

- 2022 -

29/03/22

Distribuir apostilas - } Escoamento de gases
Teoria cinética dos gases.

Lista de presença.

definição de vácuo ≡ Espaço preenchido com gás em pressão abaixo de pressão atmosférica

$$P < 2,5 \times 10^{19} \text{ moléculas/cm}^3$$

Mostrar Placa PVC

Conversar sobre canudinho

Definições: Pressão = $\frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$ MKS; $\left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \right]$ CGS

$$[\text{Pascal}] = \frac{N}{m^2} ; \quad 1 \text{ bar} = 10^6 \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2}$$

Diferentes valores de pressão correspondem a diferentes situações físicas.

Conceitos úteis } densidade molecular
 } caminho livre médio
 } tempo de formação de uma camada

Todos esses conceitos estão relacionados com a pressão, ao tipo de gás e à temperatura.

Tempo para formação de uma monocamada.

Esse tempo é dado pela razão entre o número de moléculas necessárias para formar uma camada compacta ($\sim 8 \times 10^{14}$ moléculas/cm²) e a taxa de moléculas incidentes em uma superfície.

Transparência 1

- Pressão x tempo de formação de uma nuvem
- Pressão x dentidade
- Pressão x livre caminho médio
- Pré-vácuo - alto vácuo - ultra alto vácuo

Transparência 2

Composição do ar

- Pré-vácuo - mantém a mesma composição
- alto-vácuo 70% a 90% Vapor d'água
- ultra-alto vácuo H_2 (permeação).

Aplicações do dia-a-dia

- Tomar coca-cola pelo canudinho 300 Torr
- Respiração 740 Torr
- Polvo 100 Torr

Pressão x Altitude

nível do mar	760 mm Hg
São Paulo	700 mmHg (800m)
10 km	100 mm Hg (avião)
100 km	10^{-4} mm Hg
1000 km	10^{-12} mm Hg
10000 km	10^{-14} mm Hg

distância média da lua

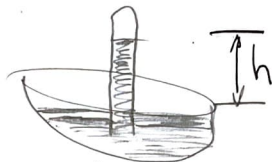
$$\Delta x \sim 390\ 000\ km$$

História da Tecnologia do Vácuo

(2)

Transparência 3

1643 - Torricelli Vácuo produzido no topo de uma coluna de Hg.



1654 - Otto von Guericke
Magdeburg hemisphere
demonstrou a força da pressão atmosférica

- Vela não queime
- animais morrem.

1879 - Edison (lâmpada elétrica)

Lei dos gases Boyle-Mariotte, Charles, Gay-Lussac

 Bernoulli, Avogadro, Maxwell, Boltzmann

1874 - McLeod-gauge

1879 - Tubo de raios catódicos (Crookes)

1906 - Pirani Gauge

1915 W. Gaede } Bomba difusora

1916 I. Langmuir }

1940 Pesquisa em física nuclear } ciclotron

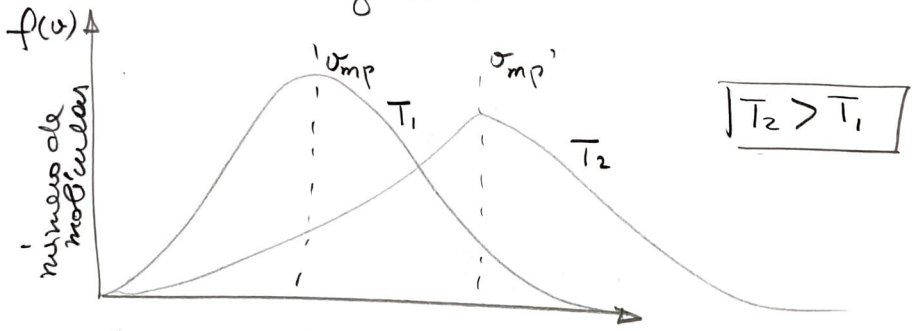
1950 10^{-6} a 10^{-7} Torr } separador isotópico

1950 Bayard-Alpert gauge ultra-alto-vácuo (Tubo)

1953 R. Herb bombas iônicas (Fundador NRC)

Ciência {
 Espacial
 Superfície
 Semi-condutores
 nanotecnologia
 Física Nuclear
 Física de partículas elementares

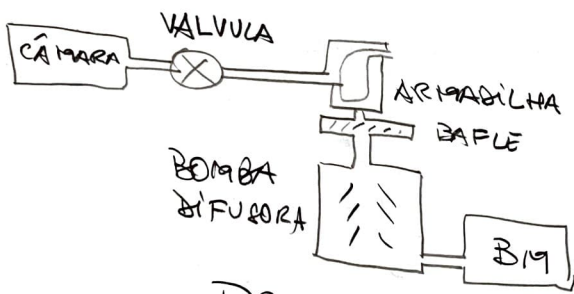
Distribuições de moléculas é regida pela distribuição de Maxwell-Boltzmann.



Teoria cinética dos gases (próxima aula)

Composição de um sistema de vácuo básico

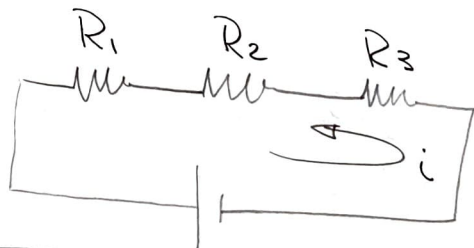
CÂMARA - VÁLVULAS - TUBOS E CONEXÕES - ARMADILHAS
 BAFLE - Bomba de vácuo (turbo/difusora) - Bomba pu-vácuo (mecânica, sorção, membrana)



PROBABILIDADE DE TRANSMISSÃO
 { - Regime de pressão
 { - Geometria do sistema

ANALOGIA A UM SISTEMA ELÉTRICO

$\Delta V \approx \Delta P$
 $R \approx$ impedância
 $i \approx$ fluxo de massa (Q) throughput



$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$

Definições Básicas

4

Condutância \equiv inverso da impedância

condutância \equiv Velocidade de bombeamento
dependem } Regime de pressão
 } geometria do sistema

TAXA DE ESCOAMENTO

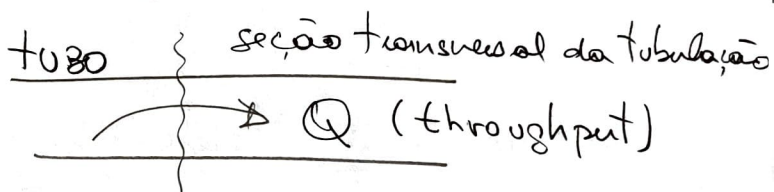
FLUXO DE MASSA

Quantidade de moléculas que atravessam uma seção transversal por unidade de tempo.

THROUGHPUT

$$Q = \frac{P V}{\Delta t} = P S$$

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Q}{P}$$



$Q = P S$ onde S é a velocidade de bombeamento

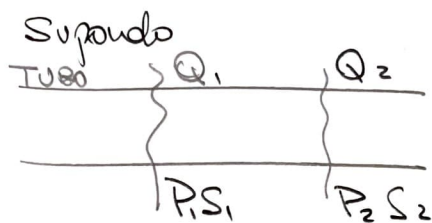
Lei dos gases \Rightarrow $P V = N k T$ k é a cte de Boltzmann



$$P \frac{\Delta V}{\Delta t} = k T \frac{\Delta N}{\Delta t} \text{ corrente molecular}$$

$$\left[P \frac{\Delta V}{\Delta t} \right] = \text{Torr} \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Unidade } [Q] = \text{Torr} \frac{\text{l}}{\text{s}}$$



Lei de conservação

$$Q_1 = Q_2$$

condições: Se não houver uma região que aprisione moléculas e se não houver fluxo adicional (vazamentos) de moléculas para o sistema

throughput \equiv fluxo de massa

$$\left. \begin{array}{l} Q \text{ de vazamentos} \\ Q \text{ de difusão} \\ Q \text{ de permeação} \end{array} \right\} \Rightarrow Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$$

O throughput é definido como sendo a quantidade de gás, numa dada temperatura, que atravessa uma seção reta (cruza) por unidade de tempo.

Unidade $\left[\frac{\text{Torr l}}{\text{s}} \right]$ $\left[\frac{\text{Pa m}^3}{\text{s}} \right]$

$$1 \frac{\text{std cc}}{\text{min}} = 1,27 \times 10^{-2} \frac{\text{Torr l}}{\text{s}}$$

$$= 1,67 \times 10^{-2} \frac{\text{atm cc}}{\text{s}}$$

$$1 \frac{\text{Torr l}}{\text{s}} = 1,3 \frac{\text{atm cc}}{\text{s}}$$

Equação geral de um sistema de vácuo

(5)

$$V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} \Rightarrow \left| -V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} = Q - \sum_{i=1}^N Q_i \right|$$

$$\left| -V_0 \frac{\Delta P}{\Delta t} = PS - \sum_i Q_i \right|$$

USANDO A LEI DOS GASES

$$PV = NkT, \text{ então } \left| \frac{P \Delta V}{\Delta t} = kT \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad (i)$$

$$PS = kT \frac{\Delta N}{\Delta t} \Rightarrow Q = PS = \frac{\Delta N}{\Delta t} kT$$

$$\text{então } \left| S = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{kT}{P} \right|$$

ΔN é o número de moléculas que escoam por unidade de tempo.

da eq. (i), podemos escrever.

$$\left| m \frac{\Delta N}{\Delta t} = m \frac{Q}{kT} \right|$$

m é a massa da molécula

corrente molecular, \equiv massa que escoa por unidade de tempo através de uma seção reta da tubulação.

Para uma mistura de gases

$$\text{de (i)} \quad \left| Q = kT \sum_{i=1}^N \frac{\Delta N_i}{\Delta t} \right|$$

Algumas equações úteis

$$PV = NkT$$

$$k = \frac{R_0}{N_A}$$

$$N_A = 6,02 \times 10^{23}$$

$$PV = N \frac{R_0 T}{N_A}$$

multiplicando por m

$$PV = \frac{Nm}{m N_A} R_0 T$$

$N_A m \equiv$ massa molecular do gás

$$N_A m = M$$

$W = Nm \equiv$ massa do gás

então

$$\frac{P \Delta V}{\Delta t} = \frac{R_0 T \Delta W}{M \Delta t}$$

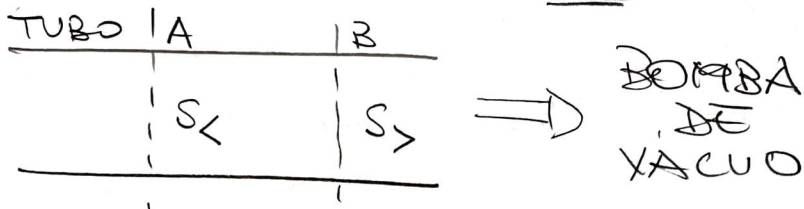
$$\text{logo } Q = \text{cte} \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$Q \equiv$ fluxo de massa

ESCOAMENTO DE GASES

(6)

A velocidade de bombeamento não é constante ao longo da tubulação, pois S é resultante da diferença de pressão. Mas, PS é constante!



A variação da pressão ao longo da tubulação é o resultado de uma certa impedância oferecida pela própria tubulação ao escoamento.

$$Z_{AB} = \frac{P_A - P_B}{Q}$$

Analogia com um circuito elétrico

$$V = R \cdot i$$

O inverso da impedância é a condutância

$$C_{AB} = \frac{Q}{P_A - P_B}$$

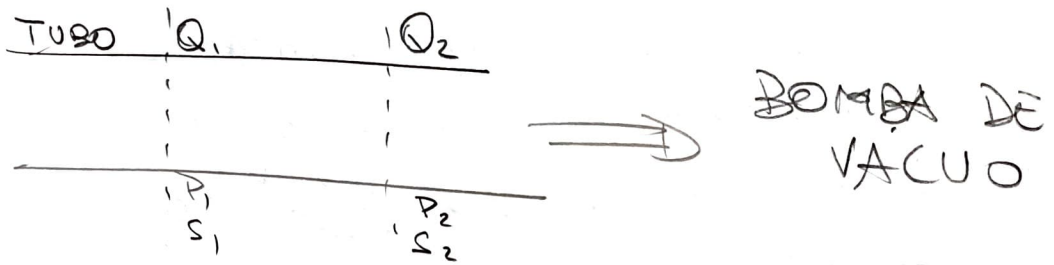
unidade [l/s]

$$C = \frac{1}{Z}$$

Os cálculos dependem fortemente do regime de pressão e da geometria do sistema

- Velocidade de bombeamento S [l/s]
característica de um ponto
- Condutância C [l/s]
característica de 2 pontos

Relações entre S e C



$$Q_1 = P_1 S_1 \quad Q_2 = P_2 S_2$$

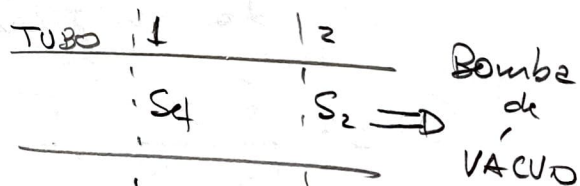
$$\frac{1}{S_1} = \frac{P_1}{Q_1} \quad (I) \quad \frac{1}{S_2} = \frac{P_2}{Q_2} \quad (II)$$

Subtraindo (I) de (II)

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{P_1}{Q_1} - \frac{P_2}{Q_2} \quad \text{Como } Q = \text{cte } Q_1 = Q_2$$

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{P_1 - P_2}{Q} = \frac{1}{C}, \text{ então}$$

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}}$$



Supondo estar na boca da bomba (2)

$$S_1 = S_{ef} \quad S_2 = S_b$$

$$\boxed{\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_b}}$$

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

$$\therefore \boxed{S_{ef} = \frac{C S_b}{S_b + C}}$$

Exemplos de utilização dessa equação:

7

(a) Se $S_b \gg C$
 $S_{ef} = C$

Ou seja, não adianta comprar uma bomba de vácuo com velocidade de bombeamento muito maior do que a condutância do sistema.

(b) Se $S_b \ll C$
 $S_{ef} = S_b$ \Rightarrow Situação ideal

Exemplos práticos:

(1) $C = 100 \text{ l/s}$
 $S_b = 100 \text{ l/s}$
 $S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} = \frac{100 \times 100}{100 + 100} = 50 \text{ l/s}$

(2) $S_{ef} = 60 \text{ l/s}$ $C = 50 \text{ l/s}$ $S_b = ?$

$$S_b = \frac{S_{ef} \cdot C}{C - S_{ef}} = \frac{60 \times 50}{50 - 60} < 0$$

S_b negativo?

A bomba funciona mas não com essa velocidade efetiva.

Informações Úteis

- Regime molecular \equiv condutâncias não dependem da pressão.
- Regime viscoso \equiv As condutâncias são enormes e dependem da pressão.

Definições de throughput (Q)

$$Q = PS; \quad Q = C \Delta P; \quad Q = \frac{P \Delta V}{\Delta t}$$

$$Q = k_i \frac{\Delta N}{\Delta t}; \quad Q = V \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

Revistas de Tecnologia do Vácuo

- ① Le vide (France)
- ② Vacuum Pergamon Press
- ③ The Journal of vacuum science and technology
- ④ Review of Scientific Instruments (AIP)
- ⑤ Journal of Scientific Instruments (England)