AULA 13

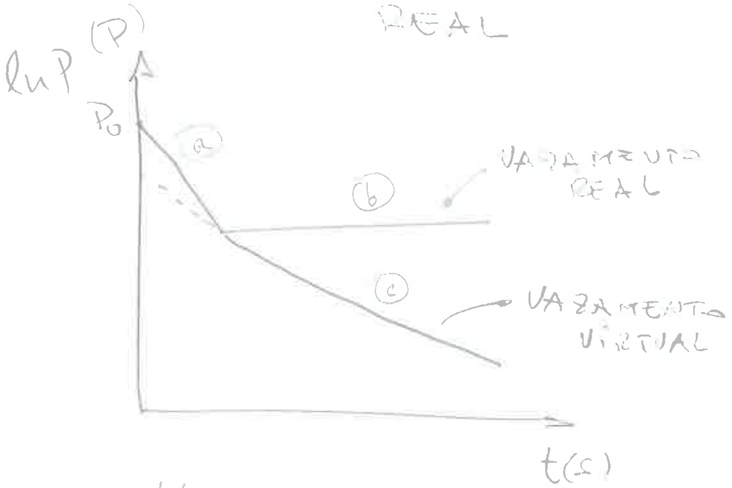
Ciência e Tecnologia do Vácuo

Prova na próxima aula { Trazer calculadora, lápis, régua, borracha e muita disposição

Resumo da aula anterior

→ Sistema para o estudo de vazamentos

VIRTUAL
REAL



ⓐ $P = P_0 \, e^{-t/\tau}$

ⓑ $P_r = \dfrac{C_r \, P_{atm}}{S}$ ≡ VAZAMENTO REAL

ⓒ $P_{res} = \dfrac{C_{xx}}{S} P_0' \, e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}$ ≡ VAZAMENTO VIRTUAL

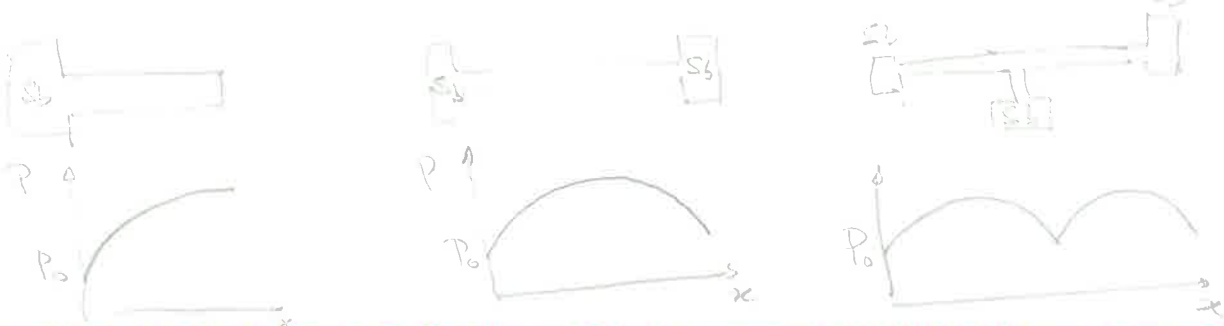
Perfil da pressão ao longo do tubo

$$P_x = P_0 + q B \left[\frac{x}{C} - \frac{x^2}{2LC} \right]$$

$$P_L - P_0 = \frac{q B L}{2C} \qquad P_0 = \frac{q B L}{S_b}$$

condições de contorno

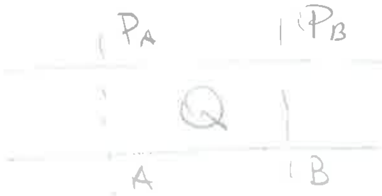
① $\left.\dfrac{dP}{dx}\right)_{x=L} = 0$ ② $x = 0 \quad P = P_0$



Fluxo de Massa

Q throughput $\underline{cte}$

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



$$C_{AB} = \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{Q}{P_A - P_B}$$

$$Q_A = P_A S_A \qquad Q_B = P_B S_B \qquad Q = Q_A = Q_B = cte$$

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

$$\boxed{\lambda = \frac{5\times10^{-3}\,(cm)}{P\,(Torr)}} \qquad \boxed{PV = NkT} \qquad \boxed{n = \frac{P}{kT}}$$

$$\boxed{\nu = \frac{1}{4} n \bar{v} \equiv \frac{n^{\circ}\ de\ moléculas}{área\ \ tempo}}$$

Distribuição de M-B

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

- Regime viscoso $\qquad \lambda << D \qquad DP \geq 1$
  - fluxo Turbulento $\quad Re > 2100$
  - fluxo laminar $\quad Re < 110$

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\eta}}$$

- Regime intermediário $\qquad 10^{-2} < DP < 1$
- Regime molecular $\qquad \lambda >> D \qquad DP \leq 10^{-2}$

Número de knudsen

$$N_k = \frac{\lambda}{D}$$

Tempo para a formação de uma monocamada

$$\boxed{\tau = \frac{2{,}7\times10^{-6}}{P(\text{Torr})}}$$

Regime Molecular

Condutâncias

$$\boxed{Q = C\Delta P}$$

orifício: $C = A\sqrt{\dfrac{kT}{2\pi m}}$

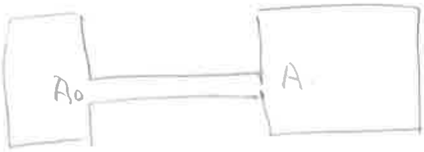
$(N_2)\,(T = 20\,°C)$

$$C_0 = 9D^2$$

D (cm)
C_0 (ℓ/s)

$$C \propto \sqrt{\frac{T}{M}}$$

diafragma: $C_{ef} = 12A\left(\dfrac{A_0}{A_0 - A}\right)$



duto circular

$$\boxed{C = K\,\frac{4}{3}\,\frac{\bar{v}}{\int_0^L \frac{B\,dl}{A^2}}}$$

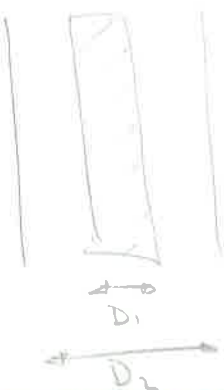
eq. geral

p/ tubo $C = \dfrac{\pi}{12}\,\bar{v}\,\dfrac{D^3}{L}$

$$\boxed{C_{ar} = \frac{12D^3}{L}}$$

D (cm)
L (cm)
C (ℓ/s)

duto anular



$$\boxed{C = 12k\,(D_2 - D_1)^2\,(D_1 + D_2)}$$

$$\boxed{C = \frac{12}{L}\left(D_2^3 - D_1^3\right)\left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)}$$

Condutância regime viscoso

orifício

$$\boxed{PV^{\gamma} = cte}$$

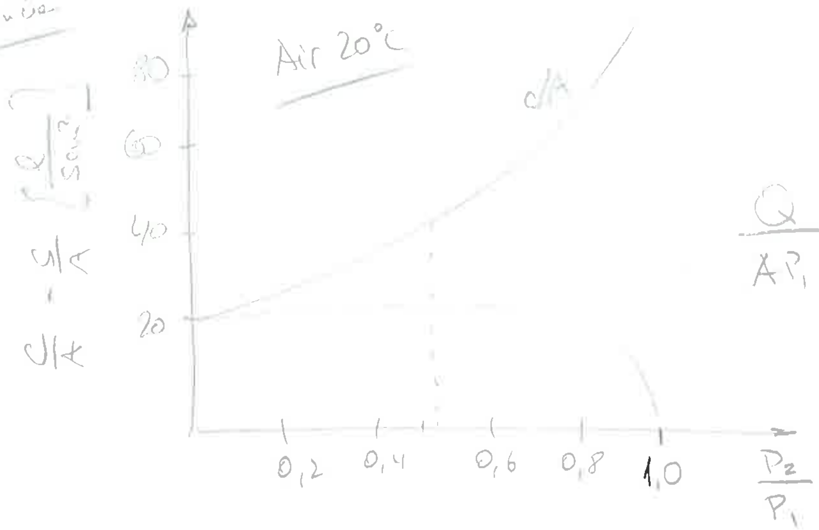
expansão adiabática

$$\boxed{C = \frac{20\,A}{1 - \frac{P_2}{P_1}}}$$

p/ $P_2 < 0{,}1\,P_1$

$$\boxed{C \cong 20\,A}$$

transparência



$$\frac{Q}{A P_1} = \frac{S}{A}$$

tubo

$$C_{N_2} = \frac{180\,D^4\,\bar{P}}{L} \qquad \bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$$\boxed{C = \frac{1}{\eta}\,\frac{\pi\,D^4\,\bar{P}}{128\,L}}$$ dependendo do gás

Regime intermediário

$10^{-2} < D\bar{P} < 1$

$$C_I = C_m\left(0{,}0736\,\frac{D}{\bar{\lambda}} + 1\right)$$

$$\boxed{\bar{\lambda} = \frac{5\times10^{-3}}{\bar{P}(\text{Torr})}\ \text{cm}}$$

Bombeamento $P(t)$

Regime viscoso

Mostrar gráfico $\boxed{\frac{t}{V} \times Sb}$

$$\boxed{\frac{D^4}{L} = \frac{128\eta E}{\pi}}$$

para $L \to 0$ cm $E \to \infty$ então

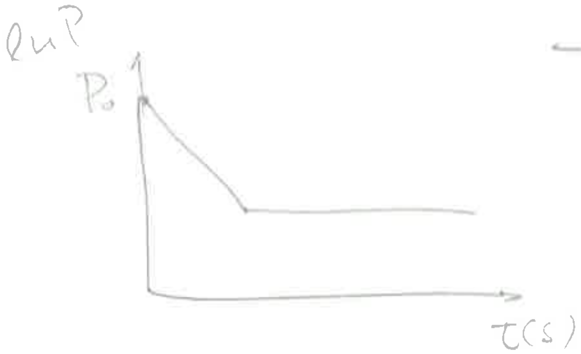
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{Sb} \ln \frac{P_i + P_i}{P + P}$$

$$\boxed{P = P_i \, e^{-\frac{Sb}{V} t}}$$

Regime molecular

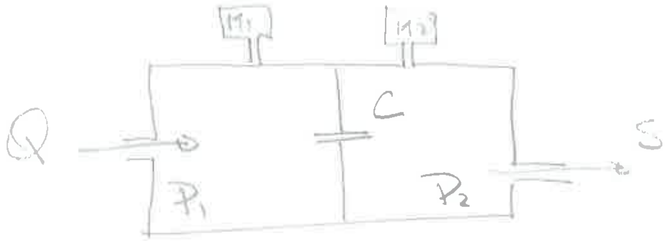
$$\boxed{P = P_0 \, e^{-\frac{S}{V} t} + P_{res}}$$

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}$$



Outros métodos para medidas de S e C

① Velocidade de bombeamento



Em condições estacionárias

$$\begin{cases} Q = C\Delta P = C(P_1 - P_2) \quad (I) \\ S = \dfrac{Q}{P_1} = \dfrac{Q}{P_2} \quad (II) \end{cases}$$

substituindo I em II

$$S = \frac{Q}{P_2} = \frac{C(P_1 - P_2)}{P_2} = C\left(\frac{P_1}{P_2} - 1\right)$$

Se a condutância for conhecida, então determina-se S.

No regime molecular C é cte

Se $S \gg C$ $\quad P_2 \ll P_1$ então

$$\boxed{S = C\frac{P_1}{P_2}}$$

(2) Medida de S pela variação do fluxo de massa (Q)

$$-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i$$

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} \quad \text{então} \quad \sum_i Q_i = P_{res}\, S$$

logo $$-V\frac{dP}{dt} = PS - P_{res}\, S$$

$$-V\frac{dP}{dt} = (P - P_{res})\, S$$

então $$\boxed{S = \frac{-V}{P - P_{res}}\frac{dP}{dt}}$$

③ Medida de S conhecendo-se P(t).

$$\boxed{P = P_0 e^{-\frac{S}{V}t} + P_{res}}$$

Para $P_{res} \ll P$

então $P = \frac{P_0}{e} = P_0 e^{-\frac{S}{V}t}$

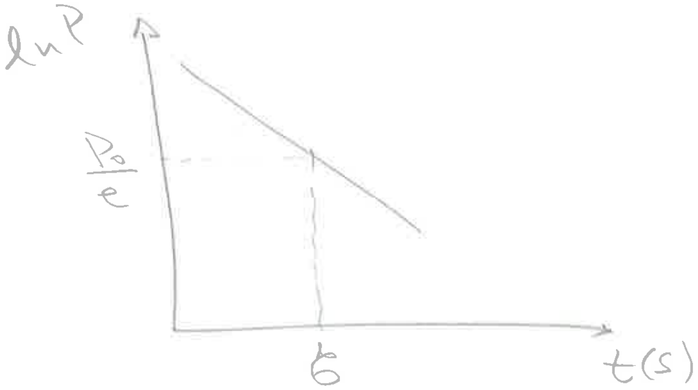
$$e^{-1} = \frac{\cancel{P_0}}{\cancel{P_0}} e^{-\frac{S}{V}t} \Longrightarrow e = e^{\frac{S}{V}t}$$

$$\ln e = \ln e^{\frac{S}{V}t} \longrightarrow 1 = \frac{S}{V}t$$

$$t = \frac{V}{S} \longrightarrow \boxed{\tau = V/S}$$

tempo de bombeamento característico do sistema

τ é a constante de bombeamento

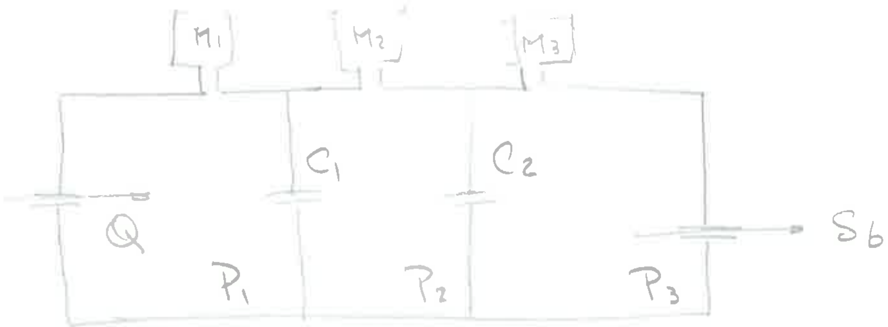


$T_{1/2} = \tau \ln 2$

$$P = P_0 e^{-t/\tau} \quad P = \frac{P_0}{2}? \longrightarrow \frac{P_0}{2} = P_0 e^{t/\tau}$$

$$\ln 2 = t/\tau \qquad \boxed{t = T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

(4) Medida da condutância.



$$Q = C_1 (P_1 - P_2)$$
$$Q = C_2 (P_2 - P_3)$$

Para C_2 conhecida

$$Q = C_1 (P_1 - P_2) = C_2 (P_2 - P_3)$$

$$C_2 = \frac{C_1 (P_1 - P_2)}{(P_2 - P_3)} \quad \text{ou} \quad C_1 = \frac{C_2 (P_2 - P_3)}{(P_1 - P_2)}$$

Se $S >> C \Longrightarrow P_3 << P_2$

$$\therefore \; C_1 = \frac{C_2 P_2}{P_1 - P_2} \Longrightarrow \boxed{C_1 = \frac{C_2}{\frac{P_1}{P_2} - 1}}$$

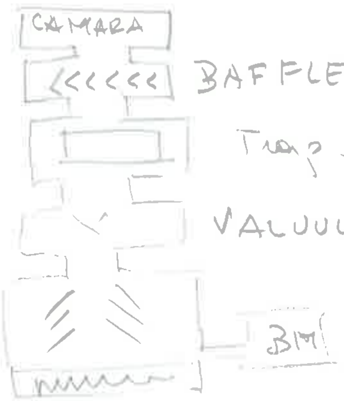
Para $C_2 >> C_1 \Longrightarrow P_2 << P_1$

Neste caso

$$\boxed{C_1 = \frac{P_2}{P_1} C_2}$$

Exercício 19 - lista 3

Bomba difusora $D = 3'' \sim 7{,}5\,cm$



Trap = abertura anular $\left\{ \begin{array}{l} L = 30\,cm \\ D_1 = 20\,cm \\ D_2 = 16\,cm \end{array} \right.$

VALVULA GAVETA ≡ duto $D = 8\,cm$, $L = 5\,cm$

ⓐ calcule S_{ef} da BD na boca do sistema sem N_2

$S_{BD} \sim 50\%\, C_0 = 50\%\, 9D^2$ (condutância do orifício)

$S_{BD} = 4{,}5\,(7{,}5)^2 = 253\,\ell/s$

3 impedâncias em série

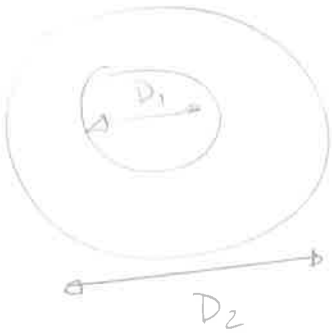
VALVULA + TRAP + BAFFLE

$C_{VALVULA} = \dfrac{12 D^3}{L}$ $\quad L = 5\,cm$, $D = 8\,cm$

$C_{VALVULA} = \dfrac{12(8)^3}{5} \sim 1228\,\ell/s$

$C_{BAFFLE} = 500\,\ell/s$

$C_{armadilha} = ?$



$$\begin{cases} D_1 = 16\ cm \\ D_2 = 20\ cm \\ L = 30\ cm \end{cases}$$

$$C = 9\left(D_2^2 - D_1^2\right)$$

$$C = 9\left(20^2 - 16^2\right) = 1296\ l/s$$ abertura anular

$$C_{duto\ anular} = \frac{12}{L}\left(D_2^3 - D_1^3\right)\left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right)$$

$$C_{duto\ anular} = \frac{12}{30}\left(20^3 - 16^3\right)\left(1 - \frac{16}{200}\right) = 312\ l/s$$

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i} = \frac{1}{1228} + \frac{1}{500} + \frac{1}{1296} + \frac{1}{312}$$

$$\boxed{C = 147\ l/s}$$ sem nitrogênio líquido

$$S_{ef} = \frac{S_b \times C}{S_b + C} = \frac{253 \times 147}{147 + 253} = 93\ l/s$$

(b) Calcule S_{ef} na boca do sistema com N_2 líquido

O N_2 líquido age apenas na armadilha

$$C \propto \sqrt{T}$$

$$\frac{C_{293}}{C_{77}} = \frac{\sqrt{293}}{\sqrt{77}} \simeq 1,95$$

$\frac{C_{77}}{C_{293}} \sim 0,51$ ou seja a condutância cai pela metade

abertura	1296 l/s	$\longrightarrow$	661 l/s
tubo	312 l/s	$\longrightarrow$	159 l/s

então:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{1228} + \frac{1}{500} + \frac{1}{661} + \frac{1}{159} \Rightarrow \boxed{C_T = 94 \ l/s}$$

$$S_{ef} = \frac{S_b C_T}{C_T + S_b} = \frac{253 \times 94}{94 + 253} = 68 \ l/s$$

Nesse cálculo foi admitida a conservação do throughput

A eficiencia da BD diminui.

(c) Aplicada a uma esfera de $D = 30\,cm$ com pressão de operação $P = 10^{-6}$ Torr, qual pode ser a máxima taxa de desgaseificação dessa câmara para se manter essa pressão de 10^{-6} Torr?

$$Q = PS = 10^{-6} \times 68$$

$$\therefore \quad Q = 6{,}8 \times 10^{-5} \ \frac{Torr\ \ell}{s}$$

$$D = 30\,cm \qquad A = 4\pi R^2 = 2826\,cm^2$$

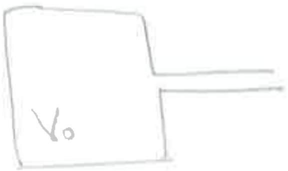
$$q = \frac{Q}{A} \qquad q = \frac{6{,}8 \times 10^{-5}}{2826} \ \frac{Torr\ \ell}{s\ cm^2}$$

$$\boxed{q = 2{,}5 \times 10^{-8} \ \frac{Torr\ \ell}{s\ cm^2}}$$

Exercício 5 lista 3 (Modificado)

Qual a massa de gás retirada de um sistema de vácuo?

Considere uma câmara com volume $V = 1\ell$ a uma pressão de 700 Torr



$$Q = PS = -V\frac{dP}{dt} = kT\frac{dN}{dt}$$

Regime Viscoso 700 Torr até 1 Torr

$\Delta t \sim 5\,seg$ bancada 2

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{700-1}{5} = 140\ \frac{Torr}{s}$$

$$Q = V\frac{\Delta P}{\Delta t} = 1\ 140 = 140\ \frac{Torr\,\ell}{s}$$

Se $k = 10^{-22}\ \frac{Torr\,\ell}{K}$

$T = 300K$

então

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = V\frac{\Delta P}{\Delta t}\frac{1}{kT}$$

$$\boxed{n = \frac{N}{V} = \frac{P}{kT}}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = 1\ 140\ \frac{1}{10^{-22}\ 300} \sim 5\times10^{21}\ \text{moléculas}/s$$

N_2 : $m = 53{,}1\times10^{-24}\,g$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t}\times m = 5\times10^{21}\times 53{,}1\times10^{-24}\,g = 0{,}3\,g/s$$

em $\Delta t = 5seg$ $\boxed{m_{total} = 1{,}5\,g}$

Neste intervalo de tempo qual a velocidade de bombeamento?

$$Q = PS \qquad \overline{P} = 350 \text{ Torr}$$

$$S = \frac{140}{350} \frac{\frac{\text{Torr } \ell}{s}}{\text{Torr}} = 0{,}4 \, \ell/s$$

$$\boxed{S = 25 \, \ell/min}$$

ou

$$\boxed{S = 1{,}5 \, m^3/h}$$

Exercício 2 - lista 3

A partir de qual livre caminho médio pode ser considerado regime molecular?

Considere (a) câmara esférica $D = 30\ cm$

(b) duto de 2" (5 cm)

Definição do regime depende do número de Knudsen

$$\boxed{N_k = \frac{\lambda}{D}} \qquad \boxed{\lambda = \frac{5\times10^{-3}}{P(Torr)}\ (cm)}$$

Regime molecular $DP \leq 10^{-2}$ em Torr cm

Substituindo $D \times \frac{5\times10^{-3}}{\lambda} \leq 10^{-2}$

$$\frac{D}{\lambda} \leq \frac{10^{-2}}{5\times10^{-3}} \Longrightarrow \boxed{\lambda = 5\times10^{-1} D}$$

D é a dimensão do sistema

(a) Para $D = 30\ cm$

$\lambda \geq 5\times10^{-1} \times 30 \therefore \boxed{\lambda \geq 15\ cm}$

(b) Para duto de $D = 5\ cm$

$\lambda = 5\times10^{-1}\,(5)$

$$\boxed{\lambda \geq 2{,}5\ cm}$$

Exercício 3 - lista 3

À partir de qual pressão pode ser considerado regime molecular?

$D P \leq 10^{-2}$ Torr cm $\Longrightarrow$ $\boxed{P \leq \frac{10^{-2}}{D} \text{ em Torr}}$

(a) $D = 30$ cm

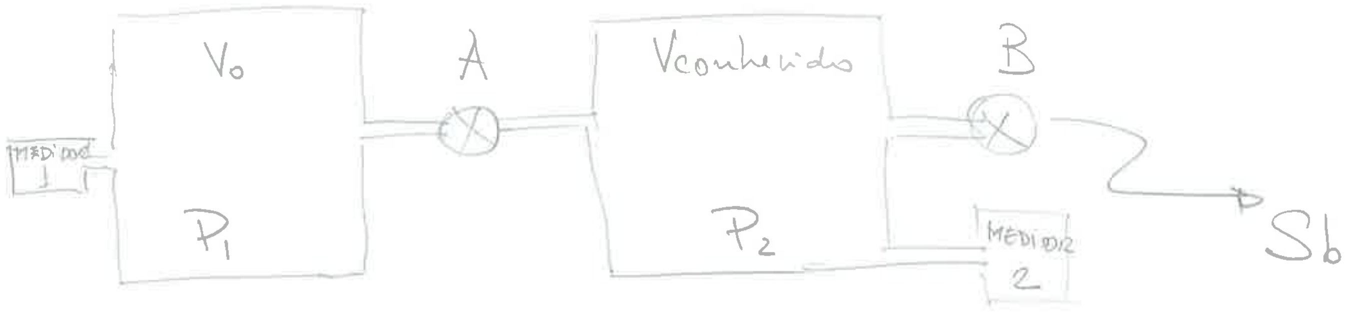
$\boxed{P \leq 3 \times 10^{-4} \text{ Torr}}$

(b) $D = 5$ cm

$\boxed{P \leq 2 \times 10^{-3} \text{ Torr}}$

Exercício 23 - lista 2

Determinar o volume V_0



Temperaturas iguais

$$PV = NkT$$

$$P_1 V_0 + P_2 V = P_{final}(V_0 + V)$$

① Bombeamento em Vconhecido

② Válvula B fechada

③ Valvula A aberta

O número de moléculas é mantido

$$(P_1 - P_{final})V_0 = (P_{final} - P_2)V$$

$$V_0 = \frac{P_{final} - P_2}{P_1 - P_{final}} V_{conhecido}$$