AULA 14

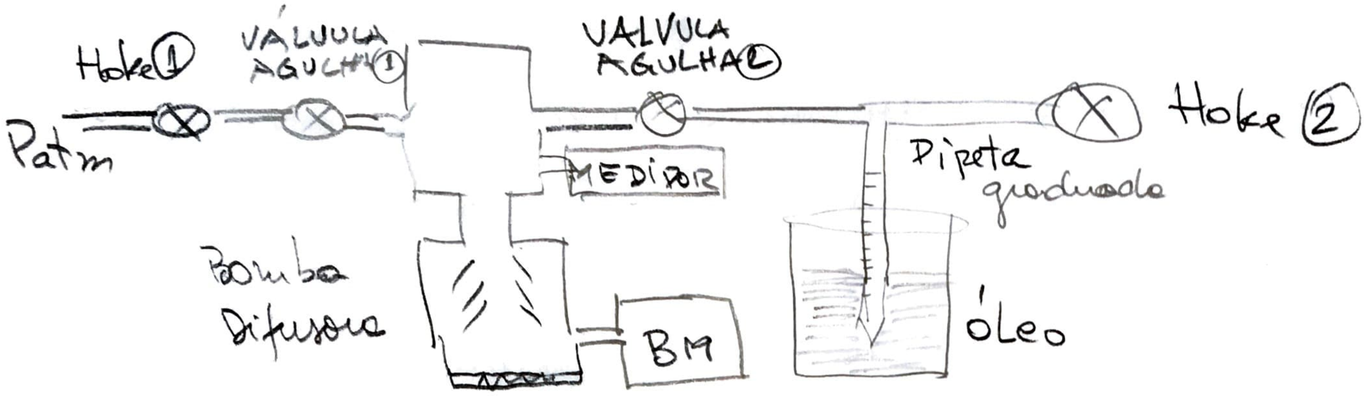
Ciência e Tecnologia do Vácuo

- 2020 -

1

12/05/20

Sistema para o estudo de vazamentos



① Medida da pressão em função do tempo $P(t)$

- bombeamento até 10^{-6} Torr
- Todas as válvulas fechadas
- Abrindo a válvula agulha 1, a pressão pode ser ajustada até 10^{-3} Torr. A válvula Hoke ① deve estar aberta.

Fechando-se a válvula agulha ① pode-se medir a pressão em função do tempo $P(t)$

Com um sistema computadorizado é possível medir a partir da Pressão atmosférica.

② Simulando um vazamento REAL

bombeamento até 10^{-6} Torr

Através da válvula agulha ①, pode-se elevar a pressão até 10^{-5} Torr

Com a válvula agulha 2 aberta, a pressão pode atingir um valor de pressão mais alto ($P \sim 10^{-3}$ Torr)

Fechando-se a válvula agulha 2 pode-se medir $P(t)$, com a válvula Hoke aberta, estamos simulando um vazamento REAL.

③ Simulando um vazamento VIRTUAL.

Nas mesmas condições do item anterior, com a válvula Hoke ① FECHADA estamos simulando um vazamento VIRTUAL.

Parâmetros do Sistema

MOSTRAR SLIDE

- Sistema sem vazamentos
- Vazamento Real
- Vazamento VIRTUAL

Situação Inicial

- Bombeamento até 10^{-6} Torr

Com a válvula agulha 1 a pressão é elevada até 10^{-5} Torr
Com a válvula agulha 2 a pressão é elevada até 8×10^{-4} Torr
Fechando-se a válvula agulha 2 foi medida a pressão em função do tempo $P(t)$.

→ Com a válvula Hoke 1 aberta temos vazamento REAL
⇒ Com a válvula Hoke 2 fechada temos vazamento VIRTUAL

Ref. Apostila Helcio Onusic e Luiz Marcos

CÁLCULOS

1 Vazamento REAL (VIDE GRÁFICO)

$$P_{res} = \frac{C_R P_{atm}}{S} \qquad C_R = \frac{P_{res} \, S}{P_{atm}}$$

$$C_R = \frac{10^{-5} \times S}{700}$$ sendo $S = 50 \, l/s$ (vide gráfico)

então $$C_R = \frac{10^{-5} \times 50}{700} = 7 \times 10^{-7} \, l/s$$

Mas, $C_o = 9D^2$

então $$D^2 = \frac{7 \times 10^{-7}}{9}$$

$$\therefore \boxed{D = 2,8 \times 10^{-4} \text{ cm}}$$

$$D = 2,8 \, \mu m$$

VAZAMENTO VIRTUAL

$\boxed{S = 50\,\ell/s}$ → Simula-se fechando-se a valvula Hoke 1

$$\boxed{P_{Res} = \frac{C_{VV} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{VV}}{V_c} t}}$$ VAZAMENTO VIRTUAL

Podemos estimar $\frac{C_{VV} P_0'}{S}$ diretamente do gráfico.

$$\frac{C_{VV} P_0'}{S} = 10^{-5}$$

$$C_{VV} = \frac{50 \times 10^{-5}}{700} \Rightarrow \boxed{C_{VV} = 7 \times 10^{-7}\,\ell/s}$$

Leitura do Gráfico

$$\frac{C_{VV} P_0'}{S} = 10^{-5}\ \text{Torr}$$

$P_{res} = 7 \times 10^{-6}$ Torr em 1000 s

$$P_{res} = \frac{C_{VV} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{VV}}{V_c} t}$$

$$\ln \frac{P_{res}}{\frac{C_{VV} P_0'}{S}} = \ln e^{-\frac{C_{VV}}{V_c} t}$$

$$\Rightarrow \ln \frac{P_{res}}{10^{-5}} = -\frac{C_{VV}}{V_c} t$$

$$V_c = \frac{C_{VV}\, t}{\ln\left(\frac{10^{-5}}{7 \times 10^{-6}}\right)} = \frac{7 \times 10^{-7} (1000)}{\ln\left(\frac{10^{-5}}{7 \times 10^{-6}}\right)}$$

$$\therefore \boxed{V_c \cong 2\,m\ell}$$

Exercício: Vazamento VIRTUAL

(a) Qual o tempo para esse sistema atingir uma pressão sem vazamento de 2×10^{-6} Torr?

$$P = P_0\, e^{-\frac{C_{xv}}{V_c} t}$$

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{C_{vx} t}{V_c} \Rightarrow \ln \frac{P_0}{P} = \frac{C_{xv}}{V_c} t$$

$$\therefore \boxed{t = \frac{V_c}{C_{xv}} \ln \frac{P_0}{P}}$$

substituindo os valores

$$t = \frac{2\times10^{-3}}{7\times10^{-7}} \ln \frac{10^{-5}}{2\times10^{-6}}$$

$$t = 4598\,s \longrightarrow \boxed{t \cong 1{,}3 \text{ horas}}$$

(b) Qual o diâmetro da abertura equivalente?

$$C_o = 9D^2 \qquad D^2 = \frac{7\times10^{-7}}{9} \Rightarrow \boxed{D = 3\times10^{-4}\,cm}$$

$3\,\mu m$

OBS. Os vazamentos virtuais não são fáceis de serem detectados por estarem no interior das câmaras e acarretam uma queda de pressão muito lenta

Deve-se sempre ter cuidado para se evitar a formação de cavidades internas conectadas ao sistema através de impedâncias altas.

EXERCÍCIO: Vazamento Virtual

ⓐ Suponha $V_c = 10^{-5}\,\ell$ conectado a um capilar de diâmetro $D = 10^{-4}$ cm ($1\,\mu m$) e comprimento $L = 2$ cm

Qual o tempo necessário para a pressão cair por um fator 10? [Regime molecular]

$$P = P_0\, e^{-\frac{C_{xr}}{V_c} t} \Rightarrow \boxed{t = \frac{V_c}{C_{xx}} \ln \frac{P_0}{P}}$$

$$C_{xr} = \frac{12 D^3}{L} = 6 \times 10^{-12}\ \ell/s$$

$V_c = 10^{-5}\,\ell$ então $t = \dfrac{10^{-5}}{6\times 10^{-12}} \ln 10 \Rightarrow \boxed{t = 44 \text{ dias}}$

ⓑ Na pressão atmosférica, qual o número de moléculas nesse cavidade a $T = 300$ K?

$$\boxed{N_x = \frac{PV}{kT}} \qquad V_c = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$\begin{cases} k = 10^{-22}\ \dfrac{\text{Torr}\,\ell}{K} \\ k = 10^{-19}\ \dfrac{\text{Torr}\,cm^3}{K} \end{cases} \qquad N_x = \frac{700\,(10^{-5})}{10^{-22}\,(300)} \sim 2\times 10^{17} \text{ moléculas}$$

ⓒ Qual a área equivalente que teria esse número de moléculas em uma mono camada? $\delta_{N_2} = 3{,}7\times 10^{-8}$ cm

Área ocupada por uma molécula $A = \dfrac{\pi \delta^2}{4}$

MONO CAMADA

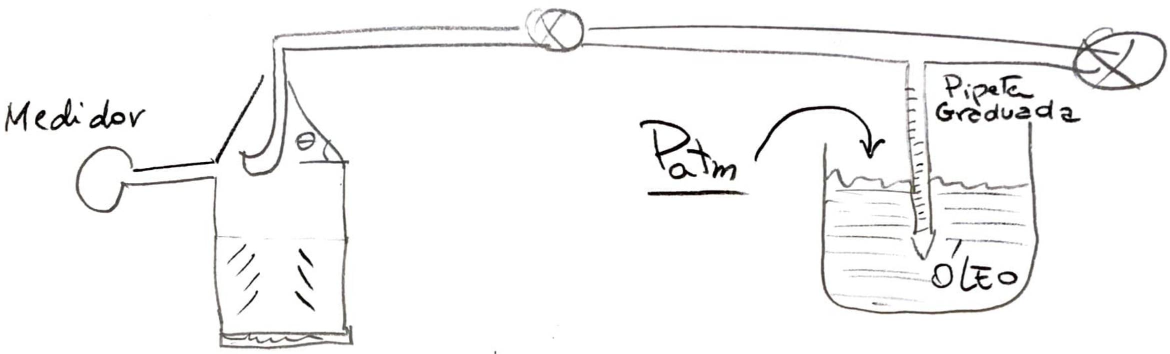
$$\frac{\text{nº de partículas}}{cm^2} = \frac{1}{A} = \frac{4}{\pi \delta^2} \sim 10^{15} \text{ moléculas}/cm^2$$

A área total equivalente para se ter 2×10^{17} moléculas seria então uma área de 200 cm²

i.e. uma placa de (20×10) cm²

Método da Pipeta

Método para a medida de velocidade de bombeamento. (Norma internacional)



$P_{atm} - P_x \simeq h$ altura da coluna de óleo

Fluxo de massa ou throughput é constante ao longo do sistema.

$$Q = PS$$

$$Q = P_s S = P_x \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$P_{atm} - P_x = h$$

$$P_{atm} \simeq 700 \text{ Torr}$$

h é a altura da coluna de óleo

$$\rho_{Hg} = 13{,}6 \, g/cm^3 \; ; \; \rho_{óleo} \simeq 0{,}84 \, g/cm^3$$

$$2cm \text{ óleo} \sim 0{,}1 \text{ cm Hg}$$

$$\rho_{óleo} \times h_{óleo} = y_{Hg} \, \rho_{Hg}$$

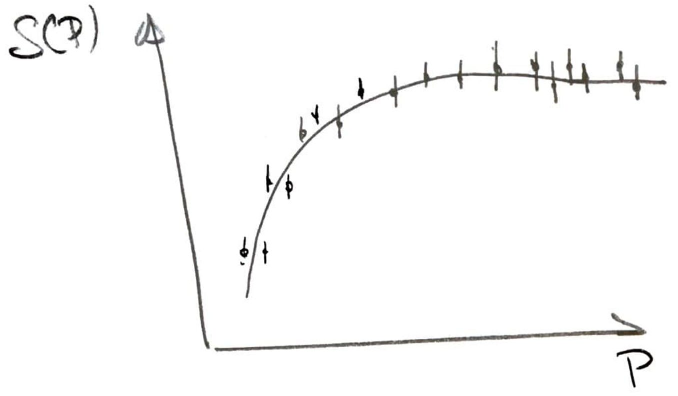
$$\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{óleo}} \sim 20$$

então $y_{Hg} \sim 0{,}1$ cm ou 1 mm Hg

$$\boxed{P_{ATM} = 11{,}25 \text{ m de óleo}}$$

$$① = P_s S = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Velocidade de bombeamento



$$\boxed{S_b = \frac{P_{atm}}{P_s} \frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

Mas, $P_{res} = \frac{Q_{degas}}{S}$ $\therefore$ $\boxed{Q_{degas} = P_{res} S}$

então $S P_s = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t} + P_{res} S$

$$S (P_s - P_{res}) = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$\therefore \boxed{S = \frac{P_{atm}}{P_s - P_{res}} \frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

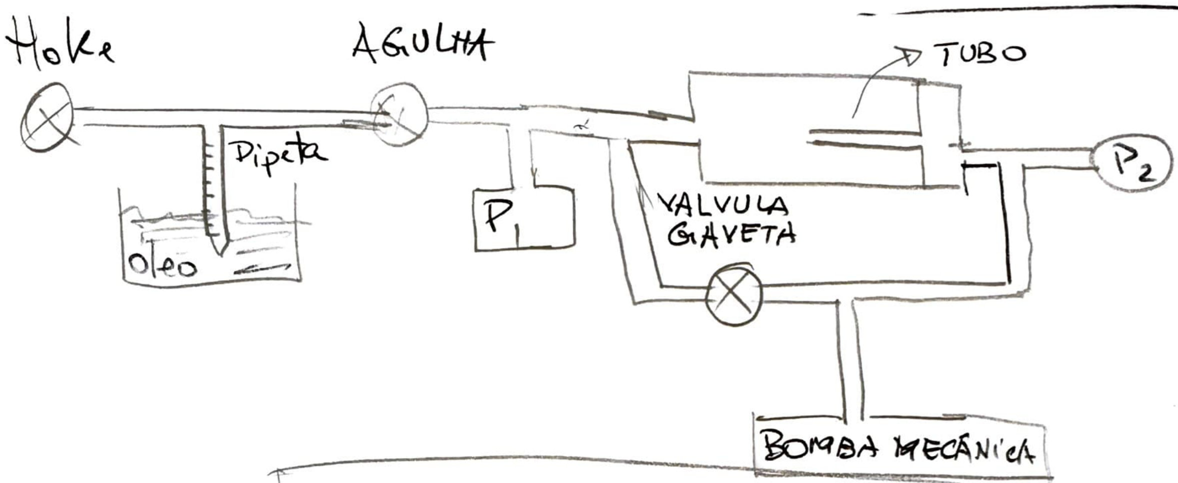
Deve-se medir P_{res} com todas as válvulas fechadas antes e depois das medidas!!

Medidas de Condutância

Método da Pipeta

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

$$\boxed{C_{exp} = \frac{PS}{P_A - P_B}}$$



$$\boxed{C_{exp} = P_{atm} \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{1}{P_1 - P_2}}$$

$P_1\,res \neq P_2\,res$

(a) O que significa a CONDUTÂNCIA?

$$Q = C\Delta P = C(P_{atm} - \cancel{P_{SISTEMA}}) = \frac{\Delta V}{\Delta t} P_x$$

0

$$Q = C P_{atm} = \frac{\Delta V}{\Delta t} P_x$$

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{P_x}{P_{atm}} \quad \text{mas } P_x \sim P_{atm}$$

então $C \sim \dfrac{\Delta V}{\Delta t}$

(b) Por que o método funciona?

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{10^{-3}}{P_{atm}} = \frac{10^{-3}}{700} \sim 10^{-6} \ l/s$$

$$10^{-6} \ l/s = 10^{-3} \frac{ml}{s} = 10^{-3} ml \left(\frac{60}{min}\right)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \sim 0{,}1 \ ml/min$$

Quantidade mensurável.

A agulha estrangula o sistema!

Condutâncias

Regime viscoso $\quad C_{N_2} = \frac{180 D^4 \bar{P}}{L}$

Regime molecular $\quad C_{N_2} = \frac{12 D^3}{L}$

Intermediário

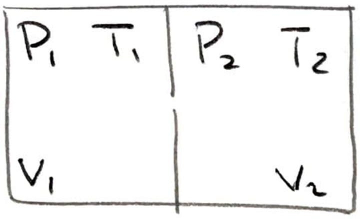
$$\boxed{C_{int} = C_v + \alpha C_m}$$

$$C_{int} = C_m \left(\frac{0{,}074 D}{\bar{\lambda}} + 1 \right)$$

$$\alpha = \frac{1 + \frac{125 D}{\bar{\lambda}}}{1 + 1{,}55 \frac{D}{\bar{\lambda}}}$$

$$\boxed{\bar{\lambda} = \frac{5 \times 10^{-3}}{\bar{P} \text{ (Torr)}} \quad [cm]}$$

Determinar a expressão da condutância de um orifício para temperaturas diferentes.



$$T_1 \neq T_2$$

$$Q = P\frac{\Delta V}{\Delta t} = kT\frac{\Delta N}{\Delta t} \qquad \nu = \frac{\text{nº de moléculas}}{\text{área tempo}} \Rightarrow \nu = \frac{1}{4} n \bar{v}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \nu A \quad \therefore \quad Q = kT\nu A = \frac{kT n \bar{v} A}{4} \qquad \begin{aligned} \bar{v} &= \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \\ n &= \frac{P}{kT} \end{aligned}$$

$$Q_T = Q_1 - Q_2$$

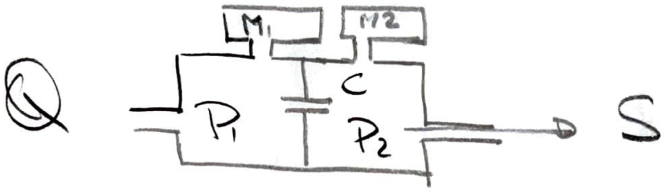
$$Q_T = \sqrt{\frac{k}{2\pi m}}\, A \left(\sqrt{T_1}\, P_1 - \sqrt{T_2}\, P_2\right)$$

$$Q = C\Delta P \implies Q = C(P_1 - P_2)$$

$$\boxed{C = A\sqrt{\frac{k}{2\pi m}} \left(\frac{\sqrt{T_1}\, P_1 - \sqrt{T_2}\, P_2}{P_1 - P_2}\right)}$$

Métodos Alternativos para medidas de C e S

① Velocidade de Bombeamento



Em condições estacionárias

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

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 determinamos S

No regime molecular C é constante

se $S \gg C$ $P_2 \ll P_1$ então

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

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

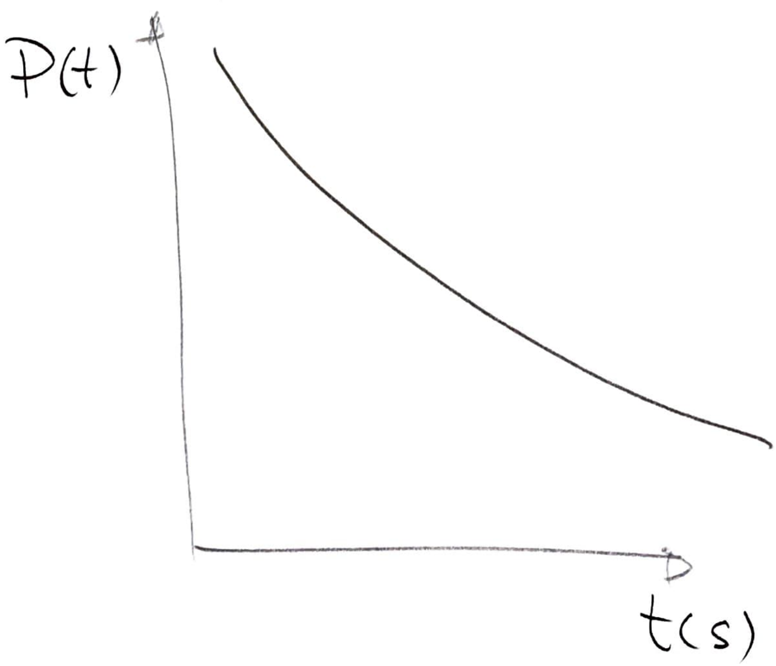
Equação Geral $\boxed{-V\frac{dP}{dt} = PS - \sum_i Q_i}$

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

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

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

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



3 Medida de S conhecendo-se P(t)

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

Para $P_{res} \ll P_0 e^{-\frac{S}{V}t}$

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

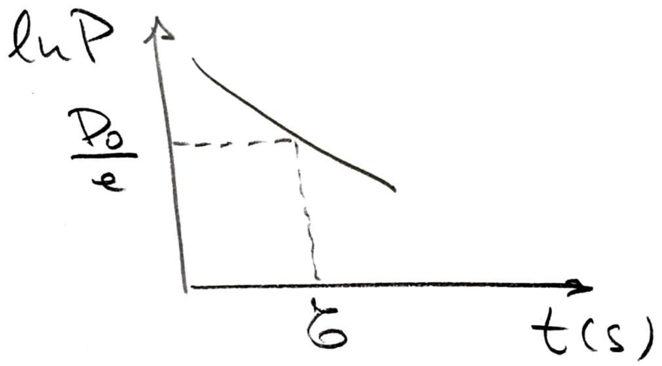
$$e^{-1} = \frac{P_0}{P_0} e^{-\frac{S}{V}t} \Longrightarrow e = e^{\frac{S}{V}t}$$

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

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

tempo de bombeamento característico do sistema

τ é a constante de bombeamento



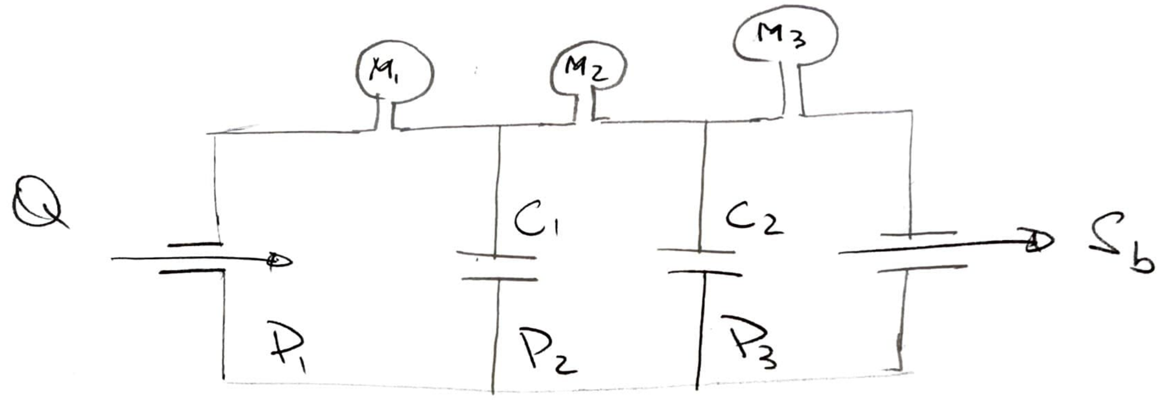
$T_{1/2} = \tau \ln 2$

$$P = P_0 e^{-t/\tau} \qquad P = \frac{P_0}{2} ? \Longrightarrow \frac{P_0}{2} = P_0 e^{-\frac{S}{V}t}$$

$$\ln 2 = t/\tau$$

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

④ Medida da Condutância



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

Para C_2 conhecida

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

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

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

$$\therefore \quad C_1 = \frac{C_2 P_2}{P_1 - P_2} \Rightarrow \boxed{C_1 = \frac{C_2}{\frac{P_1}{P_2} - 1}}$$

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

Neste caso

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