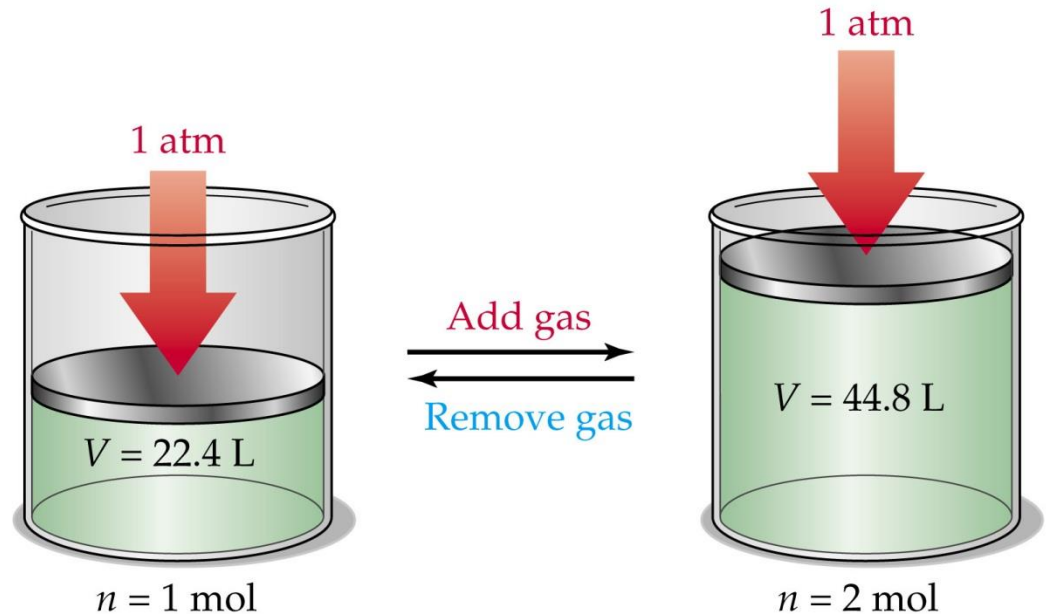
A lei dos gases perfeitos

Visto que $\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} = \textit{const.}$ precisamos determinar

o valor desta constante



Lei de Avogadro



Equação de estado dos gases ideais

A lei dos gases perfeitos

Aplicando-se a lei de Avogadro para 1 mol de qualquer gás perfeito tem-se o mesmo resultado

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} \equiv R = \frac{1 \text{ atm} \times 22,4 \text{ l}}{273 \text{ K}} = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = 1,986 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$



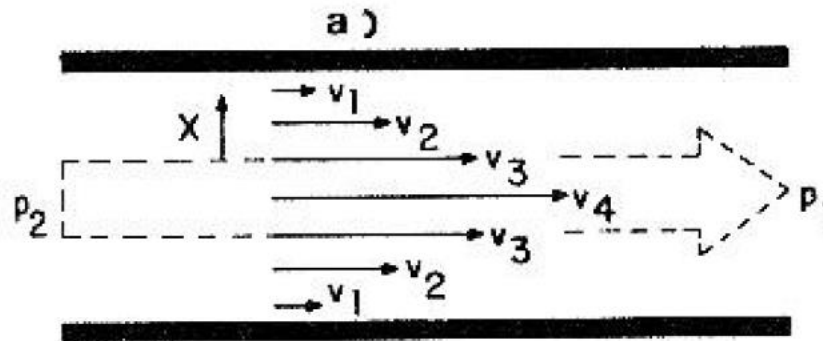
$$PV = nRT$$

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 seu comportamento varia consideravelmente, dependendo da pressão e da geometria da câmara ou da tubulação em que o mesmo está se movendo.

Fluxo viscoso

- A pressões altas o livre caminho médio $\bar{\ell}$ é curto, portanto, o comportamento das moléculas é regido pelas colisões com outras moléculas do gás.
- Em fluxos de gás deste tipo, as moléculas se movem como um jato.
- O regime de escoamento de gases deste tipo são chamados de fluxo viscoso e podem ser de dois tipos:

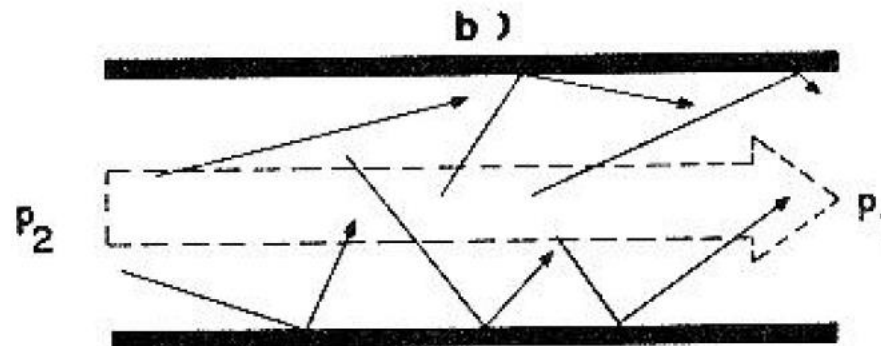


Fluxo viscoso

- Viscoso laminar: quando as camadas de fluxo forem paralelas;
- Viscoso turbulento: quando a velocidade do gás é alta, as camadas de fluxo não são mais paralelas, havendo a formação de bolsões de baixa pressão entre as camadas.

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;

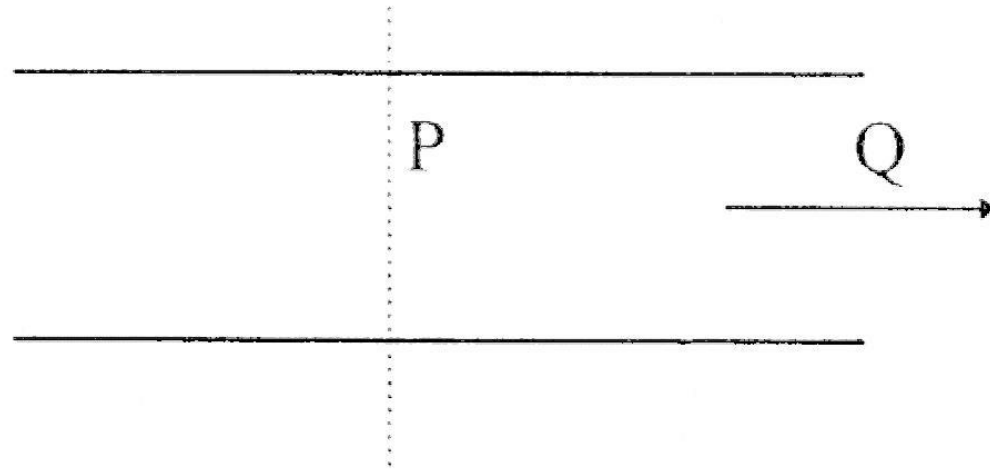


Fluxo e escoamento de gases

- Em geral, temos que :
- 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: $D \gg \bar{\ell}$;
- Regime de escoamento molecular quando: $(\bar{\ell} \gg D)$.
- Para pressões tais que: $\bar{\ell} \sim D$ o escoamento é chamado de regime intermediário, e a frequência de colisões molécula-molécula são da mesma ordem que a frequência de colisões das moléculas com as paredes do tubo.

Velocidade de bombeamento e corrente molecular

- 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 .



Velocidade de bombeamento e corrente molecular

- Chamamos de velocidade de bombeamento S :

$$S = \frac{\delta V}{\delta t} \quad (l/s)$$

- A corrente molecular do gás é dada por:

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

$$Q = P \frac{\delta V}{\delta t} \quad (torr.l/s)$$

Velocidade de bombeamento e corrente molecular

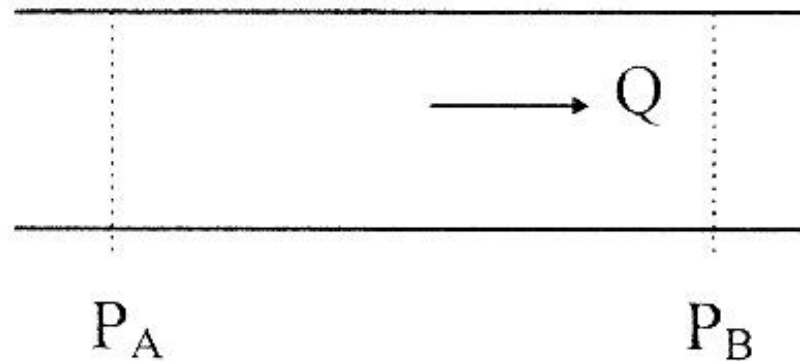
- Se $T = \text{constante}$; Q pode ser equacionado em função do número de moléculas δN que atravessam a seção do tubo no intervalo de tempo δt ;
- Derivando a equação de estado de um gás ideal em relação ao tempo temos:

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = kT \frac{dN}{dt}$$

- No regime estacionário P independe do tempo então:

$$P \frac{dV}{dt} = Q = kT \frac{dN}{dt}$$

Condutância de um 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.

Condutância de um tubo

- 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:

$$C_{AB} = \frac{Q}{P_A - P_b} \quad (l/s)$$

$$Z_{AB} = \frac{1}{C_{AB}} \quad (s/l)$$

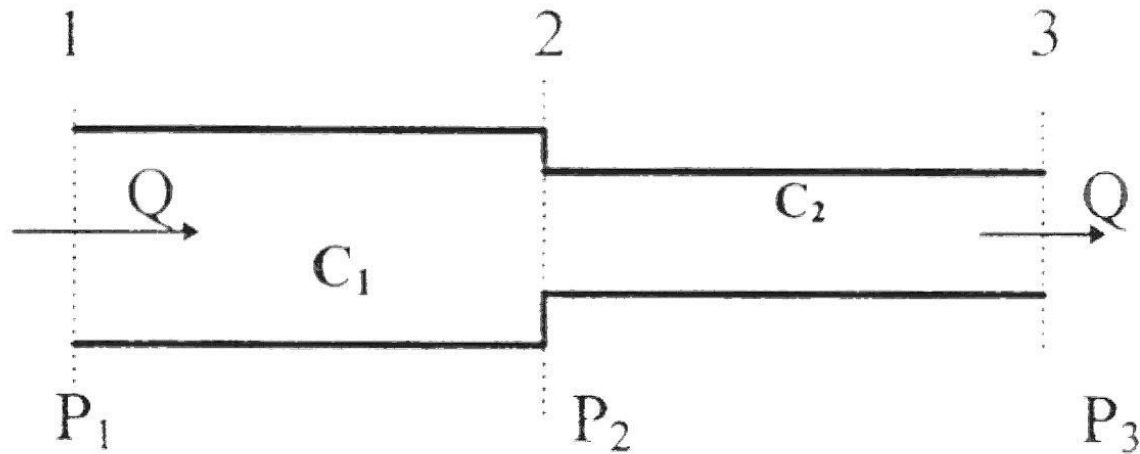
- Sendo Z a impedância, que está associado com a dificuldade (resistência) oferecida pelo tubo à passagem do gás;
- Quanto mais fino for um tubo maior será a dificuldade de passagem do gás e portanto maior a sua impedância;

Condutância de um tubo

- Conservação da 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

Condutância em série

- Na figura acima, se C_1 e C_2 são as condutâncias dos dois tubos conectados em série:



Condutância em série

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

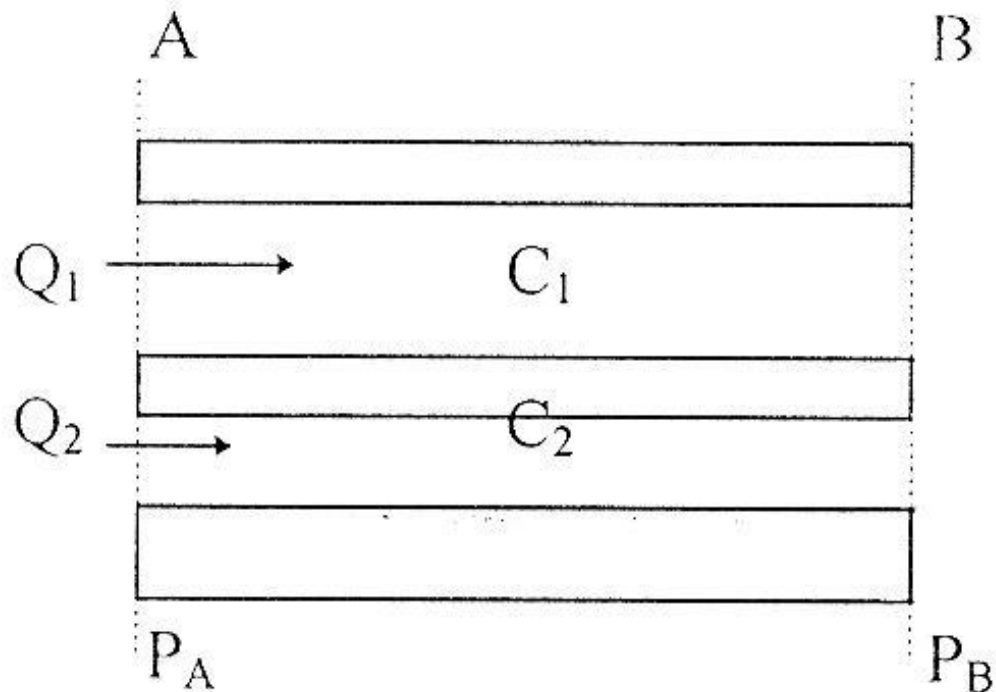
- Somando as duas equações:

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

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

Condutância em paralelo

- 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:



Condutância em paralelo

- Para essa configuração:

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

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

- Para a associação:

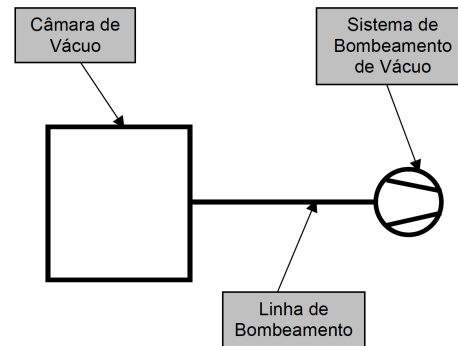
$$C_{\text{tot}} = Q_{\text{tot}}/(P_A - P_B)$$

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

Bombeamento: Variação de P com o tempo.

- Se $T = \text{constante}$; Q pode ser equacionado em função do número de moléculas δN que atravessam a seção do tubo no intervalo de tempo δt ;
- Derivando a equação de estado de um gás ideal em relação ao tempo temos:

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = kT \frac{dN}{dt}$$



$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_B + -\left(\frac{dN}{dt}\right)_D + -\left(\frac{dN}{dt}\right)_V + -\left(\frac{dN}{dt}\right)_d \quad (2)$$

- Em que o índice B se refere ao número de moléculas bombeadas por unidade de tempo (taxa de bombeamento), D se refere a taxa de degaseificação, V se refere a vazamentos e d se refere a difusão.

Bombeamento: Variação de P com o tempo.

De (1) e (2) temos:

$$V\left(\frac{dP}{dt}\right) = -kT\left(\frac{dN}{dt}\right)_B + kT\left(\frac{dN}{dt}\right)_D + kT\left(\frac{dN}{dt}\right)_V + kT\left(\frac{dN}{dt}\right)_d \quad \text{ou}$$

$$V\left(\frac{dP}{dt}\right) = -Q_B + Q_D + Q_V + Q_d$$

No equilíbrio P é constante, então:

$$Q_B = Q_D + Q_v + Q_d \quad \text{e}$$

$$P_{eq} = \frac{Q_D + Q_v + Q_d}{S}$$

Bombeamento: Variação de P com o tempo.

Assim, temos:

$$V \left(\frac{dP}{dt} \right) = PS + P_{eq} S$$

Se $S = \text{cte}$, podemos integrar facilmente essa equação:

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{(P_{eq} - P)} = \left(\frac{S}{V} \right) \int_0^t dt$$

Bombeamento: Variação de P com o tempo.

$$P - P_{eq} = (P_0 - P_{eq}) e^{-\left(\frac{S}{V}\right)t}$$

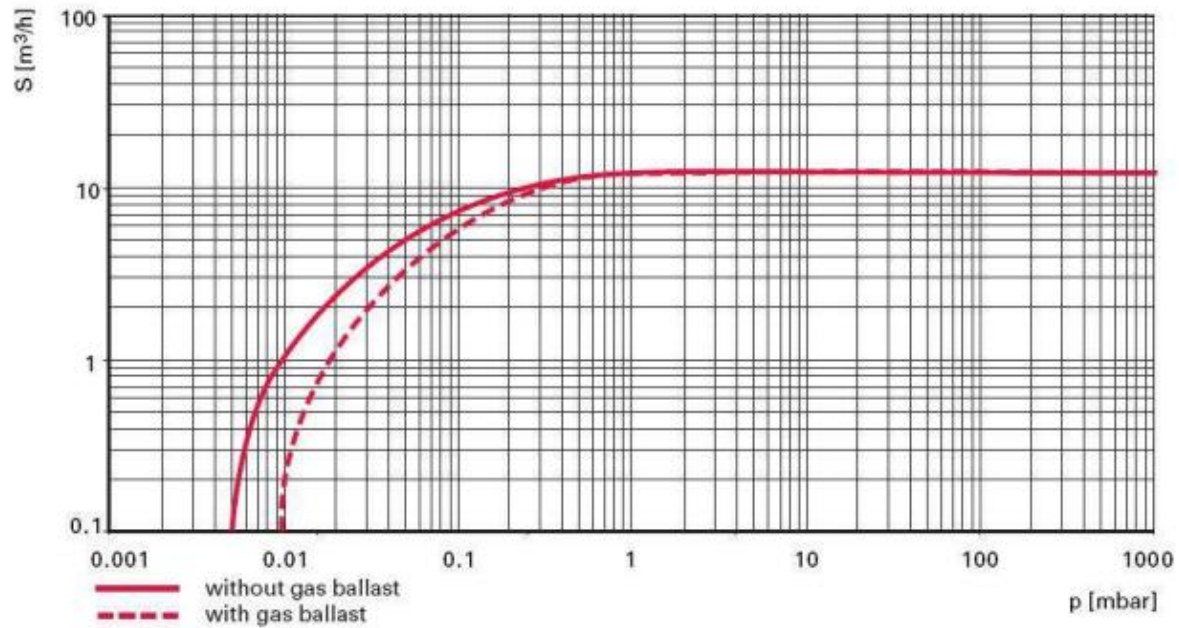
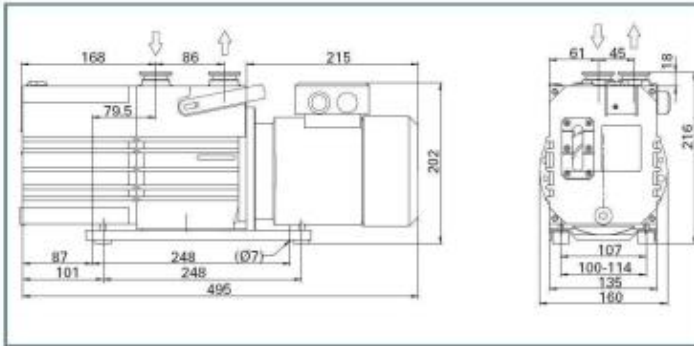
Se $P_0 \gg P_{eq}$, o que é geralmente o caso, teremos finalmente

$$P = P_0 e^{-\left(\frac{S}{V}\right)t} + P_{eq} \quad (12)$$

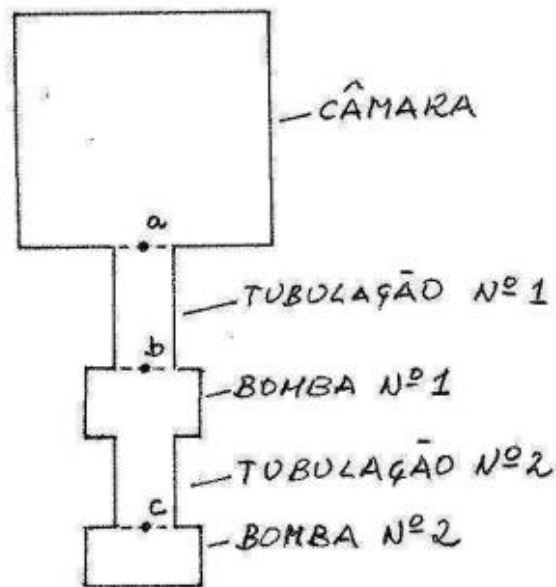
Encontramos então que a pressão na câmara depende exponencialmente do tempo. Para valores de t muito grandes, $P \approx P_{eq}$. Um gráfico semi-logaritmico de $(P - P_{eq})$ vs. t será uma reta e o valor de S poderá ser deduzido de seu coeficiente angular. Entretanto não deve ser esquecido que a equação (2) é válida somente se $S = \text{cte}$. S não é geralmente constante mas depende da pressão. Mesmo assim, o gráfico $(P - P_{eq})$ vs. t pode ser útil para determinar os valores de S nos intervalos de pressão em que o mesmo for aproximadamente constante.

Bombas de vacío

Dimensions



Sistema de Bombeamento: Descrição



- Se C_1 e C_2 são as condutâncias dos dois tubos, conhecendo-se o valor de C_1 e S_b pode-se determinar S_a na boca da câmara:

Sistema de Bombeamento: Descrição

$$S_A = \frac{Q}{P_A} \therefore \frac{1}{S_A} = \frac{P_A}{Q}$$

No plano B a velocidade de bombeamento é

$$S_B = \frac{Q}{P_B} \therefore \frac{1}{S_B} = \frac{P_B}{Q} .$$

A subtração das duas últimas equações resulta em

$$\frac{1}{S_A} - \frac{1}{S_B} = \frac{P_A - P_B}{Q} = \frac{1}{C_{AB}} .$$

Portanto

$$S_A = \frac{S_B C_{AB}}{S_B + C_{AB}} .$$

(13)

ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE MOLÉCULAS EM VÁCUO

Adsorção é processo de acúmulo de um ou mais constituintes de um fluido sobre superfícies sólidas sem incorporação no volume.

Os constituintes que se aderem à superfície são chamados **adsorvatos**, enquanto que a fase sólida que retém o adsorvato é o **adsorvente**. A remoção das substâncias a partir da superfície é chamada **dessorção**.

O primeiro passo de qualquer interação com a superfície é a **adsorção** que tipicamente podemos especificar como o acúmulo de átomos ou moléculas (na superfície ou através dela).

Podemos ainda tentar separar em duas categorias:

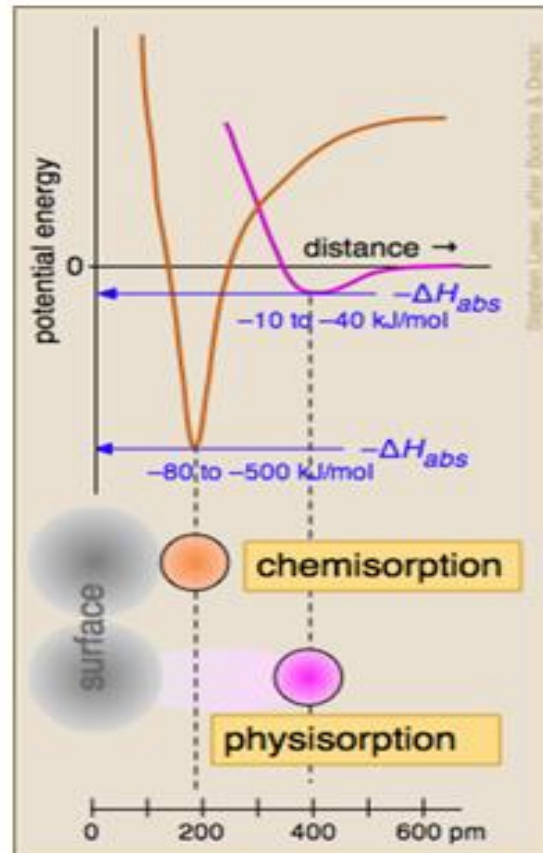
Fisissorção: Envolve interações fracas de polarização do adsorbato e da superfície sem transferência de carga ou modificações da superfície.

Quimissorção: Envolve a formação de ligações químicas entre o substrato e o adsorbato (ou partes deles se for uma interação dissociativa).

ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE MOLÉCULAS EM VÁCUO

Adsorção é processo de acúmulo de um ou mais constituintes de um fluido sobre superfícies sólidas sem incorporação no volume.

Os constituintes que se aderem à superfície são chamados **adsorvatos**, enquanto que a fase sólida que retém o adsorvato é o **adsorvente**. A remoção das substâncias a partir da superfície é chamada dessorção.



TAXA DE ADSORÇÃO



A razão na qual um gás é adsorvido numa superfície é dada pela taxa de adsorção:

$$\frac{dN}{dT} = sv \text{ em que } s \text{ é a probabilidade de adesão e } v \text{ é a densidade de impacto moleculares}$$

TAXA DE DESSORÇÃO

$$\frac{dN}{dT} = \frac{N}{\bar{t}} \text{ em que } N \text{ é número de moléculas adsorvidas por unidade de área e}$$

$\bar{t}$ é o tempo médio de permanência

ADSORÇÃO E DESSORÇÃO EM ZEOLITAS

Mainly two process are responsible for the H_2O purification in the molecular sieve:

- 3-site adsorption due to cage structure and fractal characteristics, forming water clusters
- Cation exchange with H_3O^+ molecules

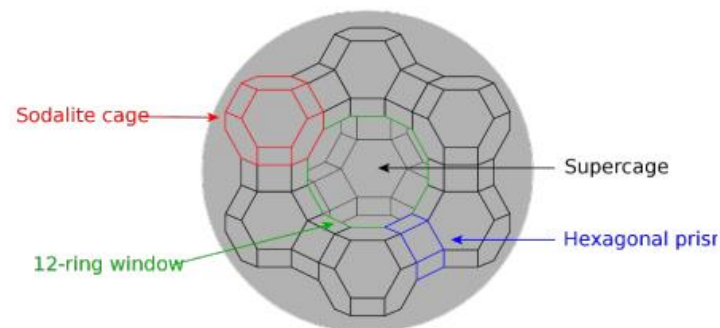
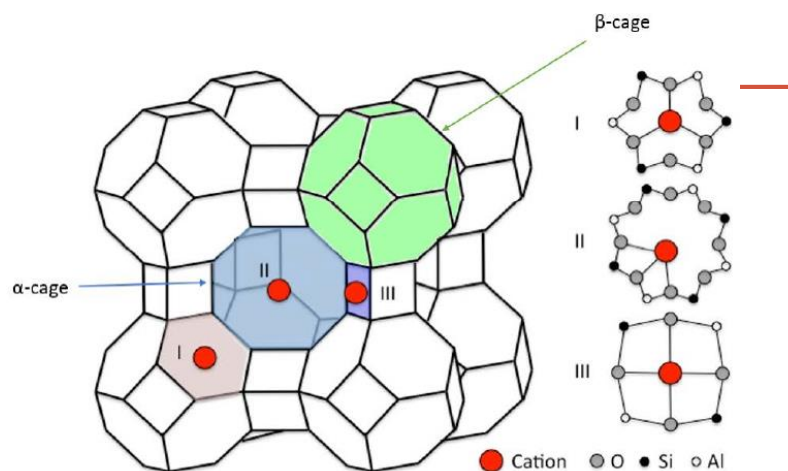


Figure: 2.2.2.1 Faujasite structure with crystallographic site location (adapted from Breck, 1974).

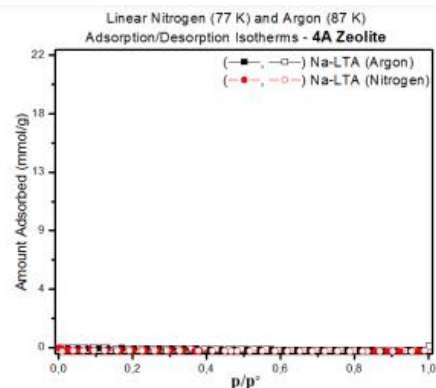
Tatlier, M., Munz, G., & Henninger, S. K. (2018). Relation of water adsorption capacities of zeolites with their structural properties. *Microporous and mesoporous materials*, 264, 70-75.

Amber, I., & Sanusi, Y. S. (2012). Experimental determination of the adsorption capacity of synthetic Zeolite A/water pair for solar cooling applications. *Journal of mechanical Engineering Research*, 4(4), 142-147.

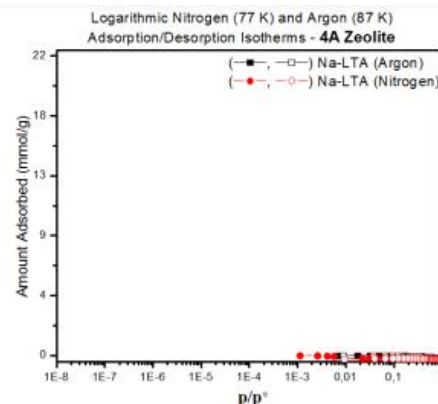
Lin, Ronghong, et al. "Isotherms for water adsorption on molecular sieve 3A: influence of cation composition." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54.42 (2015): 10442-10448.

Andreas ES, Warecks G, Derewinski M, Lercher JA (1989). Adsorption of water on ZSM5 Zeolites. *Am. Chem. Society. J. Phys. Chem.*

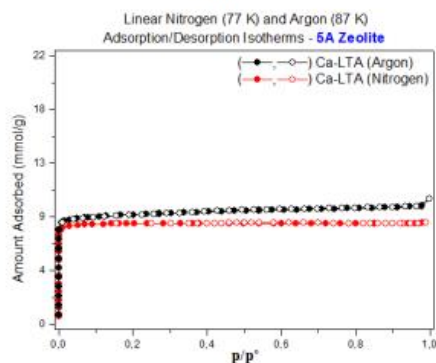
Isotermas de adsorção:



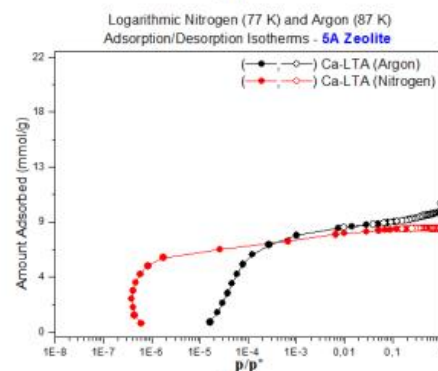
(a)



(b)



(c)



(d)

