AULA 10 — Ciência e Tecnologia do Vácuo — 2018 — (1) — 5/04/18

- Passar lista de presença
- Distribuir lista 3

Resumo da aula anterior

Bombeamento no regime viscoso

$$Q = -V\frac{dP}{dt} \qquad Q = C\,\Delta P \qquad C = \frac{\pi}{128\eta}\frac{D^4\bar{P}}{L} = E\bar{P}$$

$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} \qquad Q = P S_{ef} = \frac{P S_b E\bar{P}}{S_b + E\bar{P}} \qquad \bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

APÓS UM BREVE DESENVOLVIMENTO →

Equação do 2º grau

$$\boxed{-\frac{V^2 E}{S_b^2}\left(\frac{dP}{dt}\right)^2 + \frac{2V}{E}\left(\frac{dP}{dt}\right) + P^2 = 0}$$

$$\frac{t}{V} = \frac{1}{E}\left[\frac{1}{P} - \frac{1}{P_i}\right] + \frac{1}{S_b}\left[\frac{((S_b/E)^2 + P^2)^{1/2}}{P} - \frac{((S_b/E)^2 + P_i^2)^{1/2}}{P_i}\right] +$$

$$+ \frac{1}{S_b}\left(\ln \frac{P_i + ((S_b/E)^2 + P_i^2)^{1/2}}{P + ((S_b/E)^2 + P^2)^{1/2}}\right)$$

MOSTRAR GRÁFICO $[S_b \times t/V]$

parâmetro geométrico $\dfrac{D^4}{L} = \dfrac{128\eta E}{\pi}$

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

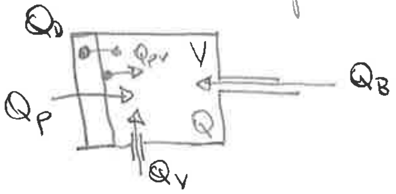
$$\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i + P_i}{P + P} \Rightarrow \boxed{\frac{t}{V} = \frac{1}{S_b}\ln\frac{P_i}{P}}$$

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

Bombeamento no Regime Molecular

$$DP \leq 10^{-2} \text{ Torr em}$$

fontes de gases



$$Q_G = Q_V + Q_{PV} + Q_B + Q_D + Q_P$$

$$Q_G = \sum_i Q_i$$

Equação Geral

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

Depois de um longo tempo $\frac{dP}{dt} \sim 0$ então $PS = \sum_i Q_i$

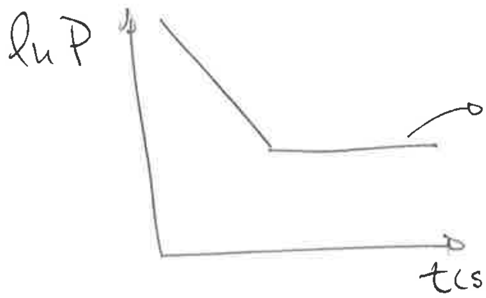
logo

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

Fontes de gases
×
Velocidade de bombeamento

Resolvendo a equação diferencial

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



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

Constante de bombeamento $\tau = V/S$

$T_{1/2}$ $P = \frac{P_0}{2}$ substituindo $\frac{P_0}{2} = P_0\, e^{-\frac{S}{V}t} = \frac{1}{2} = e^{-\frac{S}{V}t}$

então $2^{-1} = e^{-\frac{S}{V}t} \Rightarrow -\ln 2 = -\frac{S}{V}t \ln e^{1}$

então $t = \frac{V}{S}\ln 2$

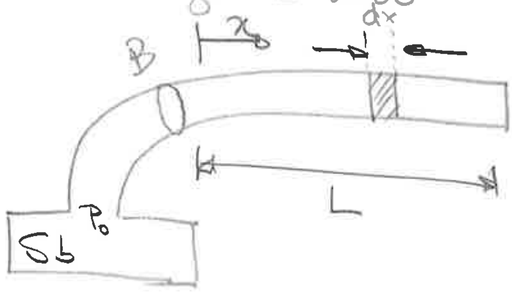
$$\boxed{T_{1/2} = \tau \ln 2}$$

Perfil da Pressão ao longo do tubo

A. Roth

Na condição estacionária $P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S}$; $Q_G = \sum Q_i$

A condição estacionária é caracterizada por um gradiente da pressão ao longo do tubo



Supondo uma bomba de vácuo bombeando um tubo longo, de condutância C, fechado na outra extremidade.

Considere q a taxa de desgaseificação $\left[\frac{Torr\,l}{s}\,\frac{1}{cm^2}\right]$

$-dQ = q\,B\,dx$ (I) B é o perímetro do tubo

O sinal negativo indica que o fluxo de massa se desloca para valores negativos de x.

O throughput que passa por um elemento de comprimento dx é dado por:

Como $Q = C\Delta P$ $\Rightarrow$ $\boxed{Q = C\,dP\,\frac{L}{dx}}$

Podemos escrever a relação:

$$dQ = C\,L\,\frac{d^2P}{dx^2}\,dx \qquad (\text{II})$$

$$\frac{d^2P}{dx^2} = \frac{dQ}{dx}\frac{1}{CL} \quad ; \text{ mas } \quad \frac{dQ}{dx} = -qB \quad \text{equação (I)}$$

então $\boxed{\dfrac{d^2P}{dx^2} = -\dfrac{qB}{CL}}$ integrando em x

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{qBx}{CL} + k_1$$

Condição de contorno para calcular k_1

No final do Tubo $\left.\dfrac{dP}{dx}\right|_{x=L} = 0$ em $x = L$

então $k_1 = \dfrac{qB}{C}$

logo $\dfrac{dP}{dx} = -\dfrac{qBx}{CL} + \dfrac{qB}{C}$ integrando novamente

$$P(x) = -\frac{qBx^2}{2CL} + \frac{qBx}{C} + k_2$$

Condição de contorno que permite calcular k_2

Na boca do tubo $x = 0 \Rightarrow P = P_0$

então $k_2 = P_0$

Mas, $Q = PS$ e $Q = qA$ ← Área do tubo $\underline{A = BL}$

então $P_0 = \dfrac{qA}{S}$, portanto:

$$\boxed{P_0 = \frac{qBL}{S_b}}$$

então: $$P_x = qB\left[\frac{L}{S_b} + \frac{x}{C} - \frac{x^2}{2LC}\right]$$

Portanto o perfil da pressão segue uma parábola com concavidade para baixo.

Os valores de pressão serão dados por:

$$P_x - P_0 = qB\left[\frac{x}{C} - \frac{x^2}{2LC}\right]$$ pois $P_0 = \frac{qBL}{S_b}$

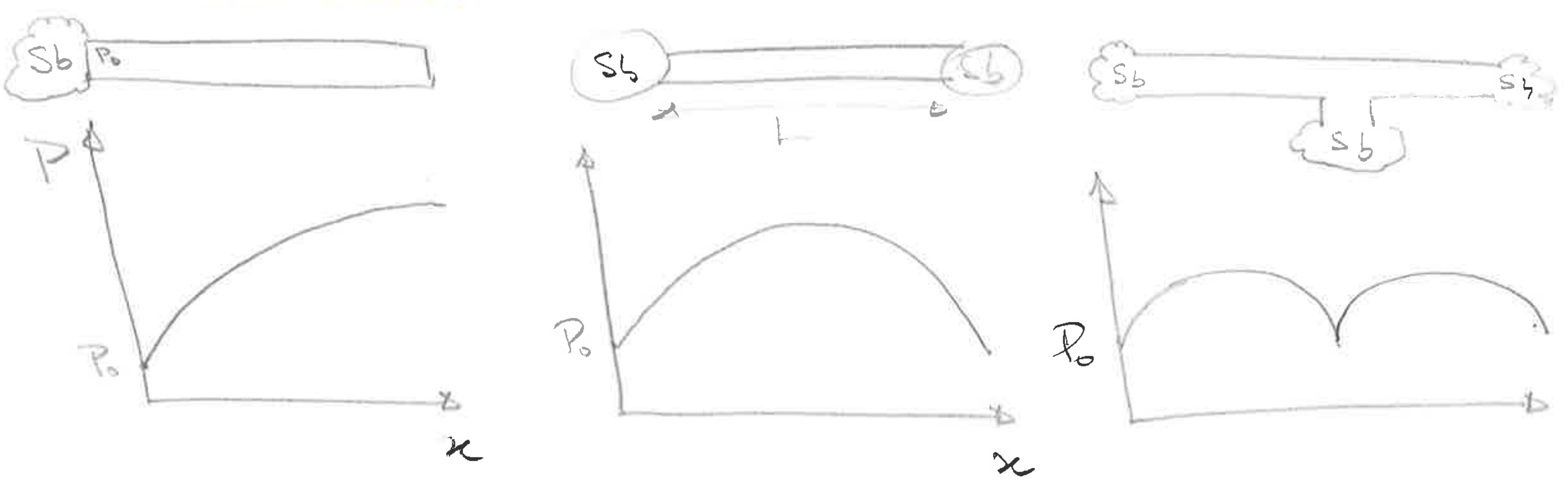
Para P_L, vem

$$P_L - P_0 = qB\left[\frac{L}{C} - \frac{L^2}{2LC}\right] = \frac{qBL}{2C}$$

$$\therefore \boxed{P_L - P_0 = \frac{qBL}{2C}}$$ Independe de S pressão

Devido a esse resultado, para se bombear tubos muito longos (aceleradores de partículas: Pelletron, RHIC, LHC) deve-se colocar um grande número de bombas ao longo do tubo!

MOSTRAR SLIDES



VAZAMENTOS

Modelos de técnicas de detecções

Tópicos a serem abordados

(a) Vazamento real (cte)
(b) Vazamento virtual (depende do tempo)
(c) Dimensão dos vazamentos
(d) Outras fontes de gases
- permeações
- difusão
- desgaseificações.

Lembrando:

Regime Viscoso ($\lambda << D$)

$$S_{ef} = \frac{S_b \, C_{viscoso}}{S_b + C_{viscoso}} \Rightarrow \boxed{S_{ef} \cong S_b}$$

Regime Molecular ($\lambda >> D$)

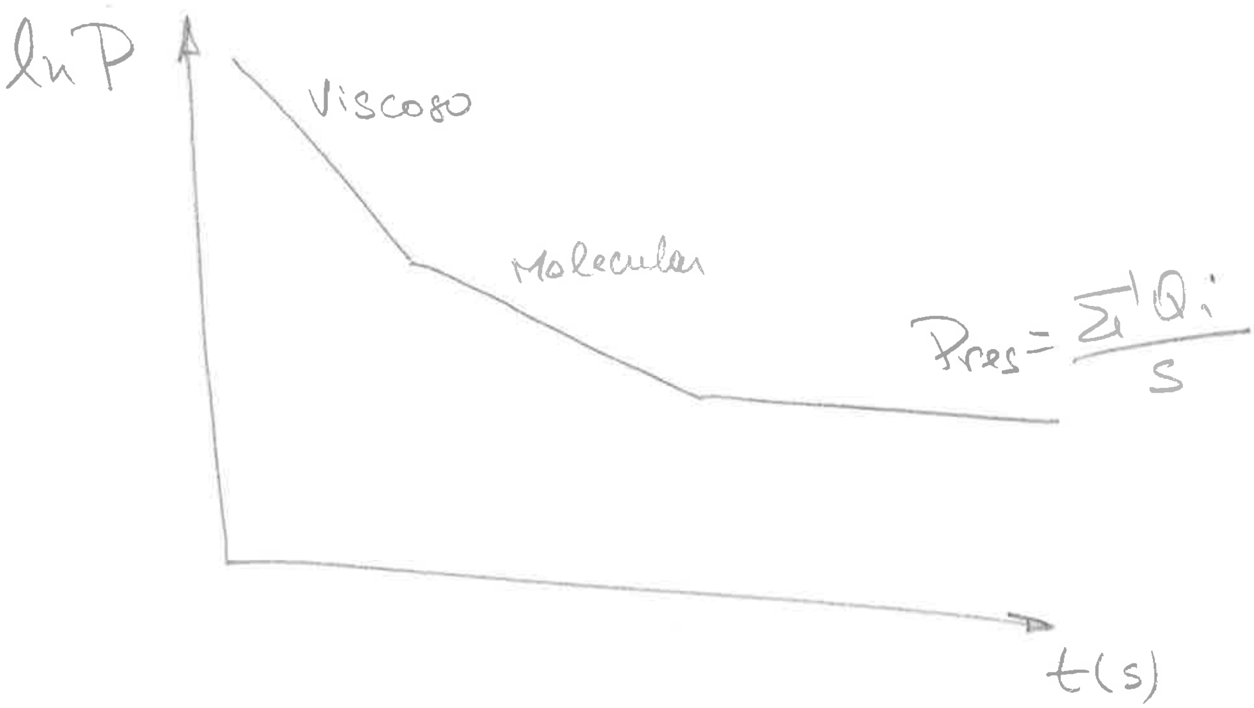
$$S_{ef} = \frac{C_{molecular} \, S_b}{C_{molecular} + S_b}$$

Depende da condutância

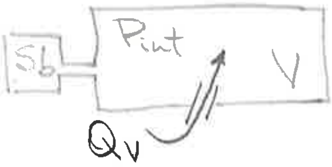
Como a velocidade de bombeamento efetiva muda com o regime de escoamento, então o gráfico mono-log que descreve $P(t)$ deve apresentar duas retas com constantes de tempo do sistema diferentes

$$\boxed{\tau = V/S}$$

$$\boxed{P = P_0 \, e^{-t/\tau}}$$



VAZAMENTO REAL



Suponha um sistema conectado à pressão externa (ambiente) através de uma abertura de geometria variável.

O throughput (Q) pode ser relacionado com a condutância dessa abertura ou ranhura através da equação:

$$Q = C\Delta P \Longrightarrow Q = C\,(P_{ext} - P_{int})$$

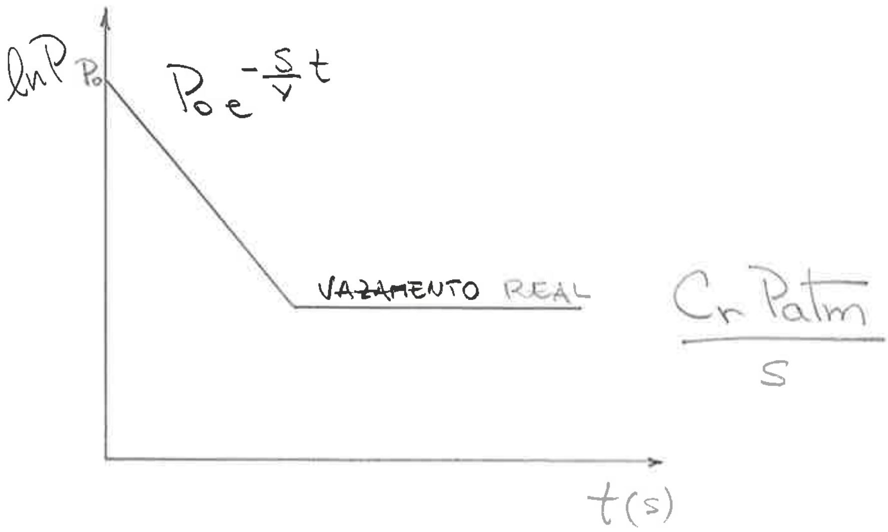
Supondo um único vazamento no sistema, temos que a pressão residual será:

$$P_{res} = \frac{\sum_i Q_i}{S} \Longrightarrow P_{res} = \frac{Q_V}{S} \quad ; \quad \boxed{Q_V = C\,P_{ext}}$$

Na maioria dos casos,

$$P_{res} \cong \frac{C\,P_{ext}}{S} \qquad \text{pois } P_{ext} >> P_{int}$$

então $\boxed{P_{res} = \frac{C_R\,P_{atm}}{S}}$ C_R é a condutância do vazamento real



EXEMPLO   Bomba difusora de 4" (10,2cm)

$$P_{sistema} = 10^{-6}\ \text{Torr}$$

Considerando $C \sim S_b$

Suponha que a pressão não diminui abaixo de 10^{-5} Torr devido a um vazamento real. Estime a abertura equivalente desse orifício

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

desprezando as outras fontes de gás

$$\boxed{P_{res} = \frac{Q_{VAZAMENTO}}{S_{ef\ \text{bomba difusora}}}}$$

$$S_{BD} = 50\%\ C_o$$

C_o é a condutância de uma abertura circular (furo)

$$C_o = 9D^2 \Longrightarrow S_{BD} = 4,5D^2$$

$$\left\{\begin{array}{l} S_{BD} \simeq 450\ l/s \\ C = 450\ l/s \end{array}\right.$$

suposição do início do problema.

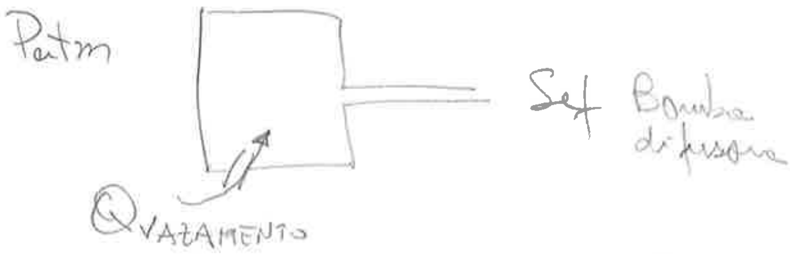
$$S_{ef} = \frac{S_b C}{S_b + C} = \frac{450 \times 450}{450 + 450} \simeq 225\ l/s$$

$$P_{res} = 10^{-5}\ \text{Torr}$$

$$Q_v = 10^{-5}\ \text{Torr}\ 225\ l/s$$

$$\boxed{Q_v = 2,3 \times 10^{-3}\ \frac{\text{Torr}\ l}{s}}$$

Suponha a seguinte situação:



$Q_V = C_{VAZAMENTO}(P_{atm} - P_{sistema})$ $P_{atm} \gg P_{sistema}$

- No Regime molecular

$C_o = 9D^2$ então $\boxed{Q_V = 9D^2 \, P_{atm}}$

- No Regime viscoso

$C = 20A$ p/ $P_2 < 0,1 P_i$

então $C = 20\frac{\pi D^2}{4}$ ∴ $C_{viscoso} = 15 D^2$ MOSTRAR SLIDE

As condutâncias têm a mesma ordem de grandeza

substituindo:

$$Q_V = 2,25 \times 10^{-3} \frac{Torr\,\ell}{s}$$

$2,25 \times 10^{-3} = 9D^2\, \underline{700}$ ∴ $\boxed{D = 6 \times 10^{-4}\, cm}$ ESSE É O TAMANHO DA ABERTURA

$D \sim 6\,\mu m$ menor do que um fio de cabelo.

Comentários

Em um sistema "sujo" a taxa de emissão de moléculas por desgaseificação é da ordem de $10^{-6} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}$

A taxa de desgaseificação em um sistema "limpo" é bem menor, da ordem de $10^{-9} \frac{Torr\,\ell}{s\,cm^2}$

Considerando que o fluxo de massa (Q_v) calculado para a abertura seja proveniente da desgaseificação das paredes da câmara de D=20cm

$$A = 4\pi R^2 = \pi D^2 = 1256\ cm^2,$$ então:

$$q_v = \frac{Q_v}{area} = \frac{2{,}25 \times 10^{-3}}{1256} \frac{Torr\ l}{s\ cm^2} \simeq 1{,}8 \times 10^{-6} \frac{Torr\ l}{s\ cm^2}$$

ou seja, o vazamento calculado é praticamente uma fonte de gás permanente, da mesma ordem de grandeza da taxa de desgaseificação de um sistema "SUJO"!!

EXERCÍCIO: Qual seria o vazamento equivalente desse sistema quando limpo?

taxa de desgaseificação

$$q = 10^{-9} \frac{Torr\ l}{s\ cm^2} \Longrightarrow Q = q\,A = 10^{-9} \times 1256 \cong 1{,}2\ 10^{-6} \frac{Torr\ l}{s}$$

$$Q_v = C\,\Delta P = C(P_{ext} - \cancel{P_{int}}^{\,0}) = C\,P_{ext} = C\,P_{atm}$$

$$C_v = 9D^2 \frac{l}{s} \qquad P_{atm} = 700\ Torr$$

então: $$1{,}2 \times 10^{-6} \frac{Torr\ l}{s} = 9D^2\, 700$$

$$D^2 = 1{,}2 \times 10^{-10}$$

$$\therefore \boxed{D = 1{,}1 \times 10^{-5}\ cm}$$

1000 Å

A mensagem mais importante dessas estimativas é que os vazamentos devem ser evitados SEMPRE

Exemplos de vazamentos reais:

- Ranhuras/Riscos nas peças
- falhas nas soldas
- O'Rings partidos ou velhos

Como detectar vazamentos reais

1. Leitura dos manômetros
2. Conhecimento prévio do comportamento do sistema de vácuo
3. Ouvir o vazamento
4. Usar alcool isopropílico (seringa)

→ Inicialmente o furo é tampado pelo alcool
→ Depois a leitura do valor da pressão aumenta muito por causa de estar num ambiente com alcool ao invés de ar (medidores Pirani)

Lembrando: Medidores têm comportamentos distintos dependendo do gás.

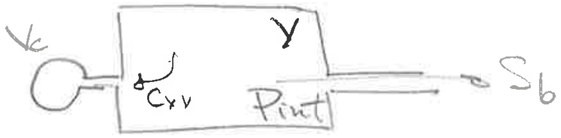
5. Usar um detector de vazamentos

⇒ Espectrômetro de He

Vazamento Virtual

Este vazamento consiste em um volume de gás aprisionado internamente no sistema de vácuo, sendo bombeado através de uma abertura de alta impedância, contribuindo para um fluxo de massa (throughput) dependente do tempo.

Dessa forma, a queda da pressão do sistema [P(t)] como um todo pode ser extremamente lenta.



CAVIDADE + ORIFÍCIO PEQUENO $\equiv$ VAZAMENTO VIRTUAL

Neste caso, $C_{vv} \ll S_b$

C_{vv} é a condutância da cavidade.

lembrando que $\boxed{-V\dfrac{dP}{dt} = Q - \sum_i Q_i}$

Analogamente, podemos escrever:

$$-V_c \frac{dP_c}{dt} = Q_{vv} \quad \text{onde} \quad Q_{vv} = C_{vv}(P_c - P_{int})$$

Mas, $P_c \gg P_{int}$ então $\boxed{Q_{vv} = C_{vv} P_c}$

$$-V_c \frac{dP_c}{dt} = C_{vv} P_c$$

$$\frac{dP_c}{dt} = -\frac{C_{vv}}{V_c} P_c \xRightarrow[\text{Solução}]{} \boxed{P_c = P_0' e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$$

A pressão residual do sistema nesse caso será:

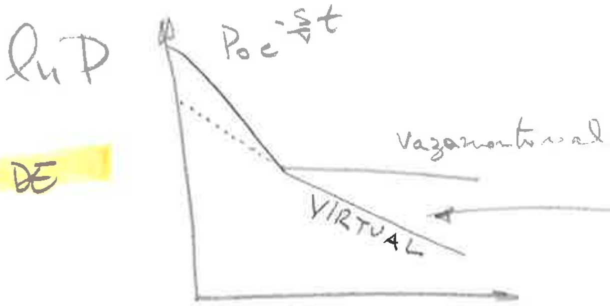
$$P_{res} = \frac{Q_{vv}}{S}$$

então $P_{res} = \dfrac{C_{vv} P_c}{S} \Longrightarrow \boxed{P_{res} = \dfrac{C_{vv} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{vv}}{V} t}}$

o termo $\dfrac{C_{vv} P_0'}{S}$ é constante!

P_0' pode ser estimado como sendo $P_0' = P_{atm}$

SLIDE



$$\boxed{P_R = \frac{C_r P_{atm}}{S}}$$

$$\boxed{\frac{C_{vv} P_0'}{S} e^{-\frac{C_{vv}}{V_c} t}}$$

ATENÇÃO: O vazamento virtual pode "parecer" o vazamento real

Devemos sempre nos preocuparmos com os possíveis vazamentos virtuais a fim de evitá-los

SLIDES $\left\{ \begin{array}{l} \text{GRÁFICOS } \ln P \times t \\ \text{SOLDAS} \end{array} \right.$

SOLDAS