

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

PEN5043 - Conceitos de Termodinâmica para Planejamento Energetico



INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

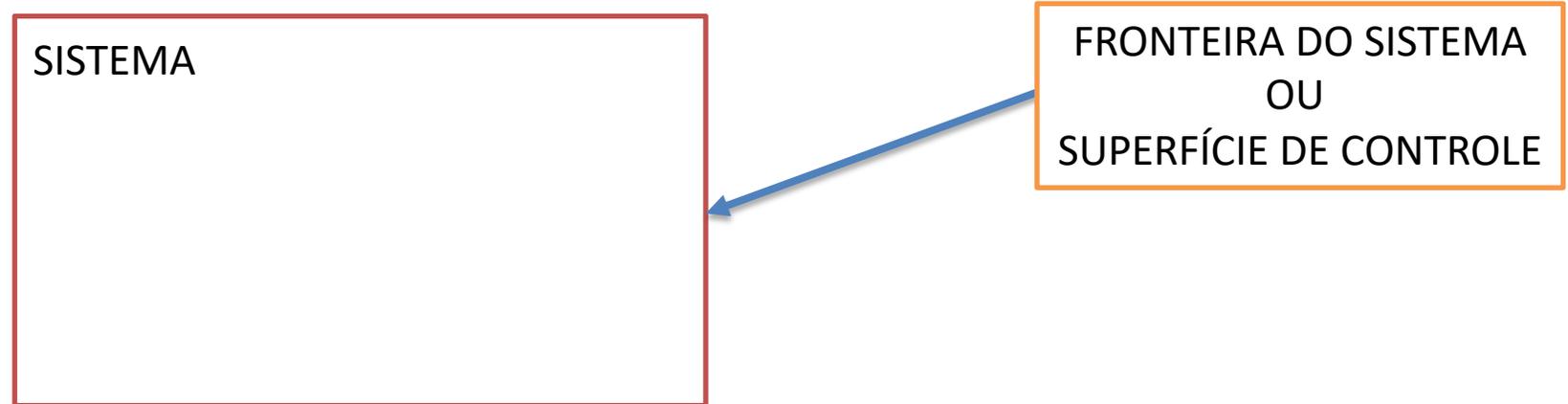


Termodinâmica – Propriedades de uma substância

- Conceitos fundamentais:
 - ✓ Temperatura, pressão, volume, volume específico (recíproco da massa específica).
- Título (surge apenas na saturação), massa de vapor pela massa do sistema
- Energia:
 - ✓ Energia interna, cinética e potencial
 - ✓ Entalpia = $u + pv$
- Propriedades “fenomenológicas”.
 - ✓ Gás perfeito $pv = RT$ (equação de estado)
 - ✓ Substância pura (diagrama de fases e tabelas de propriedades ou EES)
- Vídeos recomendados:
 - ✓ Primeira Lei: https://youtu.be/a9c7u-FM-Wc?si=W1baJH6_aKVS9igf
 - ✓ Segunda Lei: <https://www.youtube.com/watch?v=7se7K0mnRaY&t=381s>

Conceitos Básicos

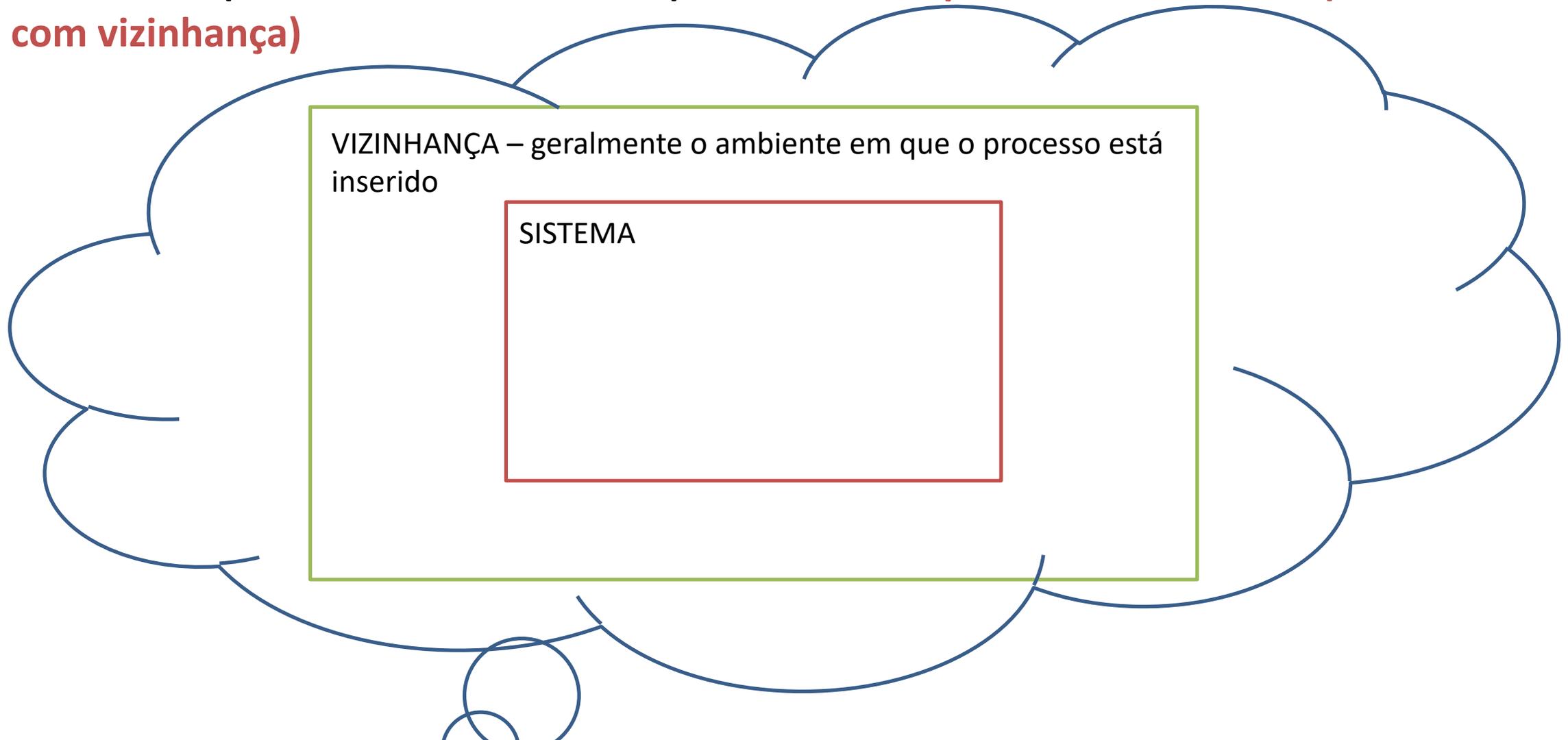
- **Sistema:** Quantidade determinada de matéria cujo comportamento é objeto de estudo. Para identificar, o sistema é cercado pela fronteira do sistema que pode ou não ser a fronteira real. O termo *sistema fechado* é algumas vezes usado para enfatizar que **não existe passagem de matéria pela fronteira do sistema**.
- ✓ **Sistema Isolado:** Se alguma mudança no meio não produz mudanças no sistema ele é dito sistema isolado.



- **Fronteira:** superfície real ou imaginária que separa o sistema da vizinhança. A fronteira não tem espessura, volume ou massa.
- ✓ **A fronteira pode ser fixa ou móvel**

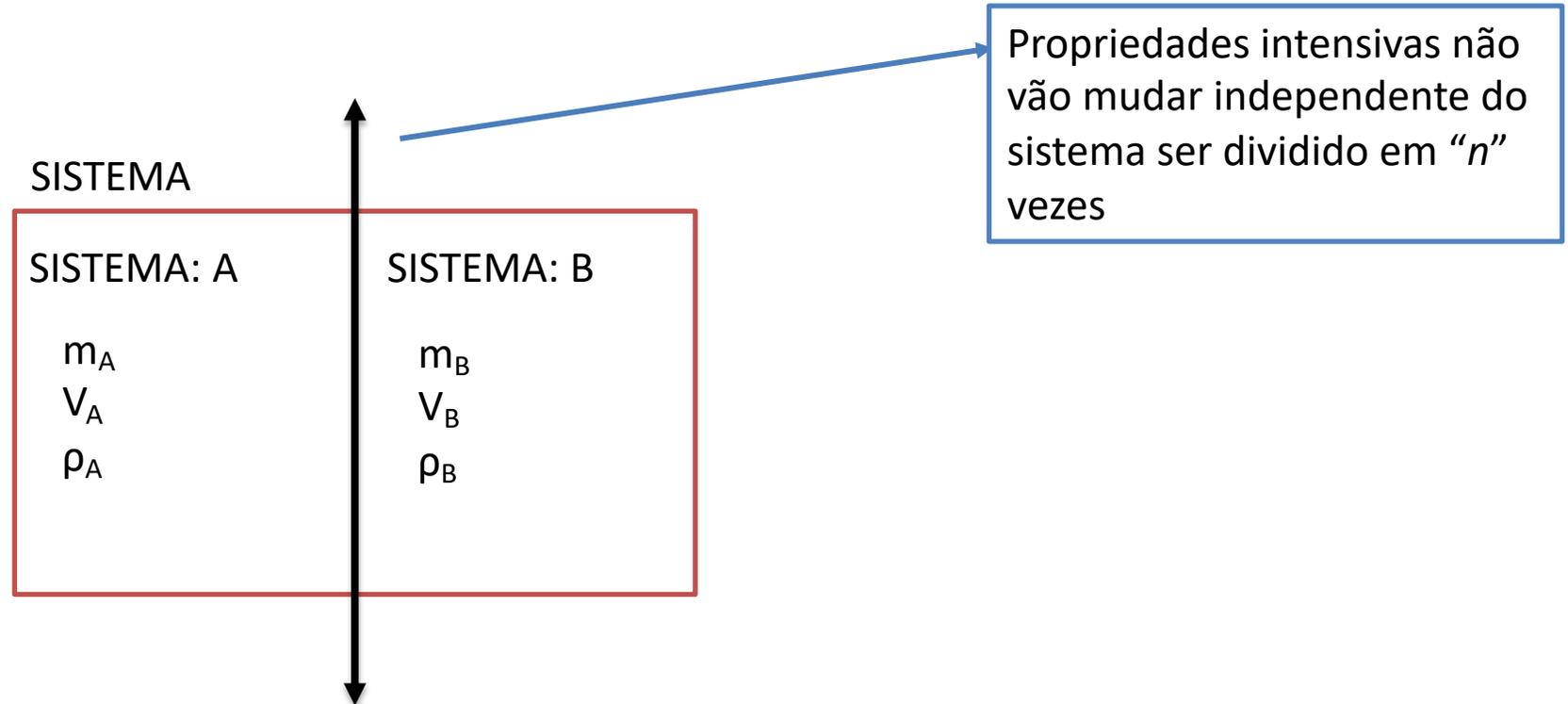
Conceitos Básicos

- **Vizinhança:** Tudo o que está fora da fronteira do sistema é chamado de vizinhança.
- **“Universo” (ou meio termodinâmico):** **Conceito um pouco mais abstrato (soma do sistema com vizinhança)**



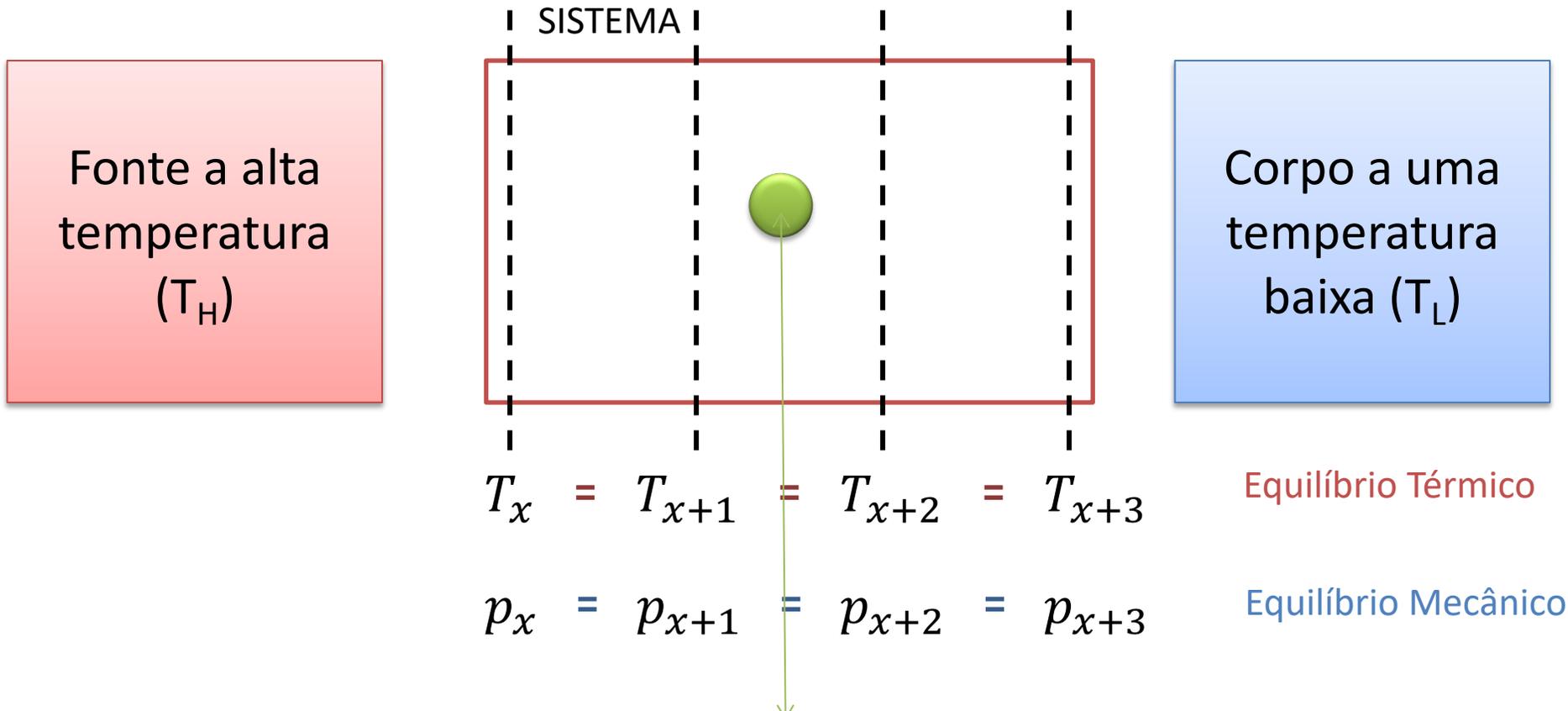
Conceitos Básicos

- **Substância pura:** Composição química homogênea e invariável. Ela pode existir em mais de uma fase, porém sua composição química deve ser a mesma em cada fase.
- ✓ Propriedades Intensivas: Não dependem da massa.
- ✓ Propriedades Extensivas: Dependem da massa.



Conceitos Básicos

➤ Sistemas homogêneos:



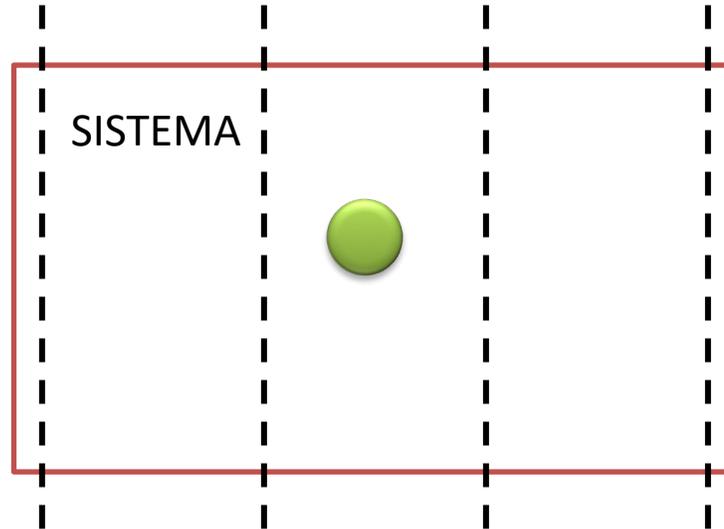
Um ponto representa as propriedades de todos os pontos:

Simplificação usada durante todo o curso. Não haverá variações com a posição. Análise pontual. "um ponto representa o sistema".

Conceitos Básicos

➤ Sistemas heterogêneos:

Fonte a alta temperatura (T_H)



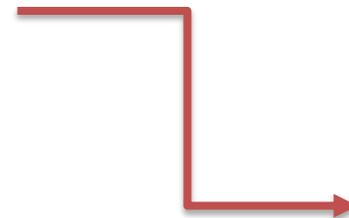
Corpo a uma temperatura baixa (T_L)

$$T_x \neq T_{x+1} \neq T_{x+2} \neq T_{x+3}$$

Equilíbrio ~~Térmico~~

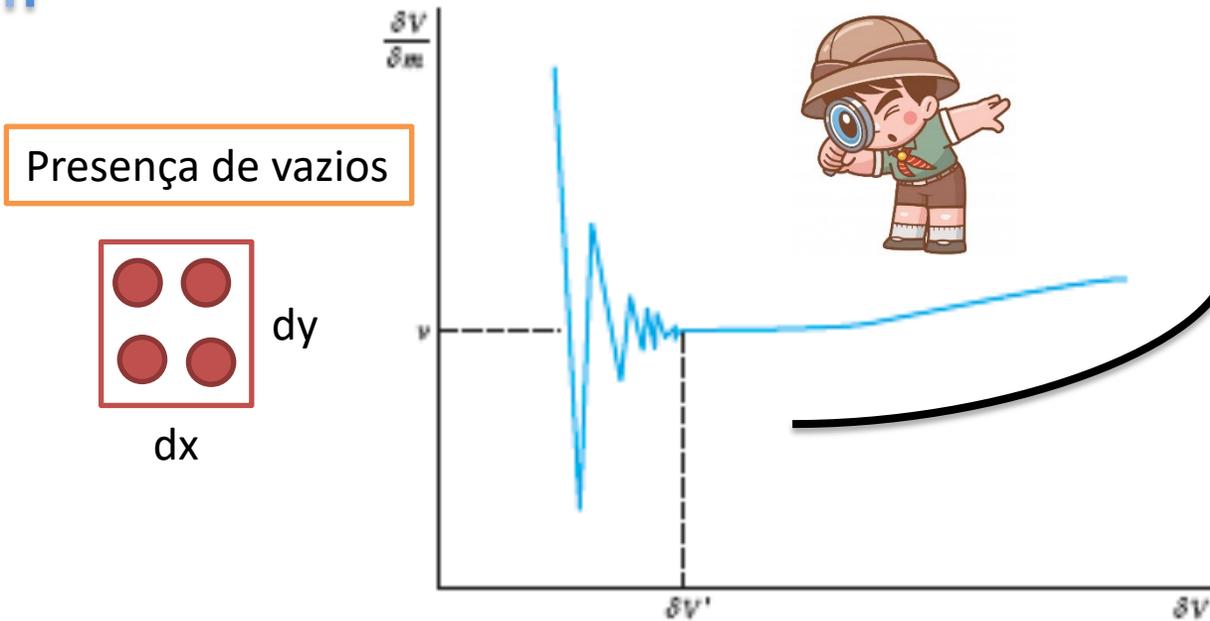
$$p_x = p_{x+1} = p_{x+2} = p_{x+3}$$

Equilíbrio Mecânico



Esse tipo de mudança de temperatura com a posição
Será estudado apenas em transferência de calor.

Massa e Volume Específico – Estados Físicos



$$v = \lim_{dv \rightarrow dv'} \frac{dv}{dm}$$

dv' é o menor volume que a massa ainda pode ser considerada como um contínuo.

Figura 1.7 Limite do contínuo para o volume específico.

Esse é o mínimo que podemos chegar quando utilizamos Elemento infinitesimal para ele representar um contínuo

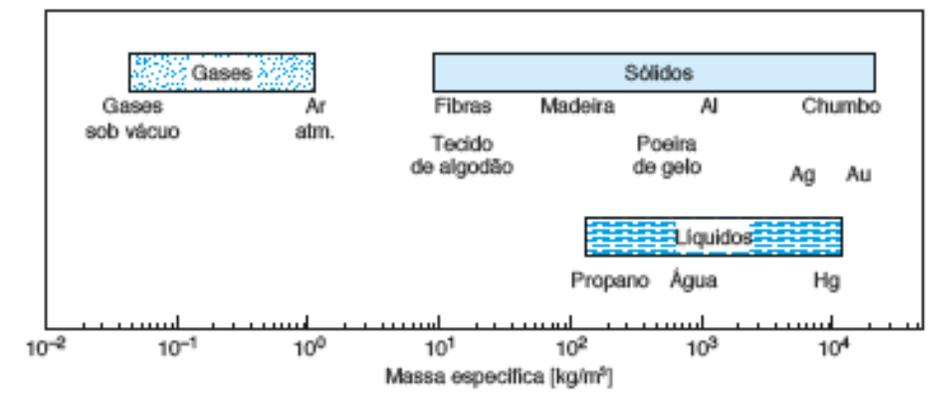
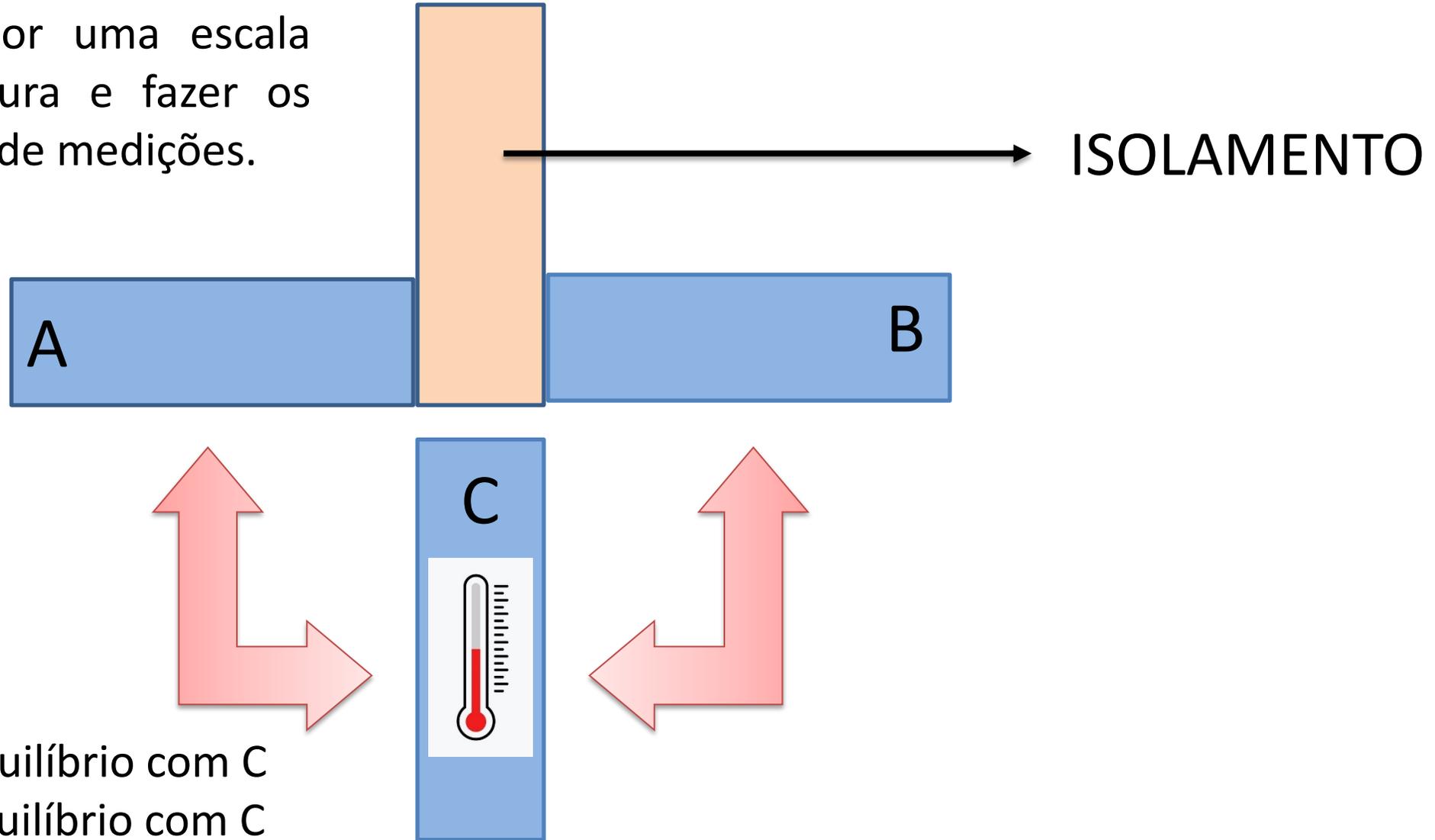


Figura 1.8 Densidade de substâncias comuns.

Lei Zero da Termodinâmica

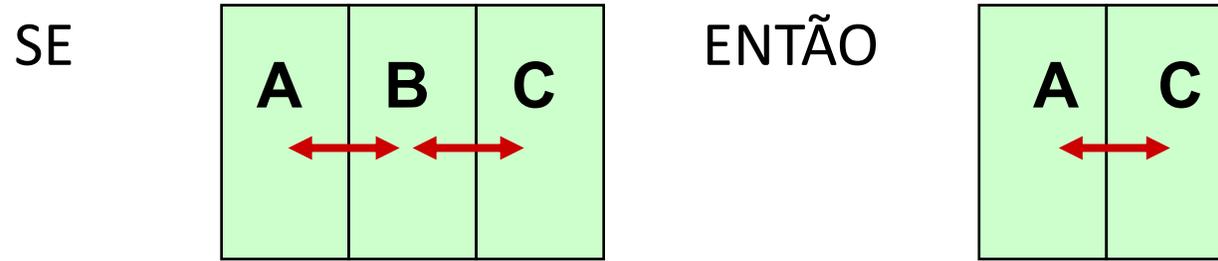
Torna-se possível propor uma escala arbitrária de temperatura e fazer os primeiros instrumentos de medições.



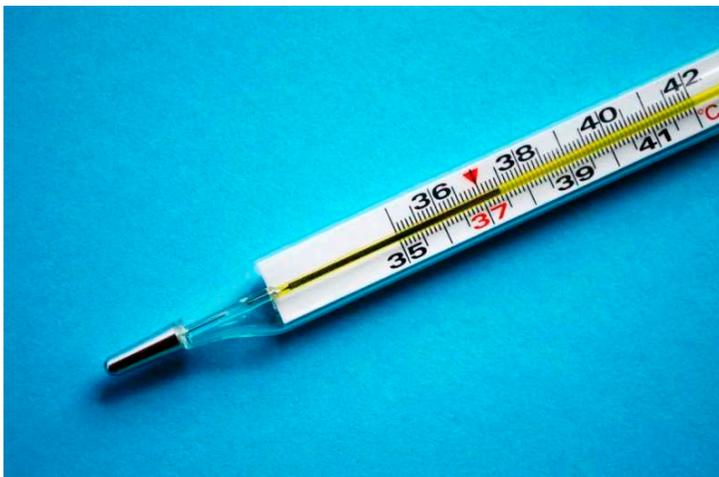
Se o corpo A está em equilíbrio com C
Se o corpo B está em equilíbrio com C
O que podemos falar de A com B?

Lei “Zero” da Termodinâmica

➤ Princípio do equilíbrio térmico:



- ✓ Surgem as primeiras reflexões acerca de medição de uma propriedade que indique o estado de um sistema, ou seja, dado um instrumento de medição e uma escala arbitrária, é possível obter a propriedade Termodinâmica “temperatura”.



Esse termômetro teve que ser calibrado para uma certa temperatura de operação possuir um “tamanho” inicial.

Geralmente usa-se 0 °C ou 100 °C (mudança de fase da água)

Conceitos Básicos

➤ **Estado de Equilíbrio:** Se isolarmos o sistema de sua vizinhanças e não ocorrer mudanças nas suas propriedades, conclui-se que o sistema estava em equilíbrio no momento em que foi isolado.

✓ Não há tendência de mudança quando isolamos.

✓ Ausência de diferença potencial mecânico, térmico e químico.

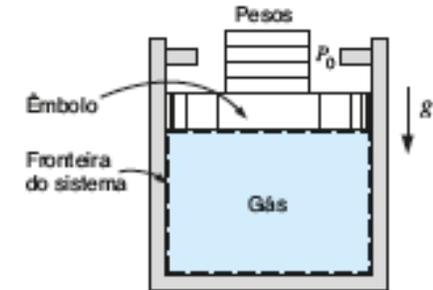


Figura 1.6
Exemplo de um processo de quase-equilíbrio em um sistema.

➤ **Processo reversível:** É um processo que após ter ocorrido tanto o sistema como a vizinhança podem voltar para o estado inicial sem nenhum efeito residual em ambos.

➤ **Processo quase estático:** idealização de processos infinitesimais próximo ao equilíbrio em todos os momentos, podendo-se então referir o sistema como um todo. (Exemplo do pistão).

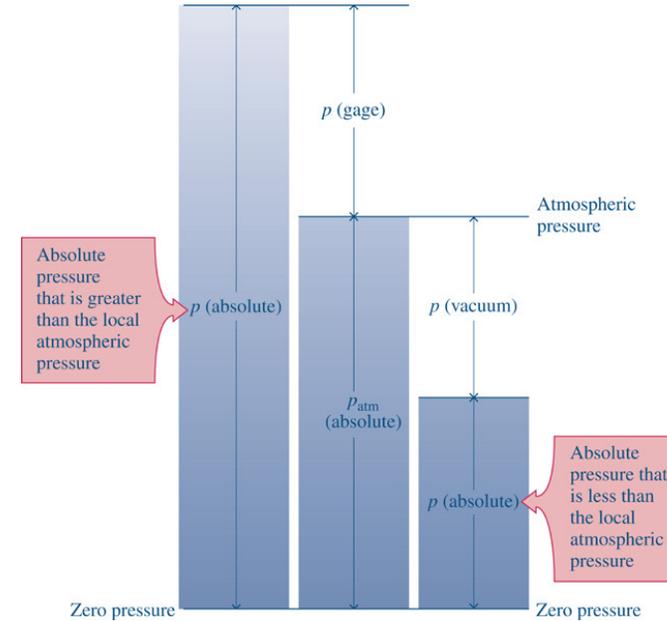
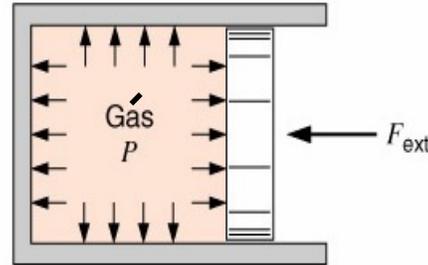
✓ **Processo cíclico ou ciclo termodinâmico:** Quando um sistema passa por processos (mudança de estado) e **retorna para seu estado inicial**, pode-se afirmar que ele passou por um ciclo.

Pressão

$$P = \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_n}{\delta A}$$

Mesma pressão no equilíbrio, i.e., o pistão está parado

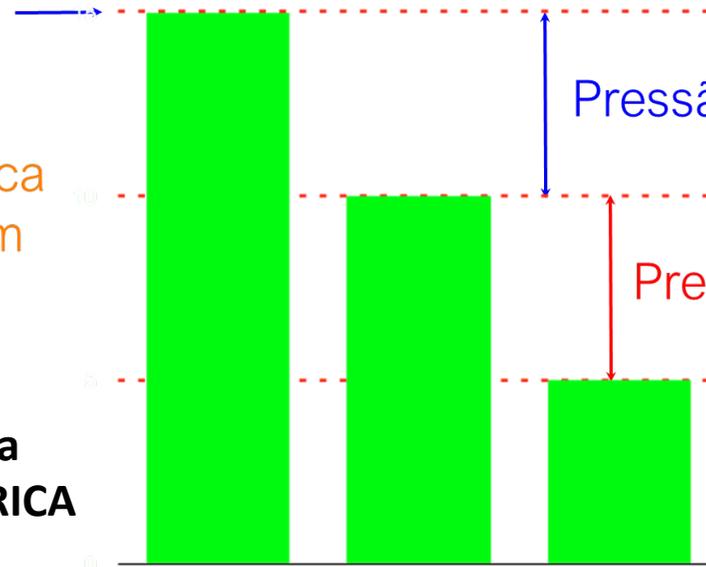
Considere a situação:



Pressão absoluta > Patm

Em Termodinâmica trabalhamos com

Pressão absoluta é a pressão BAROMÉTRICA



Obtido em notas de aula de Silvio de Oliveira Junior (EPUSP – Termo I)

Pressão

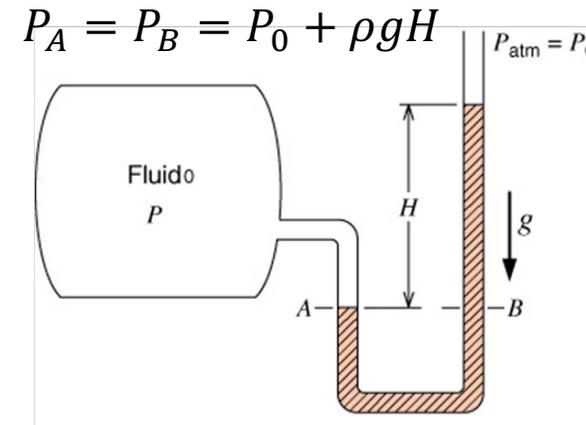
Medição da pressão atmosférica



Barômetro

$$P_{\text{atm}} \approx \rho \cdot g \cdot h$$

Medição da pressão



Manômetro de coluna

$$P - P_0 = \rho \cdot g \cdot H$$

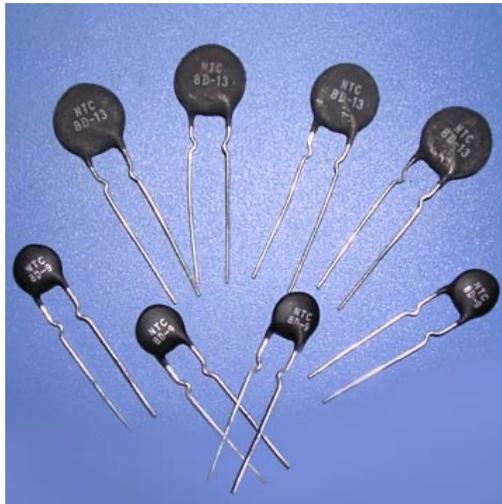
Obtido em notas de aula de Silvio de Oliveira Junior (EPUSP – Termo I)



Conceitos fundamentais

Medição de temperatura

Termístores



Semi-condutores -
variação de resistência
com a temperatura

Obtido em notas de aula de
Silvio de Oliveira Junior
(EPUSP – Termo I)

Termômetro de radiação



Incerteza 2 % ou 2 °C

Termografia



Incerteza 2 % ou 2 °C

Medição de Pressão

Medição da pressão - outros instrumentos

Manômetro digital



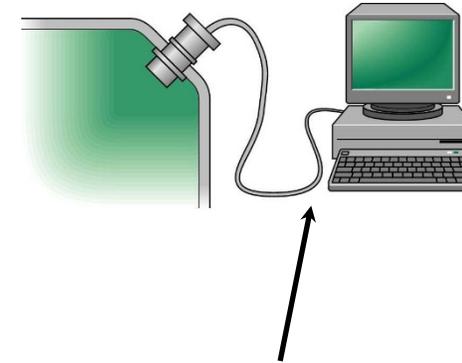
Incerteza 0,3%

Manômetro de Diferencial



Incerteza 0,3%
Tempo de resposta
500ms

Transdutor de pressão



Aquisição de dados
automatizada

Medição de Temperatura

Medição de temperatura

Termômetro de bulbo



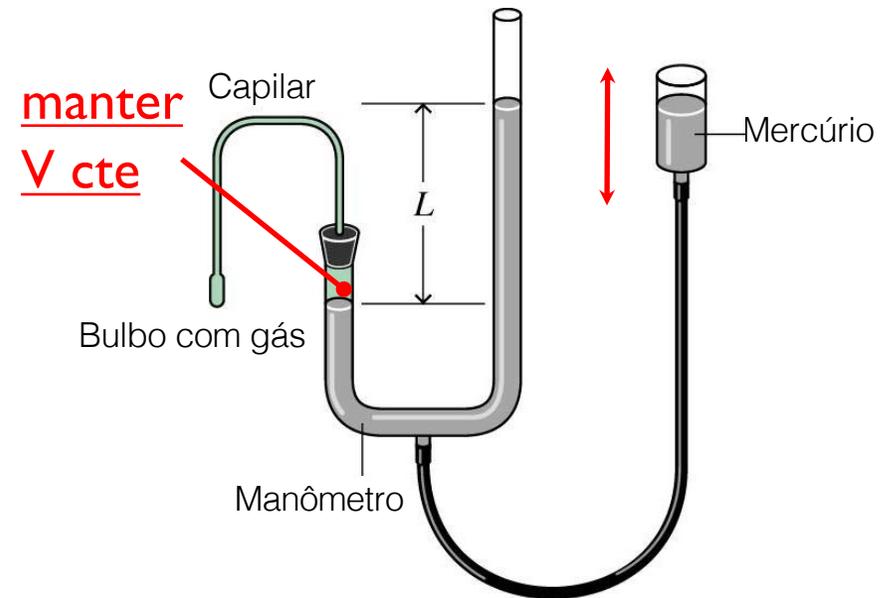
Substância termométrica
Mercúrio



Álcool

Obtido em notas
de aula de Silvio
de Oliveira Junior
(EPUSP – Termo I)

Termômetro de gás

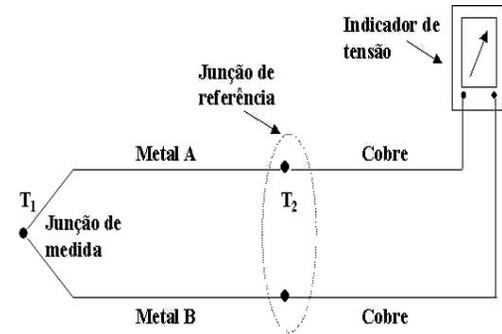


$$T = \beta \cdot P$$

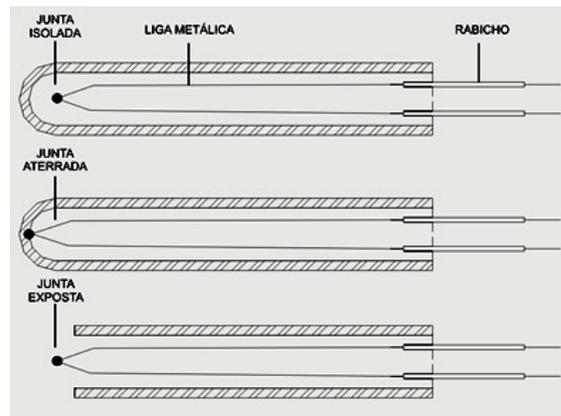
Medição de Temperatura

Obtido em notas de aula de
Silvio de Oliveira Junior
(EPUSP – Termo I)

Termopar



Junta



Tipos

Tipo	Par		Gama de Temperatura (°C)
	-	+	
J	Cu+Ni	Fe	-185 a 870
K	Ni+Al	Cr+Ni	-185 a 1260
T	Cu+Ni	Cu	-185 a 400
S	Pt	Pt+10%Rh	0 a 1535
E	Cu+Ni	Ni+Cr	0 a 980
N	Ni+Si+Mg	Ni+Cr+Si	-270 a 1300
R	Pt	Pt+13%Rh	0 a 1590
B	Pt+6%Rh	Pt+30%Rh	38 a 1800
G	W+26%Re	W	16 a 2800

Cálculo de equilíbrio de pressões

1-72 Um manômetro de mercúrio ($\rho = 13.600 \text{ kg/m}^3$) está conectado a um duto de ar para medir a pressão dentro dele. A diferença nos níveis do manômetro é de 15 mm, e a pressão atmosférica é de 100 kPa. (a) A julgar pela Fig. P1-72, determine se a pressão do duto está acima ou abaixo da pressão atmosférica. (b) Determine a pressão absoluta no duto.

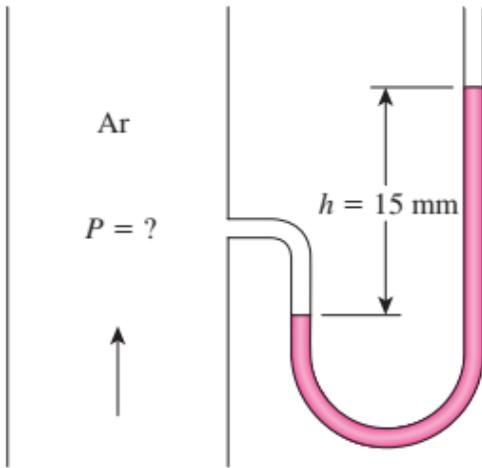


FIGURA P1-72

1-73 Repita o Prob. 1-72 para uma diferença de altura de mercúrio de 45 mm.

EES Professional: - [Parametric Table]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Table 1

	T [oC]	ρ [kg/m ³]	volume [m ³ /kg]	multiplicados [-]
Run 1	0	13595	0.00007356	1
Run 2	10	13570	0.00007369	1
Run 3	20	13546	0.00007382	1
Run 4	30	13521	0.00007396	1
Run 5	40	13497	0.00007409	1
Run 6	50	13472	0.00007423	1
Run 7	60	13448	0.00007436	1
Run 8	70	13424	0.0000745	1
Run 9	80	13400	0.00007463	1
Run 10	90	13375	0.00007477	1
Run 11	100	13351	0.0000749	1

$\rho = \text{density}(\text{Mercury_liquid}, T=T)$

$\rho = \text{density}(\text{Mercury_liquid}, T=T)$

$\text{volume} = \text{volume}(\text{Mercury_liquid}, T=T)$

$\text{multiplicados} = \rho * \text{volume}$

EES – Uso para facilitar nossa vida....

EXEMPLO 1-11 Solução de um sistema de equações com o EES

A diferença entre dois números é 4, e a soma dos quadrados desses dois números é igual à soma dos números mais 20. Determine esses dois números.

SOLUÇÃO As relações são fornecidas para a diferença e a soma dos quadrados de dois números. Eles devem ser determinados.

Análise Iniciamos o programa EES, damos um clique duplo em seu ícone, abrimos um arquivo novo e digitamos as seguintes equações

$$x - y = 4$$

$$x^2 + y^2 = x + y + 20$$

que são as expressões matemáticas exatas do enunciado do problema com x e y indicando os números desconhecidos. A solução deste sistema de duas equações não lineares com duas incógnitas é obtida com um único clique no ícone “calculadora” na barra de tarefas. Isso resulta em

$$x = 5 \text{ e } y = 1$$

Discussão Observe que tudo o que fizemos foi formular o problema como faríamos em papel; o EES tomou conta de todos os detalhes matemáticos da solução. Observe também que as equações podem ser lineares ou não lineares e podem ser inseridas em qualquer ordem com incógnitas em ambos os lados. Programas amigáveis de solução de equações de fácil uso como o EES permitem que o usuário se concentre na física do problema, sem se preocupar com as complexidades matemáticas associadas à solução do sistema de equações resultante.

Livro do Çengel falando do EES – Tentem refazer...

EXEMPLO 1-12 Análise de um manômetro de vários fluidos com o EES

Reconsidere o manômetro de coluna de vários fluidos que discutimos no Exemplo 1-7 e que foi desenhado novamente na Fig. 1-66. Determine a pressão do ar no tanque usando o EES. Determine também qual seria a altura diferencial h_3 do fluido para a mesma pressão de ar se o mercúrio da última coluna fosse substituído por água do mar com densidade de 1.030 kg/m^3 .

SOLUÇÃO A pressão em um tanque de água é medida por um manômetro de vários fluidos. A pressão do ar no tanque e a altura diferencial h_3 do fluido caso o mercúrio seja substituído por água do mar devem ser determinados usando o EES.

Análise Iniciamos o programa EES dando um clique duplo em seu ícone, abrimos um arquivo novo e digitamos as seguintes expressões na tela em branco que aparece (expressamos a pressão atmosférica em Pa para manter a consistência da unidade).

$$\begin{aligned}g &= 9.81 \\ \text{Patm} &= 85600 \\ h_1 &= 0,1; h_2 = 0,2; h_3 = 0,35 \\ r_w &= 1.000; r_{\text{óleo}} = 850; r_m = 13.600 \\ P_1 + r_w * g * h_1 + r_{\text{óleo}} * g * h_2 - r_m * g * h_3 &= \text{Patm}\end{aligned}$$

Aqui P_1 é a única incógnita. Ela é determinada pelo EES como

$$P_1 = 129.647 \text{ Pa} \cong \mathbf{130 \text{ kPa}}$$

que é idêntico ao resultado obtido antes. A altura da coluna de fluido h_3 quando o mercúrio é substituído por água do mar é determinada facilmente substituindo-se “ $h_3 = 0,35$ ” por “ $P_1 = 129.647$ ” e “ $r_m = 13.600$ ” por “ $r_m = 1.030$ ”, e clicando no símbolo de calculadora. Isso resulta em

$$h_3 = \mathbf{4,62 \text{ m}}$$

Discussão Observe que usamos a tela como um bloco de papel e escrevemos as informações relevantes juntamente com as relações aplicáveis de forma organizada. O EES fez o restante. As equações podem ser escritas em linhas separadas ou na mesma linha, separadas por pontos-e-vírgulas, e linhas em branco ou de comentário podem ser inseridas para facilitar a clareza. O EES ajuda a fazer as perguntas “e se”, e a executar os estudos paramétricos, como explicado no Apêndice 3 disponível no *site* do Grupo A.

O EES também tem a capacidade de verificar a consistência das unidades nas equações, caso sejam fornecidas com os valores numéricos. As unidades podem ser especificadas entre colchetes [] após o valor especificado. Quando esse recurso é

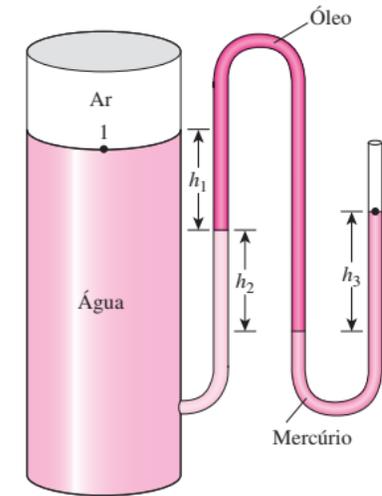


FIGURA 1-66 Esquema para o Exemplo 1-12.

Let's begin with the basic - Energy

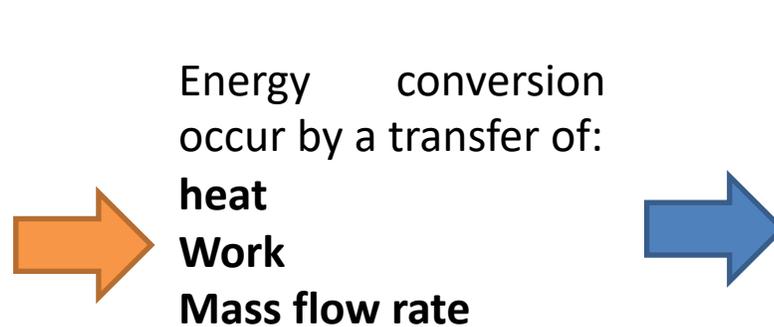
- What is our natural understanding concerning the notion of energy:
 - ✓ In physics, energy is the quantitative property that **must be transferred to a body or physical system to perform work on the body, or to heat it.** Energy is a conserved quantity; the law of conservation of energy states that energy can be converted in form, but not created or destroyed.
 - Google term “energy” and found in Wikipedia

➤ Is this right/precise?

➤ From the classical thermodynamics, it is impossible to define energy in such words.

✓ There are several types of energy, is the effect work is the same for each kJ of:

- ✓ Electrical
- ✓ Internal
- ✓ Chemical
- ✓ Kinetic
- ✓ Nuclear
- ✓ ...



Does They all produce the same effect?



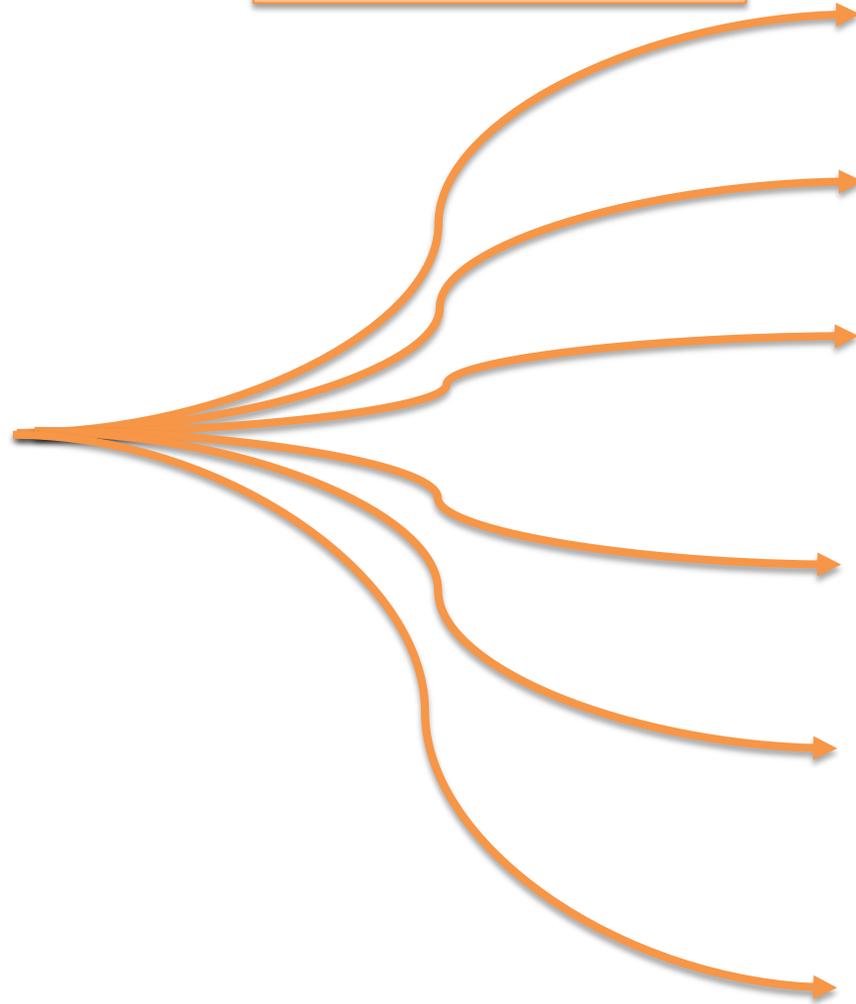
100 Euros \neq 100 Dollar \neq 100 Reais

Energia do UNIVERSO sempre permanecerá a mesma: conservação

Tipos de energia de um sistema físico

E_c E_p U

Transformações:

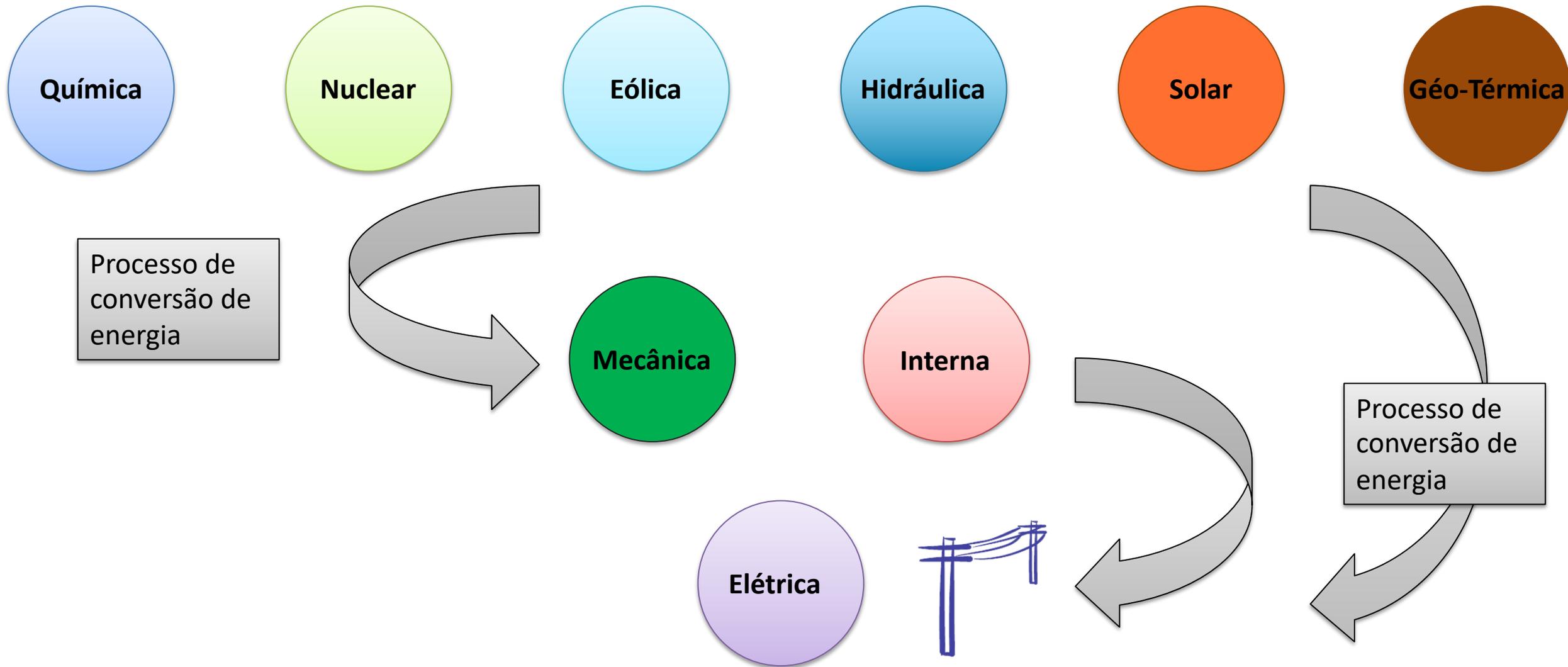


\dot{Q} \longleftrightarrow \dot{W} \longleftrightarrow $\dot{m}E$

Diferentes efeitos úteis



Tipos de Conversão – Slides Prof. Maurício Silva Ferreira



Conceitos Básicos

- Energia: Conceito fundamental da física;
 - ✓ “Capacidade que um corpo, uma substância ou um sistema físico têm de realizar um certo efeito” (?).
 - ✓ Tipos de energia – elétrica, química, mecânica...
 - ✓ A energia pode ser:
 - ✓ **Armazenada** de diversas formas.
 - ✓ **Convertida** de uma forma para outra.
 - ✓ **Transferida** entre sistemas e/ou volumes de controle.

- **Aspecto importante** -> a quantidade de energia se conserva em todas as transformações e transferência de energia (Princípio de Lavoisier).

Primeira Lei da Termodinâmica para um Sistema

- A Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema fechado nos fala que a energia pode ser transferida, armazenada, porém sempre se conserva.

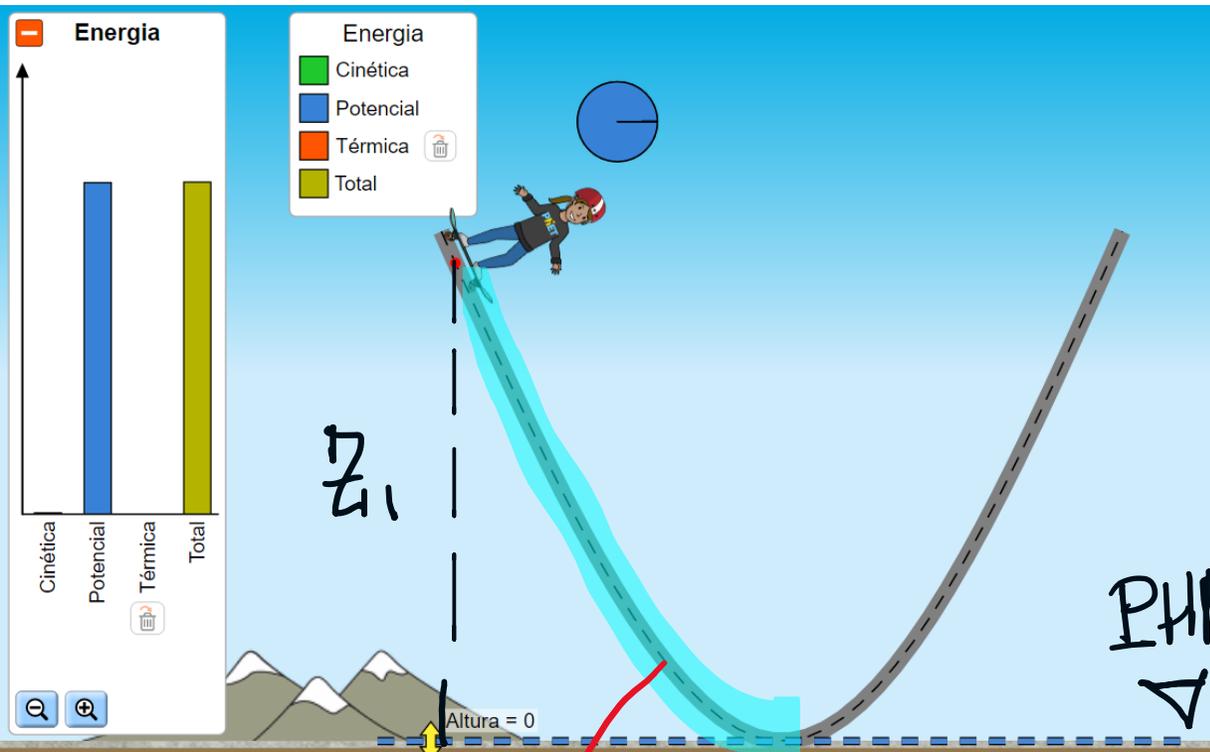
$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 + m \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + mg(z_2 - z_1)$$

- Vamos voltar para cinemática, em que tudo está a uma temperatura constante, não há transferência de energia na forma de atrito, como ficaria a Primeira Lei?

$$-{}_1W_2 = \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(z_2 - z_1)$$

$${}_1W_2 = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} + mg(z_1 - z_2)$$

Apenas energia potencial



$V=0$ não há \bar{E}_c

$$\bar{E}_{P_i} = mg(z_i - z_{i0})$$

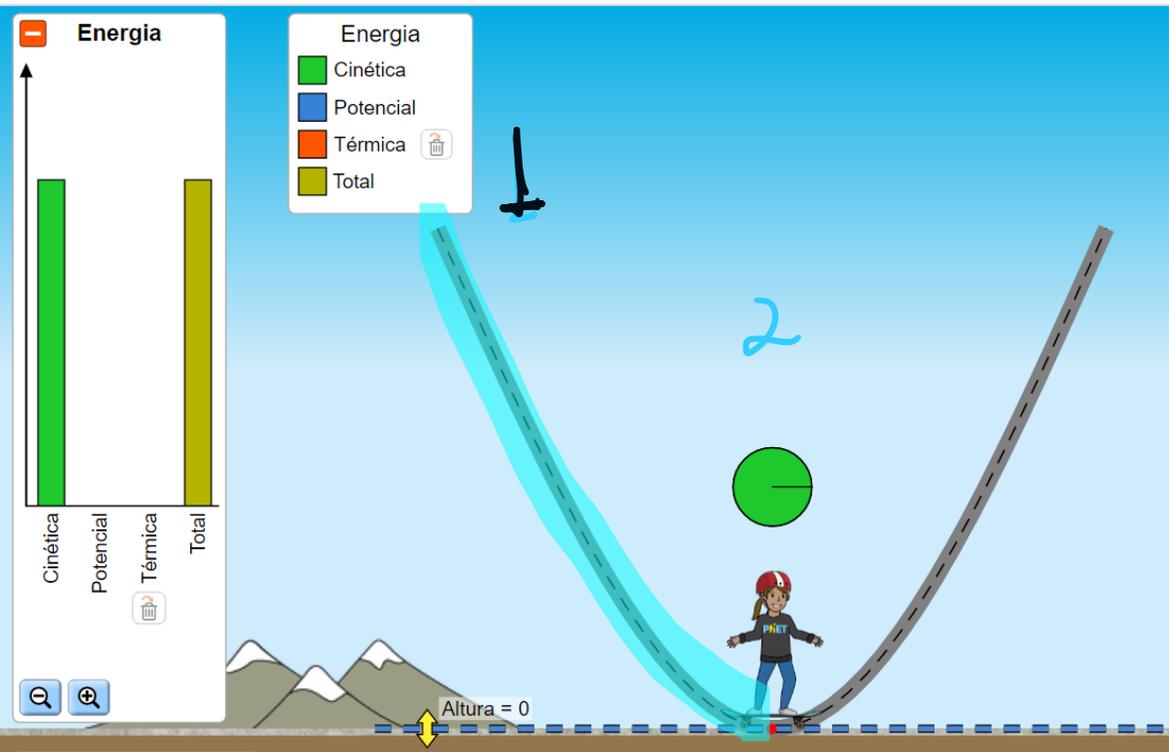
\downarrow PHR

$z=0$

\therefore só temos E_p

Este trecho consideramos SEM ATRITO

Toda energia potencial transformou-se em cinética

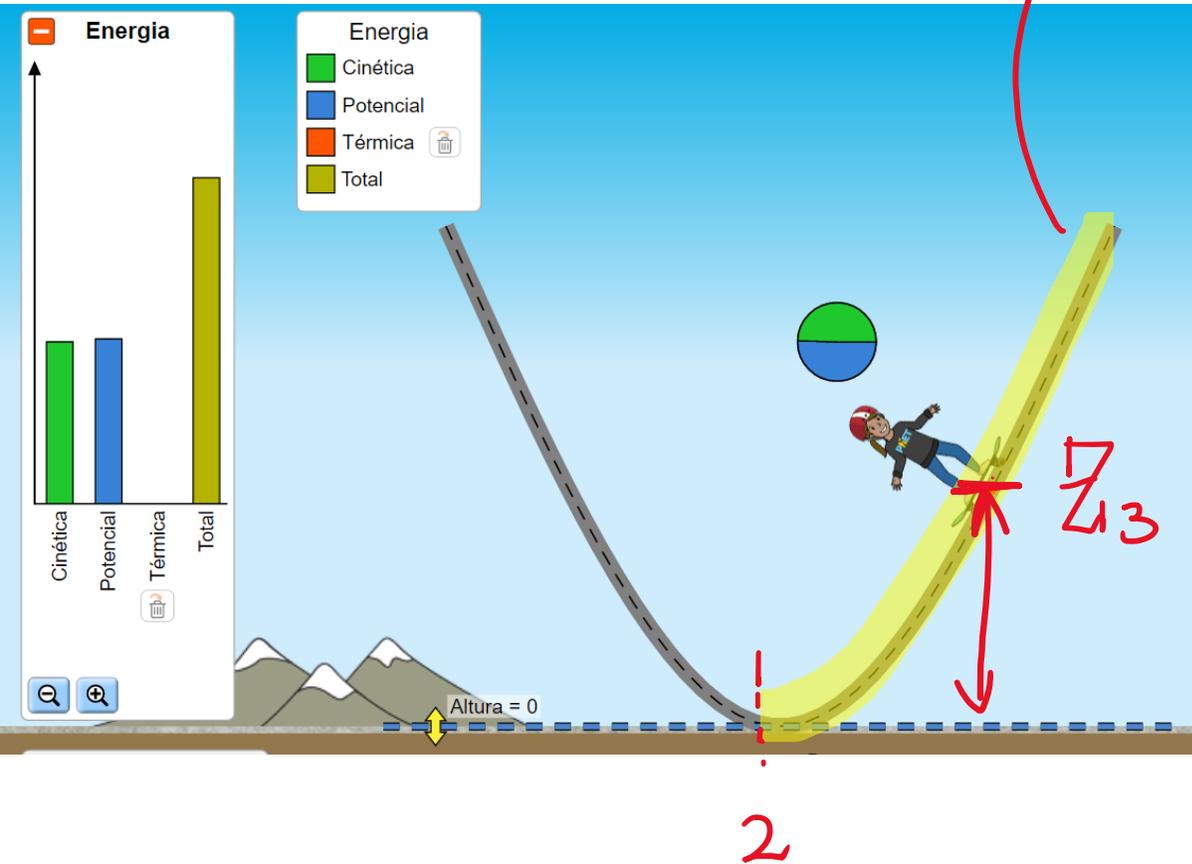


COMO NÃO HÁ ATRITO
ENTRE 1 - 2

$$\Delta E_p + \Delta E_c = 0$$

$$\int \left[\underbrace{mg(z_2 - z_1)}_0 + \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2} \right] = 0$$

Transferência de Energia – Chegou até a metade da altura



→ NESTE OUTRO TRECHO
CONSIDERAMOS QUE NÃO HÁ
ATRITO

$$\Delta E_p + \Delta E_c + \Delta U = 0$$

↳ parte da ENERGIA
CINÉTICA vira POTENCIAL
E O RESTANTE vira INTERNA

Abordagens de Lagrange x Euler

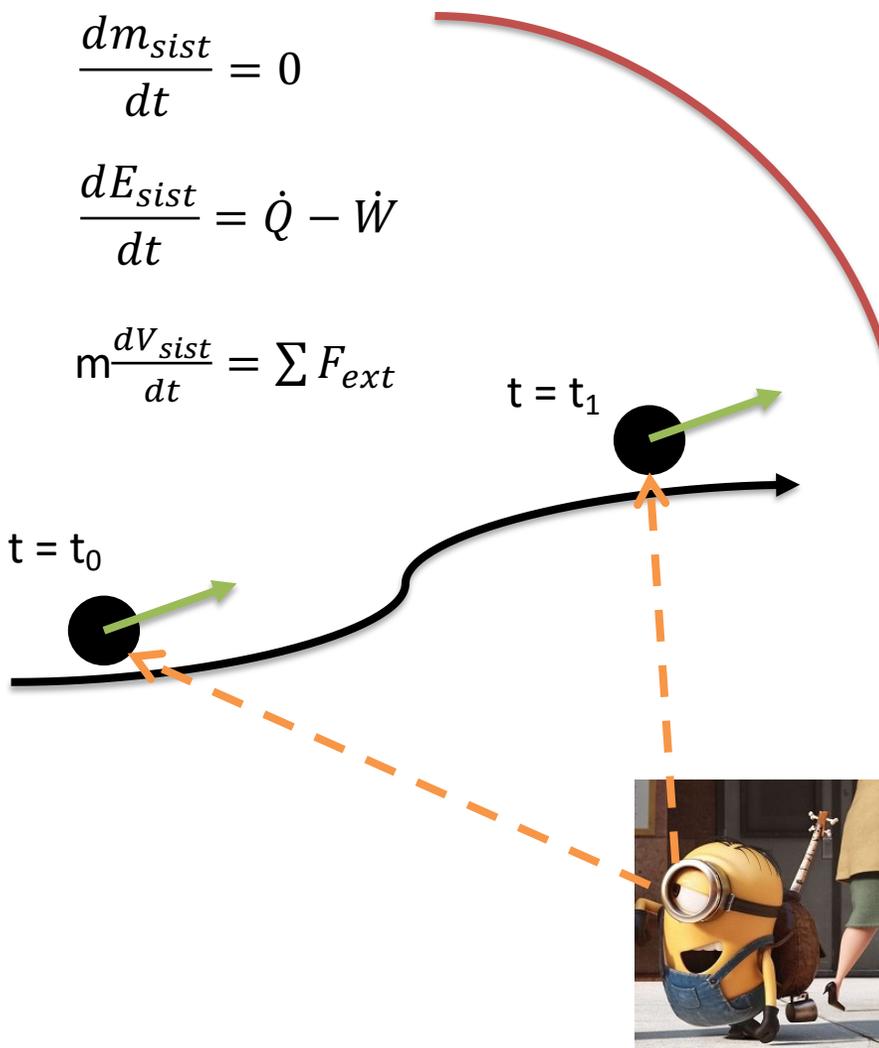
➤ Lagrange

Observador acompanha o Sistema e assim sabemos descrever as derivadas temporais

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = 0$$

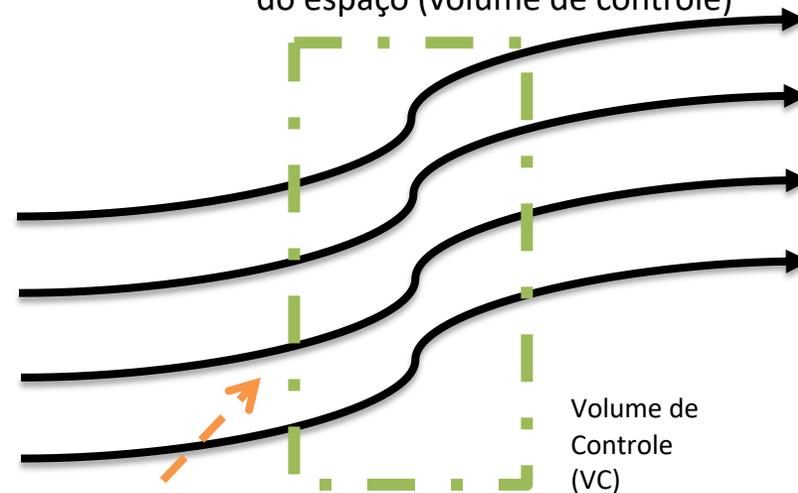
$$\frac{dE_{sist}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$$m \frac{dV_{sist}}{dt} = \sum F_{ext}$$



x Euler

Observador foca em uma região do espaço (volume de controle)



Volume de Controle (VC)

$t = t_0$
&
 $t = t_1$

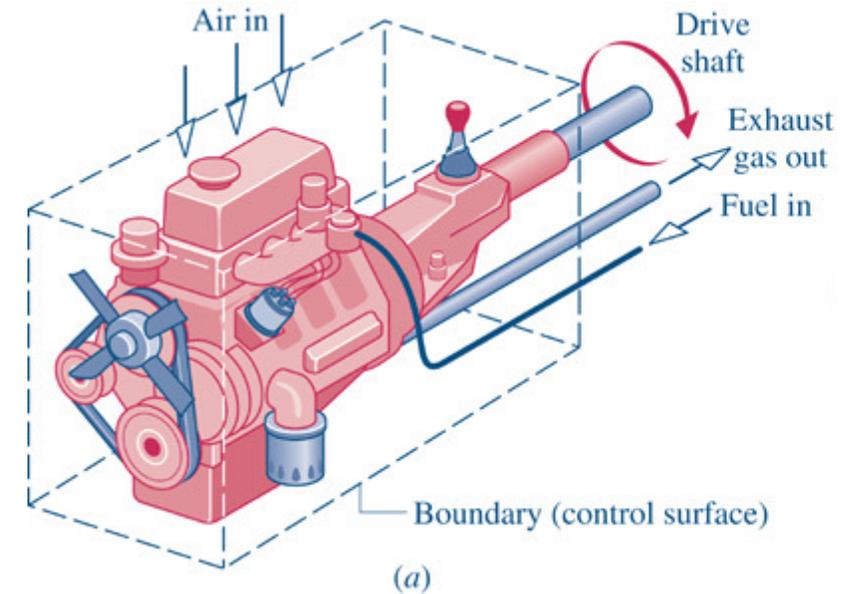
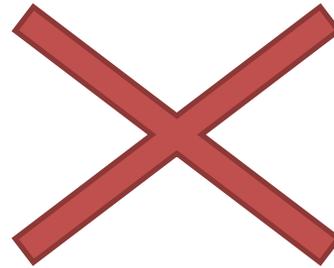
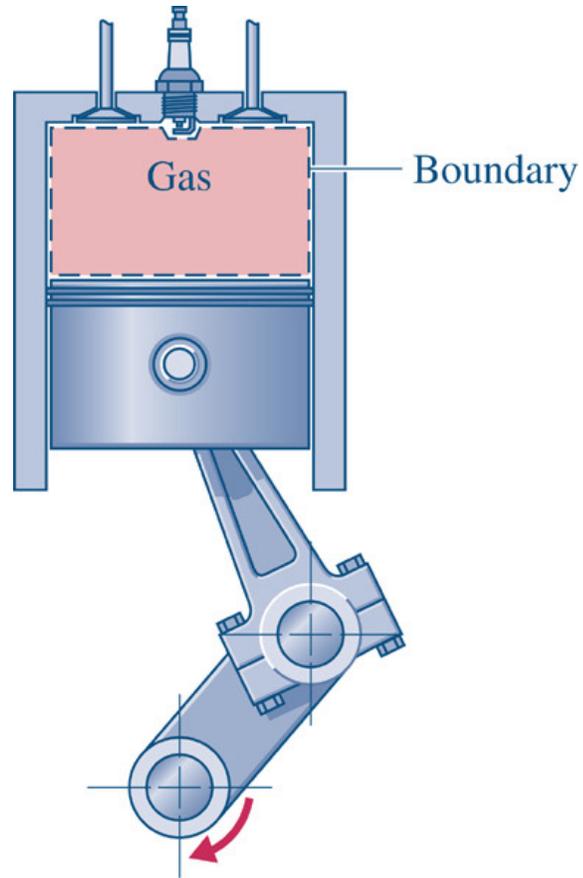
$$\frac{dm_{VC}}{dt} = ???$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = ???$$

Para mudar de uma abordagem para outra usa-se o Teorema de Transporte de Reynolds

Conceitos Básicos

➤ **Sistemas Fechado (Abordagem de Lagrange) x Volume de Controle (Abordagem de Euler):**



FOCO DO CURSO, INÍCIO SISTEMAS E CAMINHA-SE PARA VOLUME DE CONTROLE

Propriedade Termodinâmica Energia Interna

- Energia Interna (U) é uma propriedade termodinâmica extensiva. Se dividirmos U (kJ) pela massa temos u a energia interna específico (kJ/kg).

$$U \text{ [kJ]} \qquad U = mu \text{ [kJ]} \qquad u \text{ [kJ/kg]}$$

- **Importante:** Energia interna específica é uma das propriedades independentes que podemos usar para definir o estado termodinâmico. Por exemplo, para uma substância pura se tivermos a pressão e energia interna conseguimos todas as outras propriedades.
- ✓ Dessa forma os valores de energia interna podem ser tabelados juntamente com a temperatura, pressão e volume específico. Agora temos mais uma coluna nas nossas tabelas de propriedades termodinâmicas

Propriedade Termodinâmica Energia Interna

- “Internal energy has its origins with the microscopic nature of matter; specifically, we define internal energy as the **energy associated with the motions of the microscopic particles** (atoms, molecules, electrons, etc.) comprising a macroscopic system. For simple monatomic gases (e.g., helium and argon) internal energy is associated only with the translational kinetic energy of the atoms (Fig. 2.4a). If we assume that a gas can be modeled as a collection of point-mass hard spheres that collide elastically, the translational kinetic energy associated with n particles is where \bar{v}^2 is the mean-square molecular speed. Using kinetic theory, the translational kinetic energy can be related to temperature as:”

$$U_{\text{trans}} = n \frac{1}{2} M_{\text{molec}} \bar{v}^2$$

$$U_{\text{trans}} = n \frac{3}{2} k_B T,$$

$$k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}/(\text{moléculas} \cdot \text{K})$$

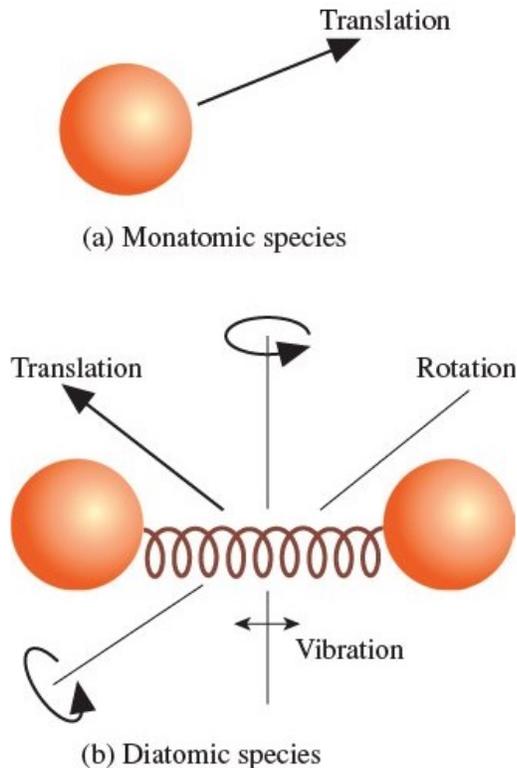
$$1 \text{ gmol} = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$\bar{R} = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$k_B \cdot n = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}/(\text{moléculas} \cdot \text{K}) \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ moléculas} = 8,315 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$$

- “For molecules more complex than single atoms, internal energy is stored in vibrating molecular bonds and rotation of the molecule about two or more axes, in addition to the translational kinetic energy. Figure 2.4b illustrates this model of a diatomic species. In general, the internal energy is expressed:”

$$U = U_{\text{trans}} + U_{\text{vib}} + U_{\text{rot}}$$



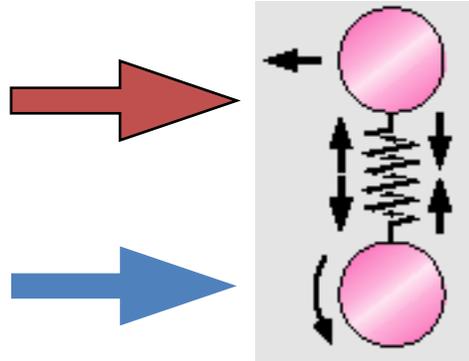
- “where U_{vib} is the vibrational kinetic and potential energy, and is the U_{rot} rotational kinetic energy. The amount of energy that is stored in each mode varies with temperature and is described by quantum mechanics.”

FIGURE 2.4 (a) The internal energy of a monatomic species consists only of translational (kinetic) energy. (b) A diatomic species internal energy results from translation together with energy from vibration (potential and kinetic) and rotation (kinetic).

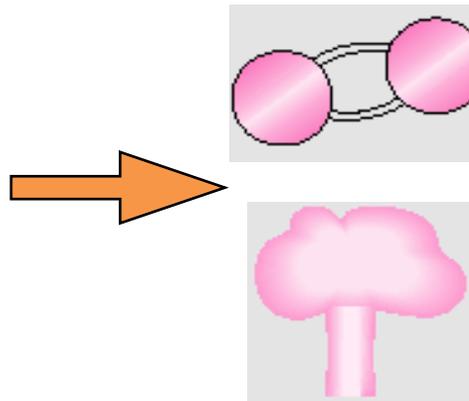
Turns, Stephen R..
Thermodynamics: Concepts and
Applications Cambridge University
Press.

Energia por uma visão microscópica

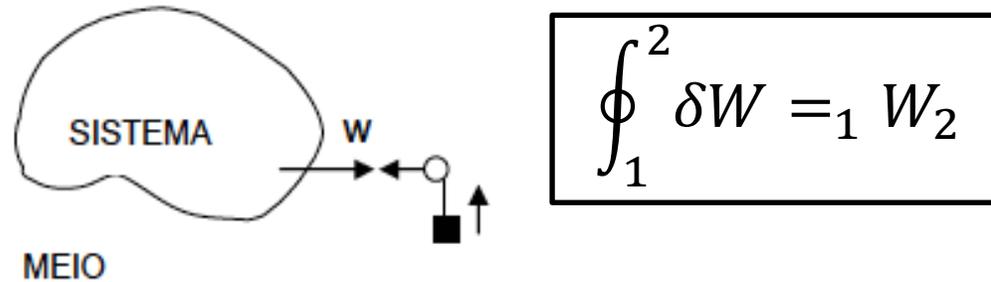
- **Energia potencial intermolecular:** Associada às forças entre as moléculas.
- **Energia cinética molecular:** Associada à velocidade de translação das moléculas.



- **Energia intramolecular:** Associada com a estrutura molecular e atômica de cada molécula.



Trabalho Termodinâmico



Trabalho é realizado por um sistema se o único efeito sobre o meio puder ser caracterizado como o levantamento de uma massa.

$W > 0$ realizado pelo sistema

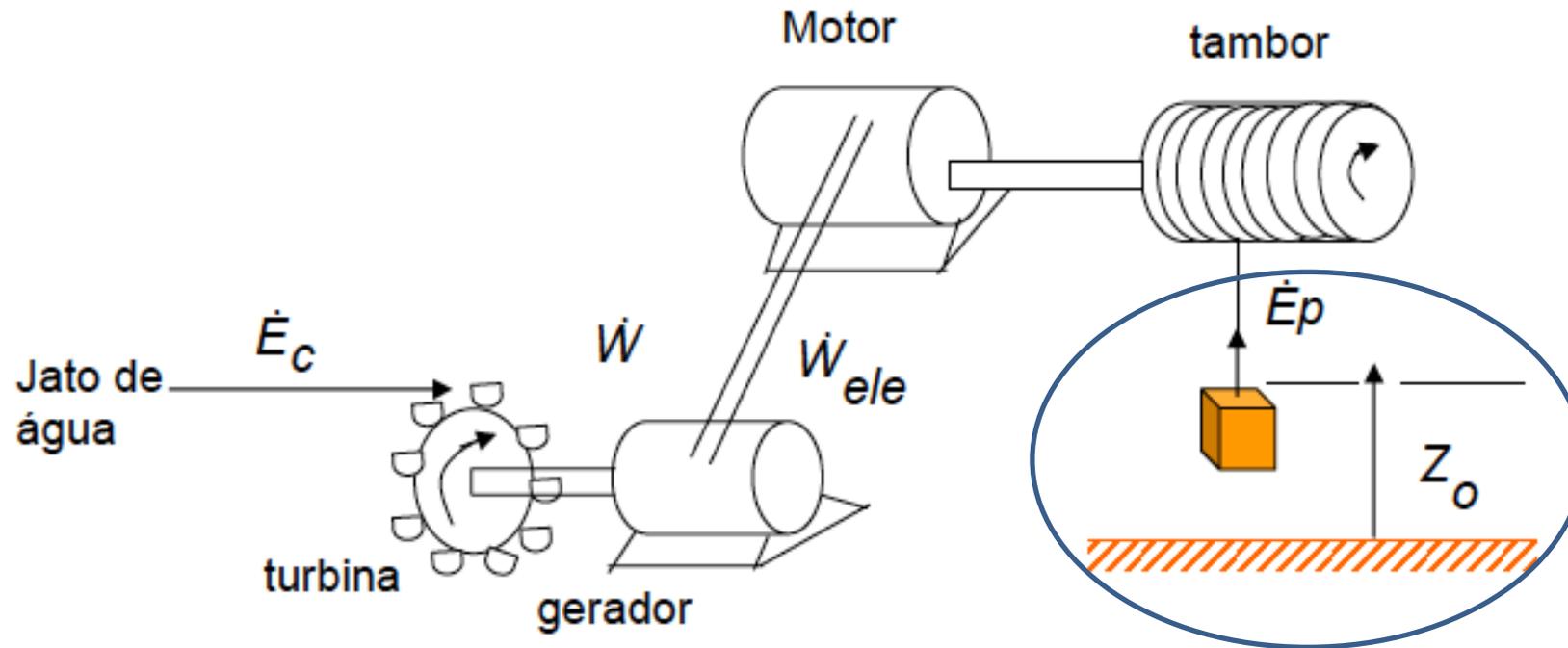
$W < 0$ fornecido para o sistema

$$[W] \rightarrow \begin{array}{l} J \\ \text{kWh} \\ \text{kgm} \end{array} \quad [\dot{W}] \rightarrow W$$

Várias formas de realização de trabalho

➤ Trabalho de eixo, por exemplo.

Energia é transferida e armazenada quando há realização de trabalho

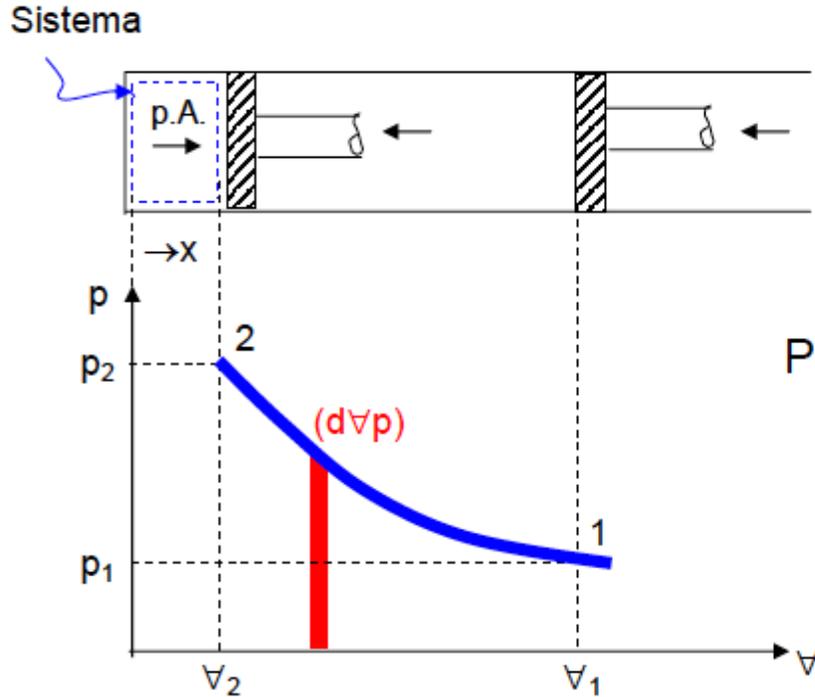


Definição de trabalho ->
Levantamento de uma
massa

Trabalho de Expansão e Compressão

➤ Trabalho associado a expansão da fronteira do sistema.

$$P = \frac{F}{A}$$



$$\delta W = p \cdot A \cdot dx$$

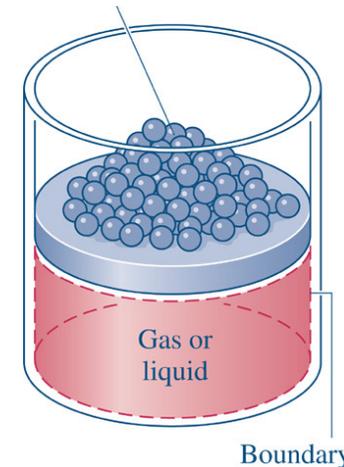
$$\delta W = p dV$$

Processo quase estático

$${}_1W_2 = \int_1^2 p dV$$

Em Mecânica:

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$



Posso descrever o caminho pelo qual a fronteira passou – processo quase estático

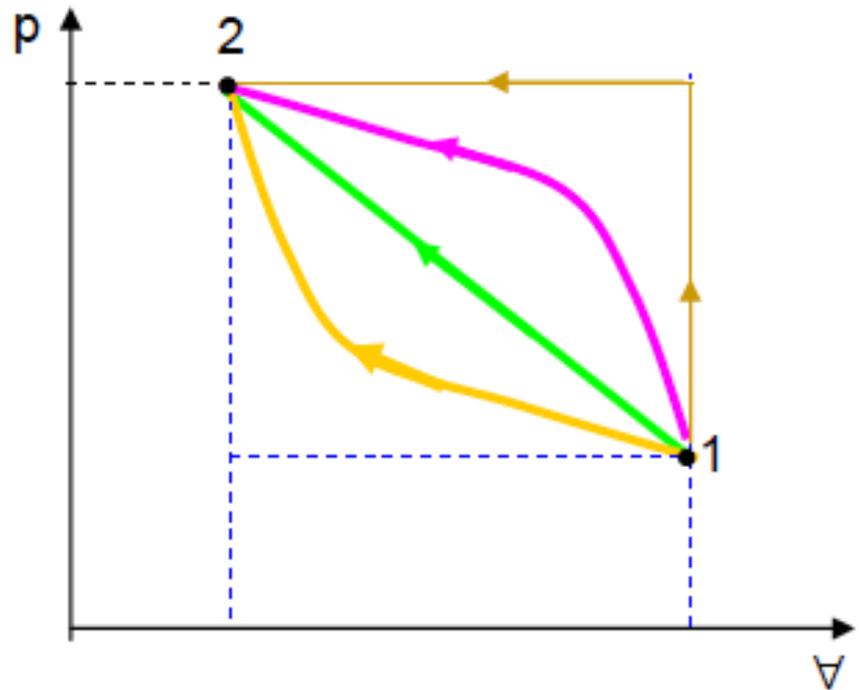
W: função de linha/diferencial inexata

→ NÃO É PROPRIEDADE TERMODINÂMICA

Função do Caminho – Diferencial inexata

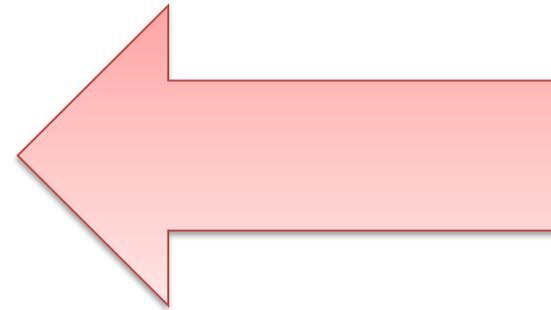
W: função de linha/diferencial inexata

↳ NÃO É PROPRIEDADE TERMODINÂMICA

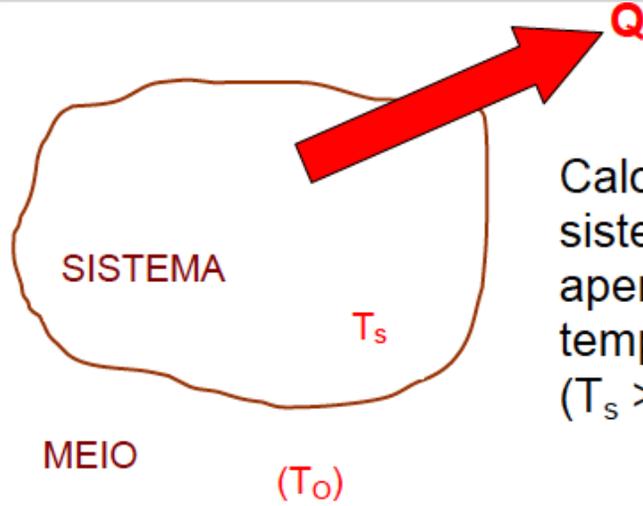


$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1$$

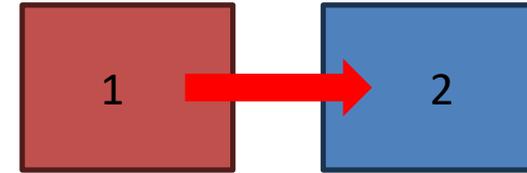
$$\int_1^2 \delta W = {}_1W_2$$



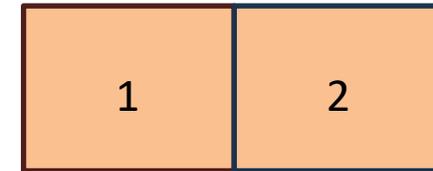
Definição de Calor



Calor: energia transferida do sistema para o meio devido apenas à diferença de temperatura entre eles ($T_s > T_o$)



$${}_1Q_2 = \int_1^2 \delta Q$$



$Q > 0$ transferido para o sistema

$Q < 0$ transferido do sistema

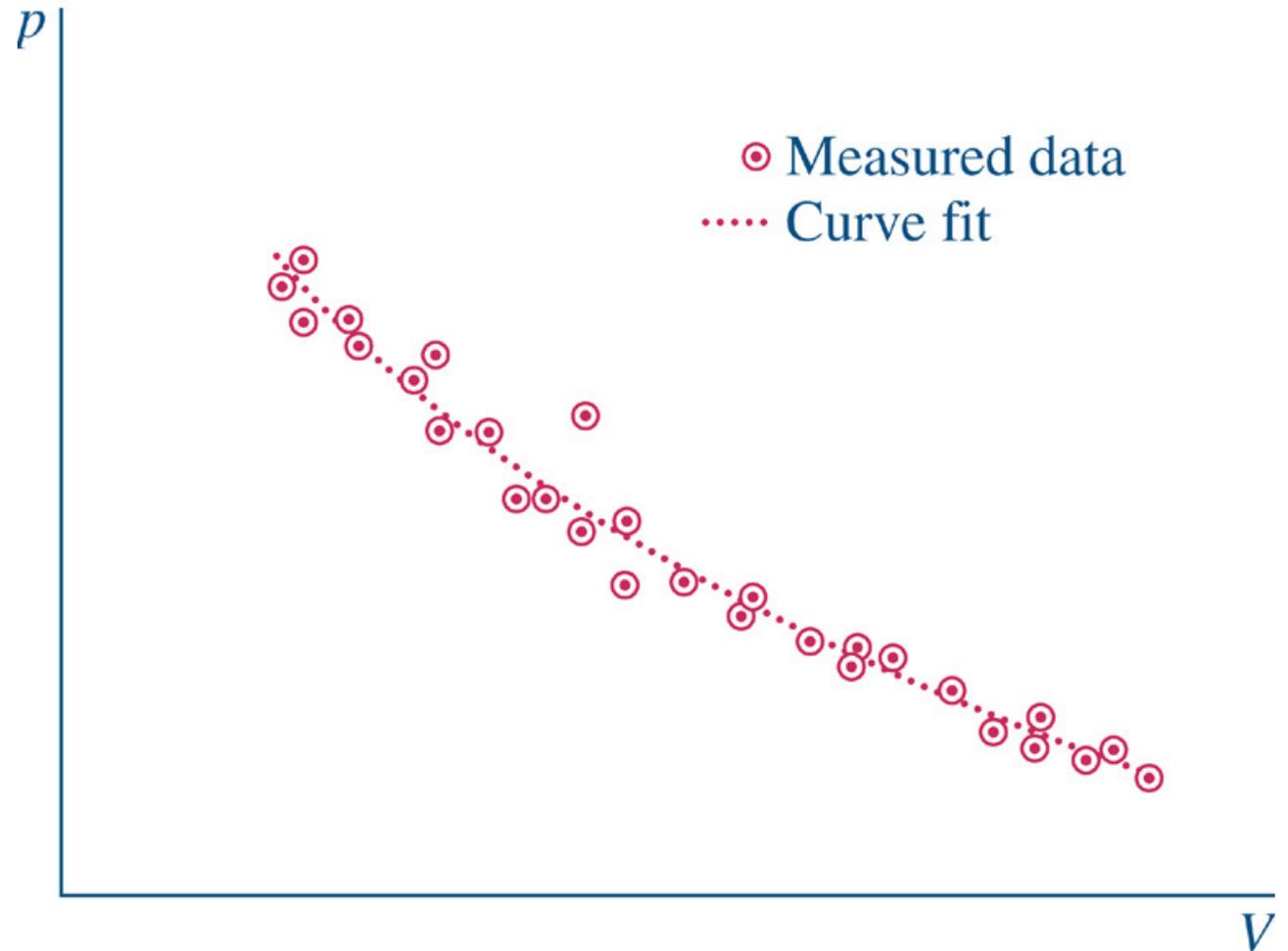
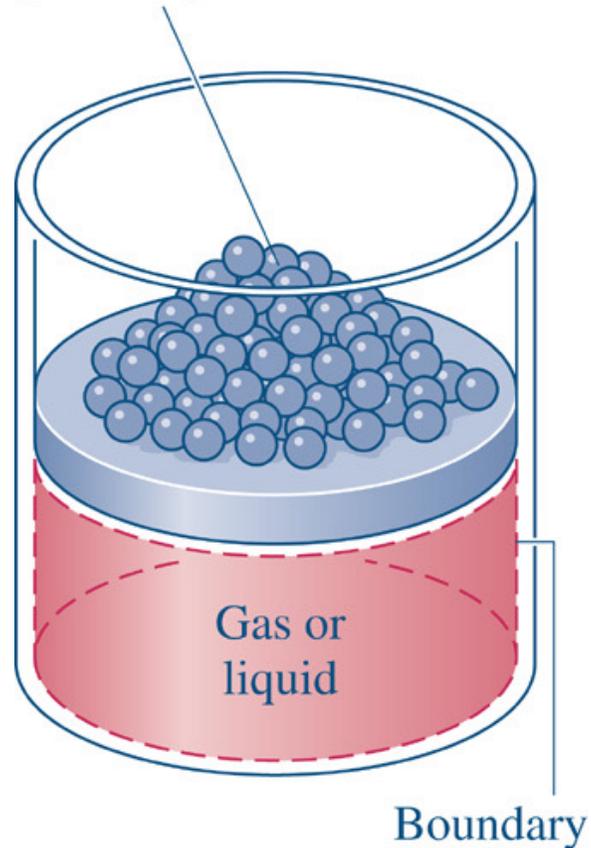
$$[Q] = J_{\text{cal}} \quad [\dot{Q}] = W$$

$${}_1Q_2 = \int_1^2 \delta Q$$

função de linha

Conceitos Básicos – Processos Quase estáticos

Incremental masses removed during an expansion of the gas or liquid



Lembrando: Notação de Máquinas Térmicas

Trabalho realizado pelo sistema é POSITIVO

Calor fornecido ao sistema é POSITIVO

Convenção de Sinais da Máquina Térmica.

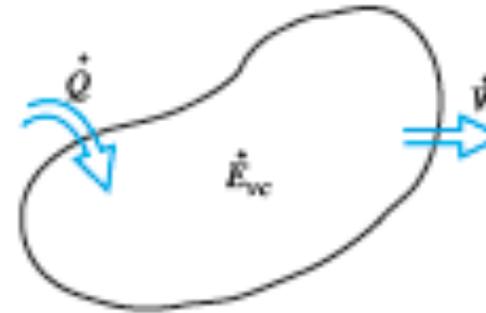
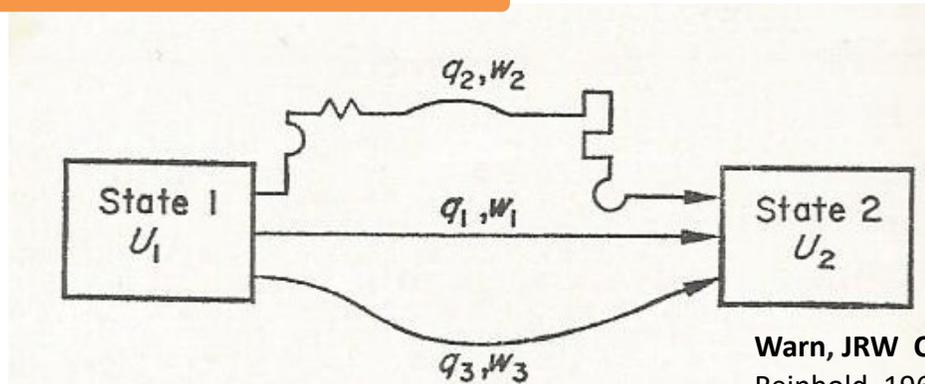


Figura 3.1

Convenção de sinais para os termos da energia.

- Propriedade: Independe do caminho.
- Calor e trabalho dependem do caminho



Warn, JRW Concise Chemical Thermodynamics. Van Nostrand Reinhold, 1969

Revisão: Primeira Lei da Termodinâmica

➤ Balanço de Energia para um Sistema:

✓ Para um ciclo: $\oint \delta Q = \oint \delta W$

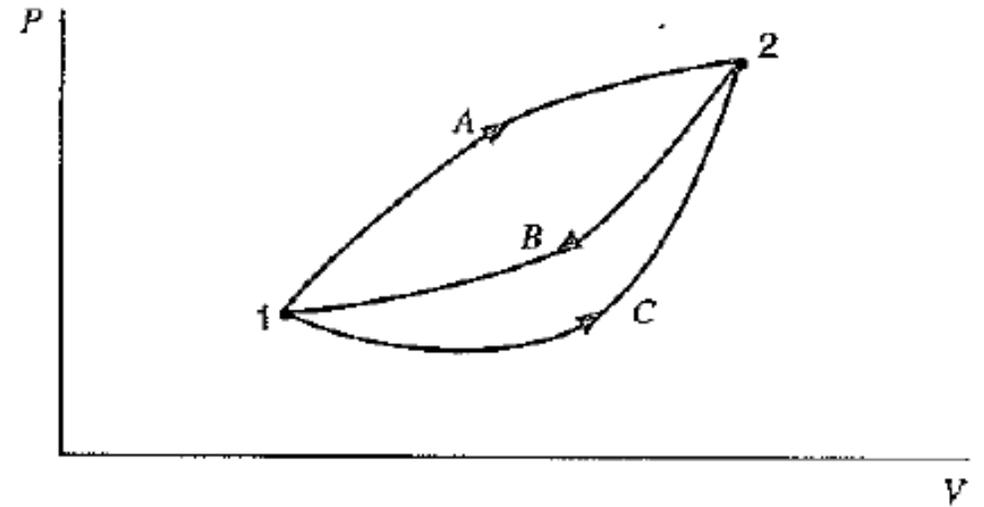
✓ Para um processo:

$$\delta Q - \delta W = dE$$

$$dE = dE_{cinética} + dE_{potencial} + dU$$

✓ Portanto:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 + m \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + mg(z_2 - z_1)$$



Primeira Lei da Termodinâmica para um Sistema

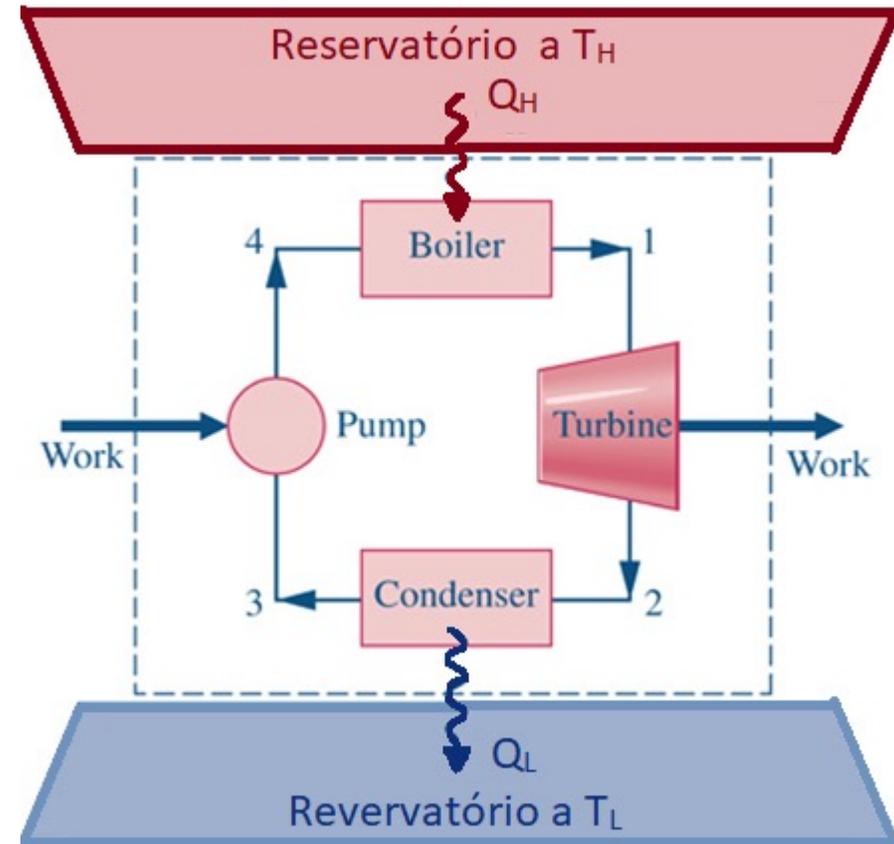
- Como todas as Leis Físicas, é possível mostrar a validade do chamado “balanço de energia”, ou seja: Para um ciclo termodinâmico:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

$$\sum Q = \sum W$$

$$Q_H - |Q_L| = W_{sai} - |W_{entra}|$$

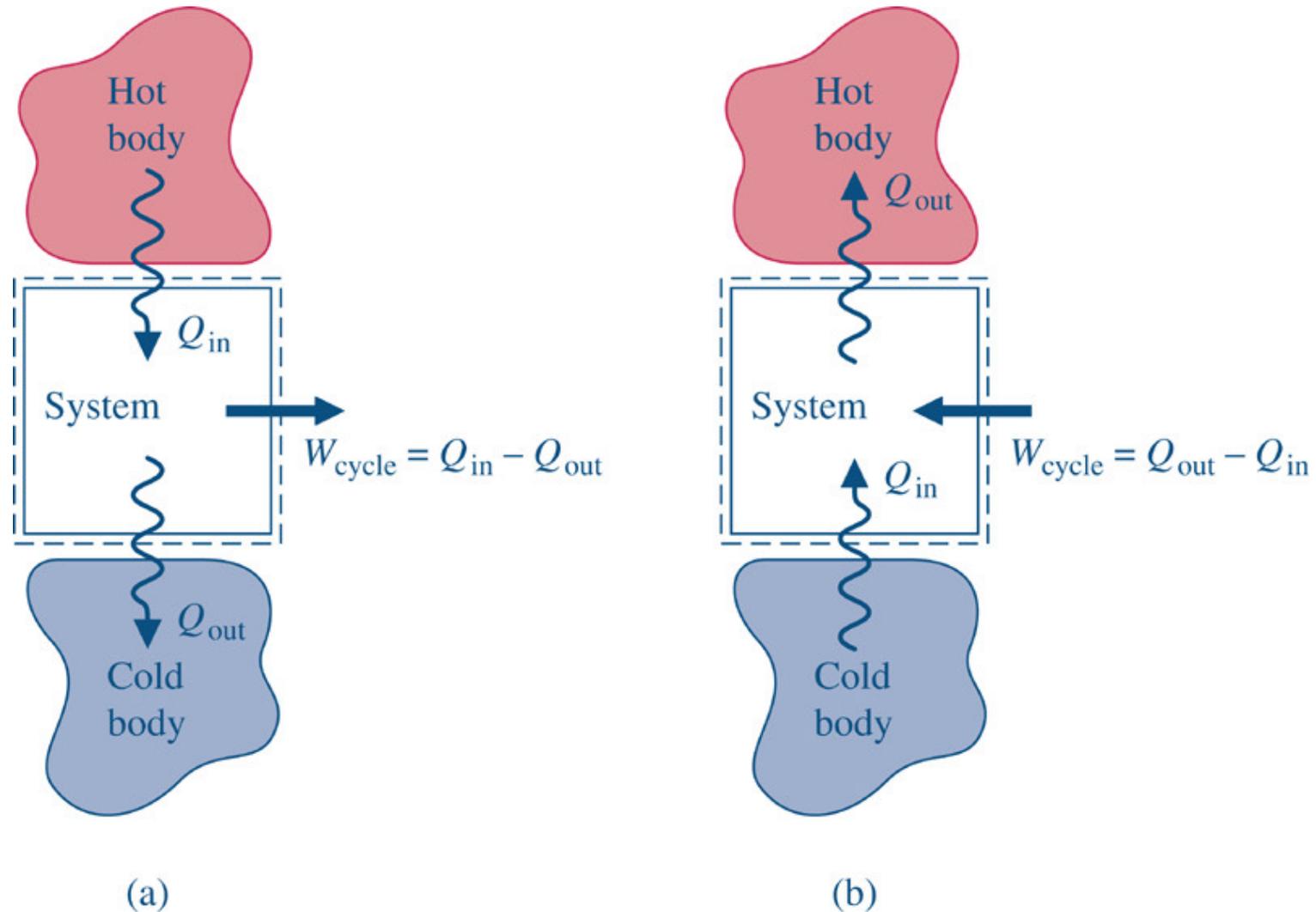
$$Q_H - |Q_L| = W_{liq}$$



Equivalente entre calor e trabalho:

<https://www.youtube.com/watch?v=uDrdaNcGpwo>

Exemplo de como ocorrem ciclos termodinâmicos



Primeira Lei em Forma de Taxa

$$\frac{\Delta U}{dt} + \frac{\Delta E_c}{dt} + \frac{\Delta E_p}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt}$$



$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{dt} = \frac{dU}{dt}$$

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\Delta E_p}{dt} = \frac{dE_p}{dt}$$

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\Delta E_c}{dt} = \frac{dE_c}{dt}$$

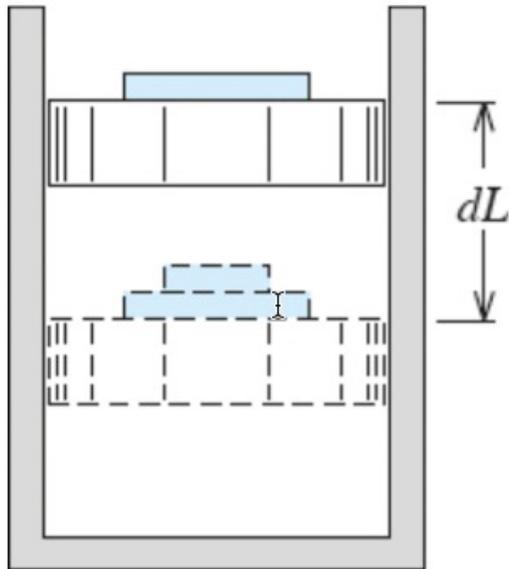
$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\delta W}{dt} = \dot{W}$$

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{dt} = \dot{Q}$$

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = \dot{Q}_{12} - \dot{W}_{12}$$

Propriedade Termodinâmica: Entalpia

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 + m \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + mg(z_2 - z_1)$$



- Processo quase-estático à pressão constante:

$${}_1W_2 = \int p dV \longrightarrow {}_1W_2 = \int p dV = p \int dV = p(V_2 - V_1)$$

$${}_1Q_2 - p(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1) \quad H \equiv U + pV$$

- Definimos a propriedade termodinâmica entalpia para um caso bastante particular porém ela é uma propriedade de extrema importância dentro da termodinâmica.

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = H_2 - H_1$$

Trabalho de escoamento

Trabalho para colocar ou retirar energia do volume de controle.

$$W_f = W_{\text{atrito}} + W_{\text{atm}} + W_{\text{virabrequim}} = \int_1^2 (F_{\text{atrito}} + P_{\text{atm}}A + F_{\text{virabrequim}}) dx$$

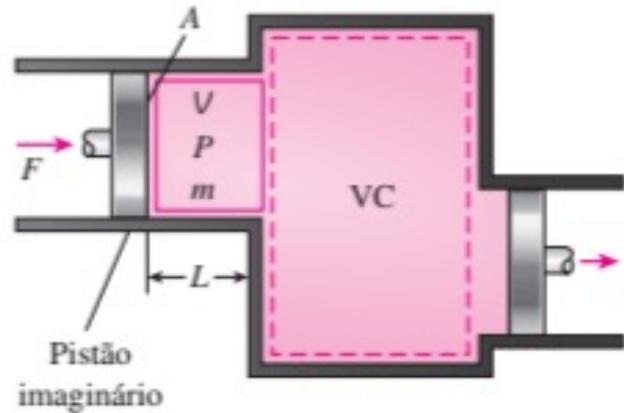


FIGURA 5-11 Esquema do trabalho de fluxo.

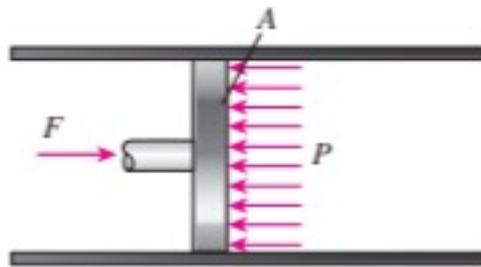


FIGURA 5-12 Na ausência de aceleração, a força aplicada em um fluido por um pistão é igual à força aplicada no pistão pelo fluido.

$$\dot{W}_{\text{fluxo}} = \sum_e \dot{m}_e (p_e v_e) - \sum_s \dot{m}_s (p_s v_s)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{eixo}} + \dot{W}_{\text{fluxo}} + \dot{W}_{\text{viscoso}}$$

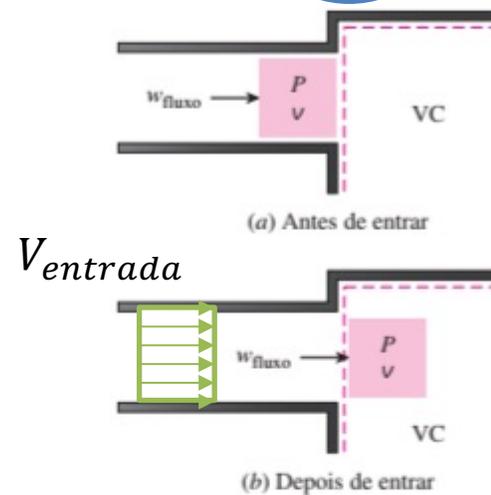


FIGURA 5-13 O trabalho de fluxo é a energia necessária para empurrar um fluido para fora ou para dentro de um volume de controle e é igual a Pv .

Transforma-se em variação de energia interna, aumento de temperatura do fluido – Quando tivermos segunda lei teorema do trabalho perdido.

Revisão: Equação da Continuidade

➤ Balanço de massa:

✓ Para um sistema:

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = 0$$

✓ Aplica-se o Teorema de Transporte de Reynolds:

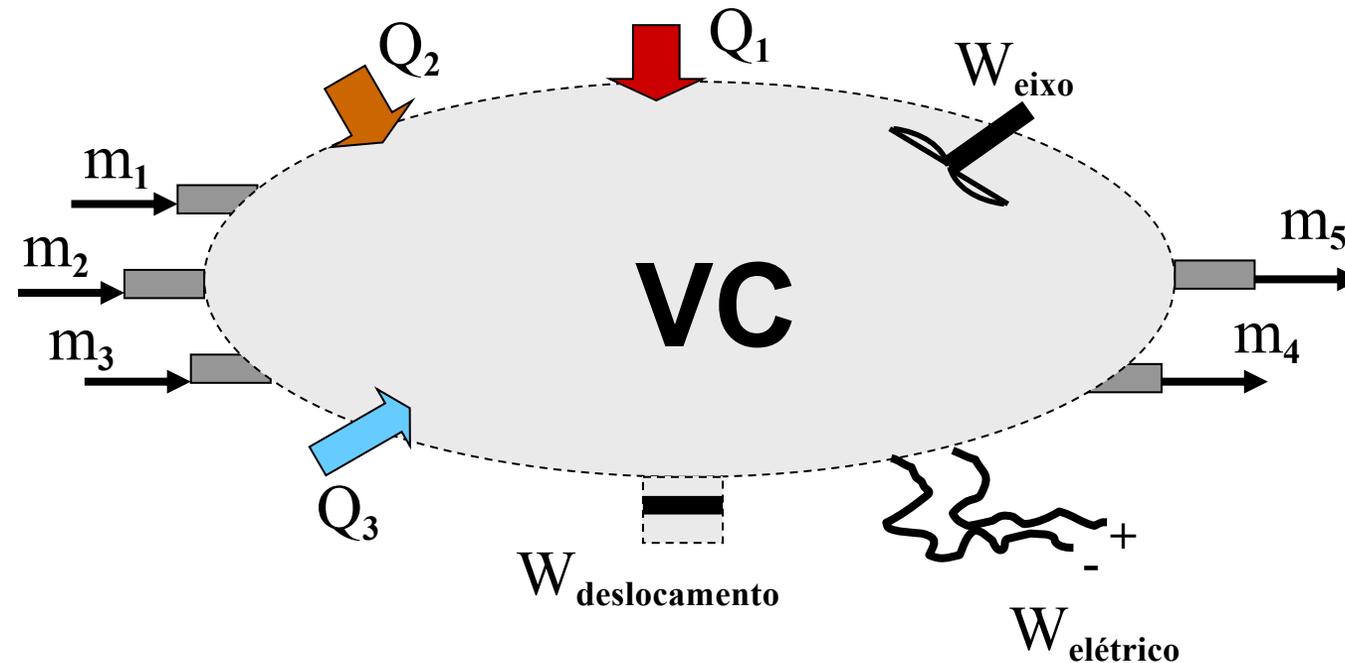
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV + \iint \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

✓ Para um Volume de Controle:

$$\frac{dm_{V.C}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s$$

Primeira Lei da Termodinâmica para Volume de Controle

➤ Teorema de transporte de Reynolds: $N=E$, portanto, $\eta=e$



$$\frac{dE_{\text{VC}}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{\text{VC}} - \dot{W}_{\text{VC}}$$

Volumes de Controle

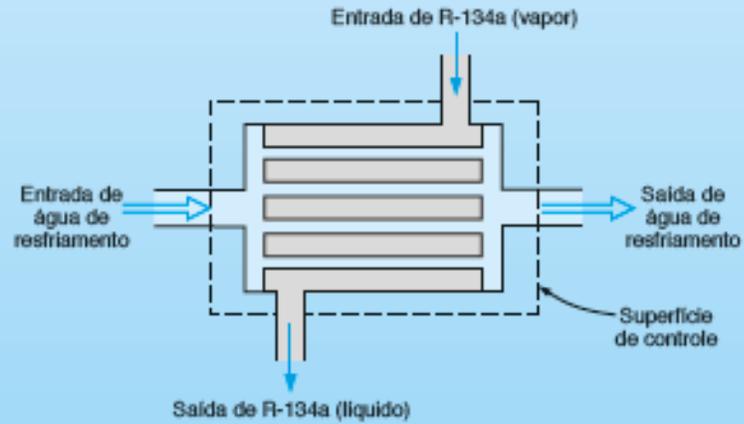


FIGURA 4.6
Diagrama esquemático de um condensador para R-134a.

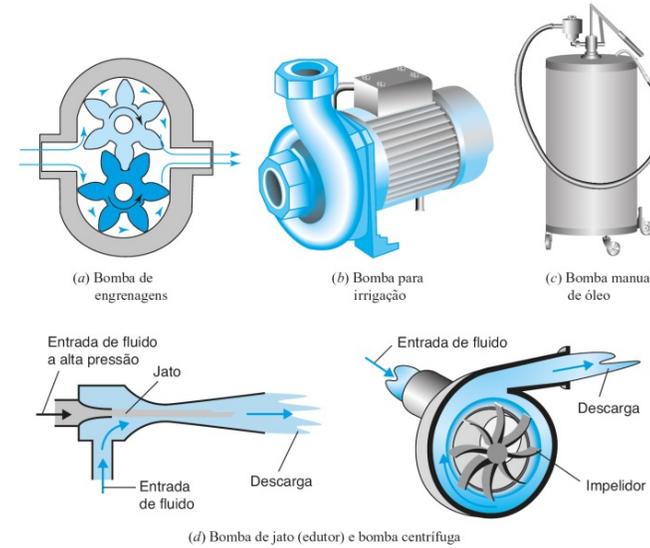


Figura 4.20
Bombas hidráulicas.

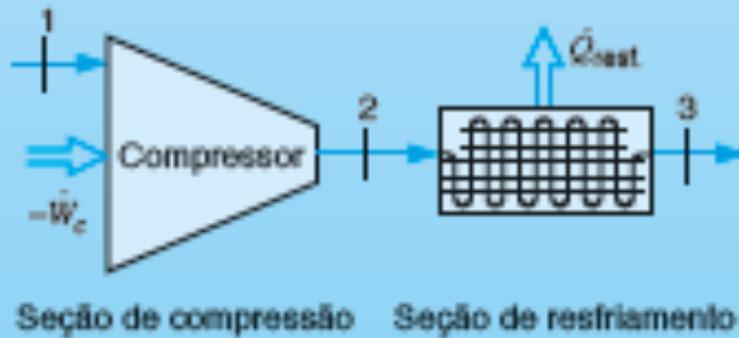


FIGURA 4.9
Esboço para o Exemplo 4.5.

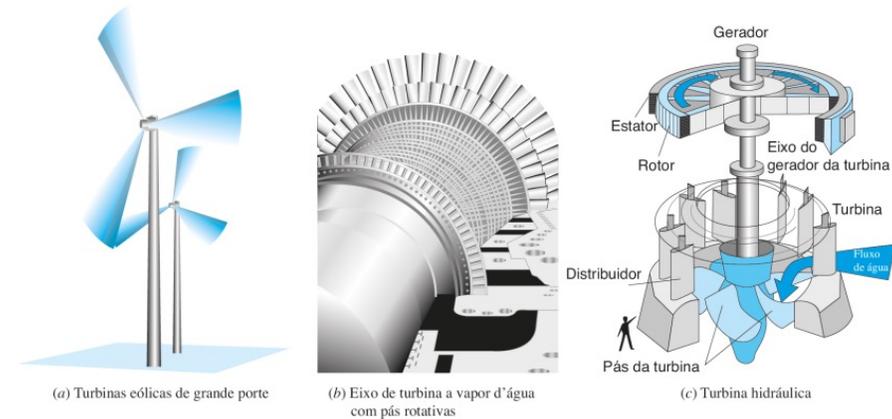


Figura 4.21
Exemplos de turbinas.

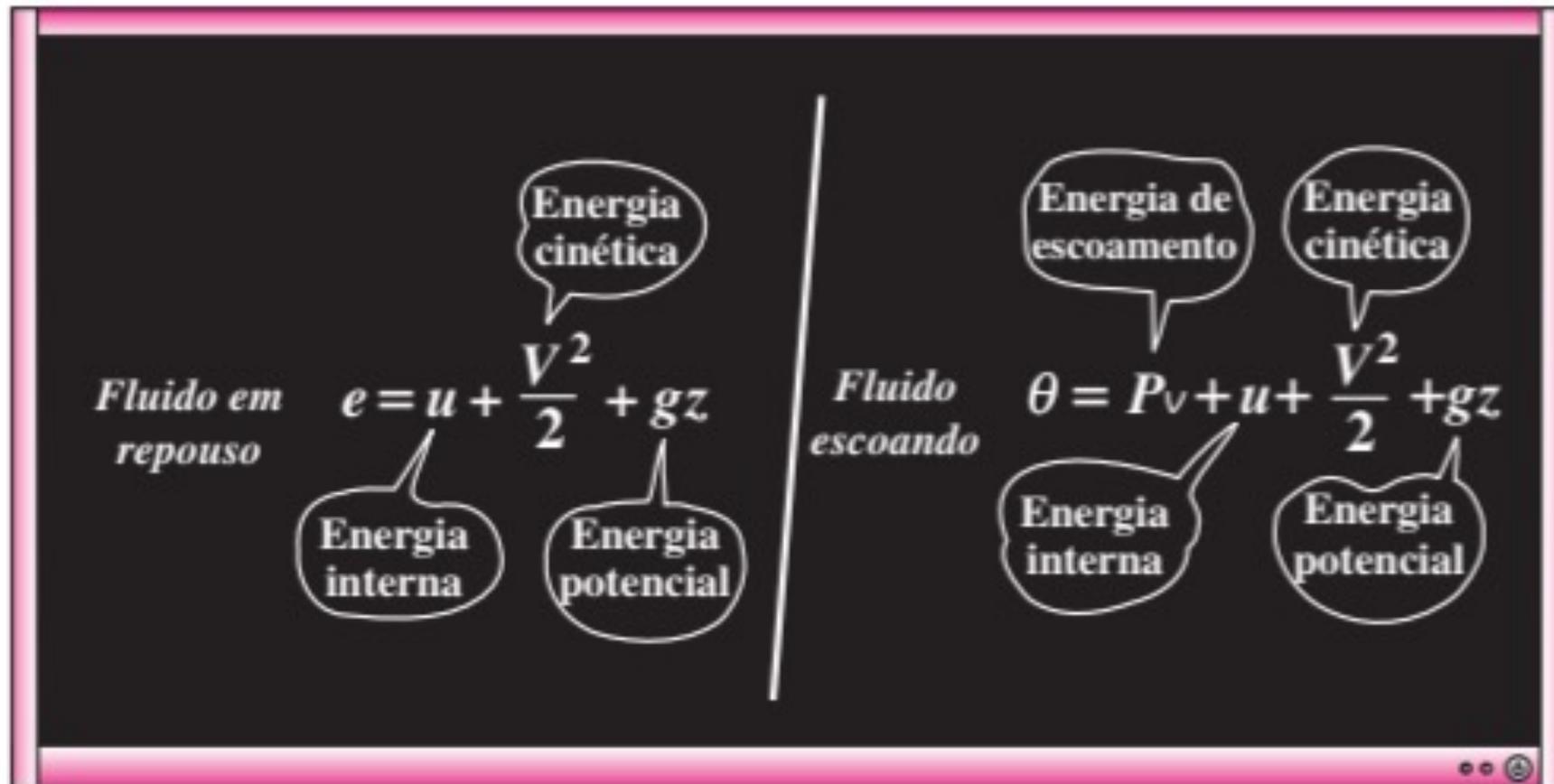


FIGURA 5-14 A energia total é composta de três partes em um fluido em repouso e de quatro partes em um fluido em escoamento.

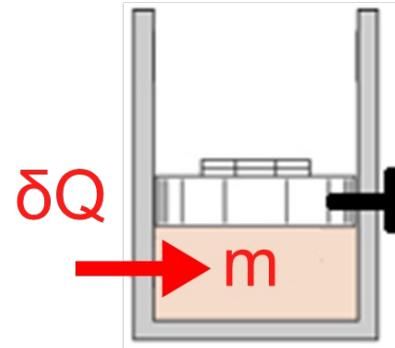
Calor específico (uma fase e composição fixa)

C_p \equiv calor específico à pressão cte

C_v \equiv calor específico a volume cte

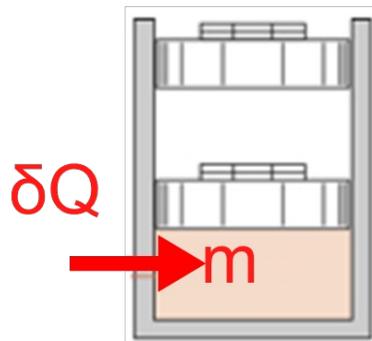
$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left\{ \begin{array}{l} \delta Q = du + \delta W \\ \delta Q = du + p dV \\ c_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \end{array} \right.$$

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \left\{ \begin{array}{l} c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \end{array} \right.$$



Calor específico a volume constante

$$c_v = \frac{\delta Q}{m dT}$$



Calor específico a pressão constante

$$c_p = \frac{\delta Q}{m dT}$$

Experimento de Joule em 1843

(b) In 1843, Joule performed a classic experiment which is depicted in Fig. 4.2. Dry air was introduced into the left-hand container, whereas the right-hand one was evacuated. The temperature was read carefully and noted, and then tap C opened. The gas immediately rushed through the stopcock and filled all the available space. Joule noticed no change of temperature of the water, even with

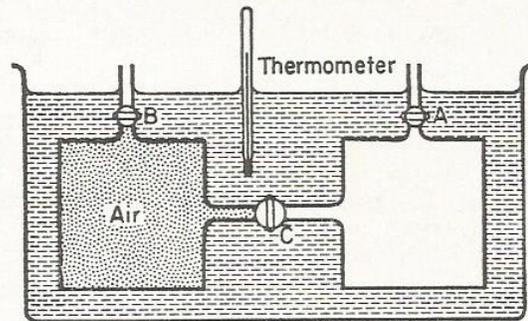
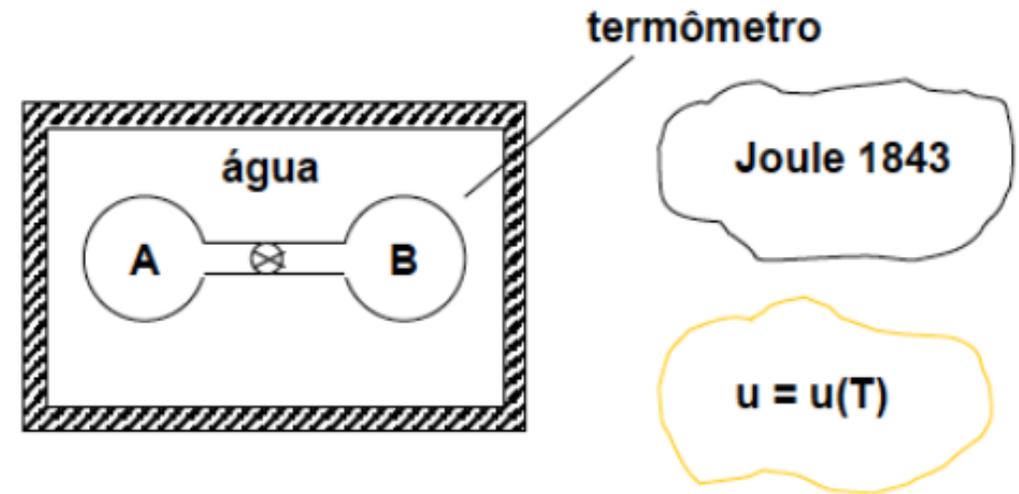


FIG. 4.2 Joule's gas expansion experiment. On allowing gas to flow into the right-hand container, no temperature change was observed.

Warn, JRW **Concise Chemical Thermodynamics**. Van Nostrand Reinhold, 1969

➤ **Objetivo:**

mostrar que para gases perfeitos, $u = f(T)$



Vamos aa casos particulares: Gases perfeos

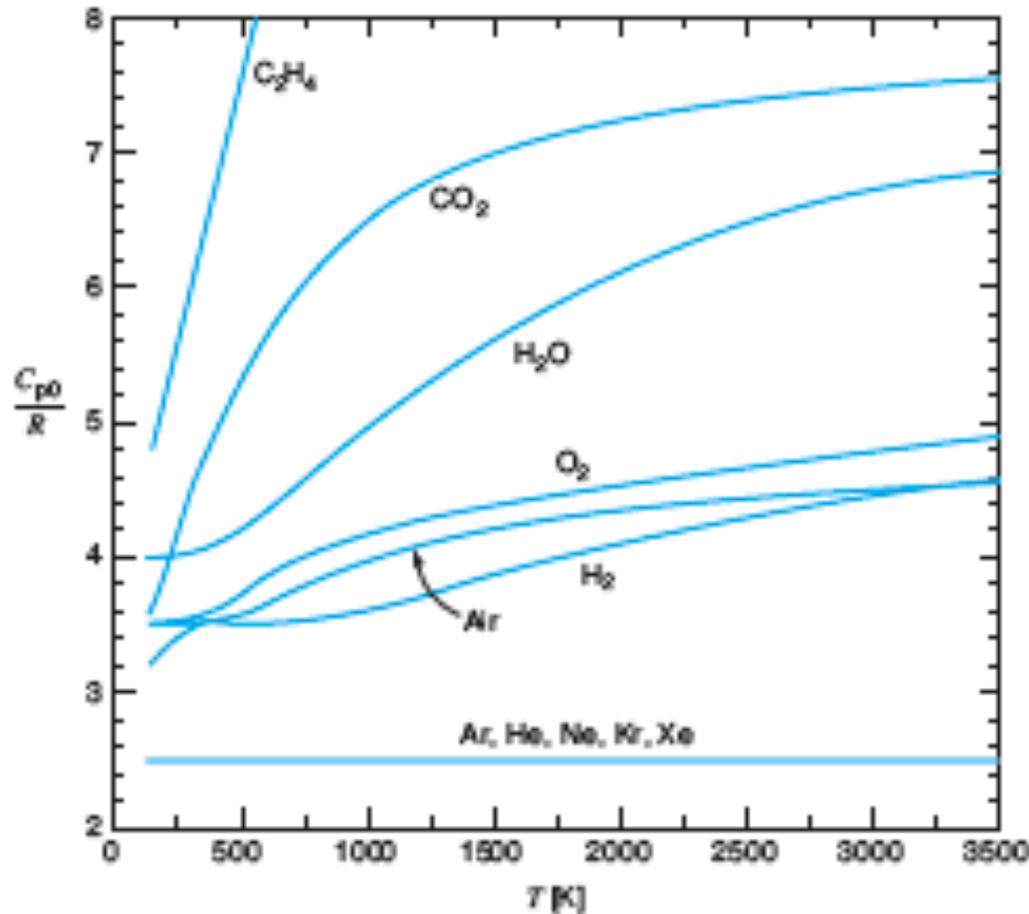


Figura 3.26

Calor específico em função da temperatura para diversos gases.

$c_p = c_{p0} =$ constante para gases perfeitos

Conforme a complexidade da molécula aumenta, temos que $c_p = f(T)$ e não mais da pressão.

Por que?????

Experimento de Joule - $U = U(T)$, i.e, $c_p = c_p(T)$

- Temos do resultado do experimento de Joule, se não houve variação da temperatura com uma expansão (aumento do volume e redução da temperatura), temos que ele é função apenas de T . O que isso nos influencia no c_p ?

- **Calor Específico:** $c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{v=cte}$

✓ Para gases perfeitos: $h=h(T)$ $u = u(T)$ (lembrando $h = u + pv = u + RT$)

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{v=cte}$$

$$c_v = \frac{du}{dT} \rightarrow c_v = c_v(T)$$

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{p=cte}$$

$$c_p = \frac{dh}{dT} \rightarrow c_p = c_p(T)$$

$pv = RT$
Somente
para gases
perfeitos

Sólidos e Líquidos

➤ Entalpia:

$$h = u + pv$$

➤ Calor Específico:

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_{v=cte}$$

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{p=cte}$$

Sólidos e Líquidos, no qual considera-se como incompressível:

$$dh = du + d(pv)$$

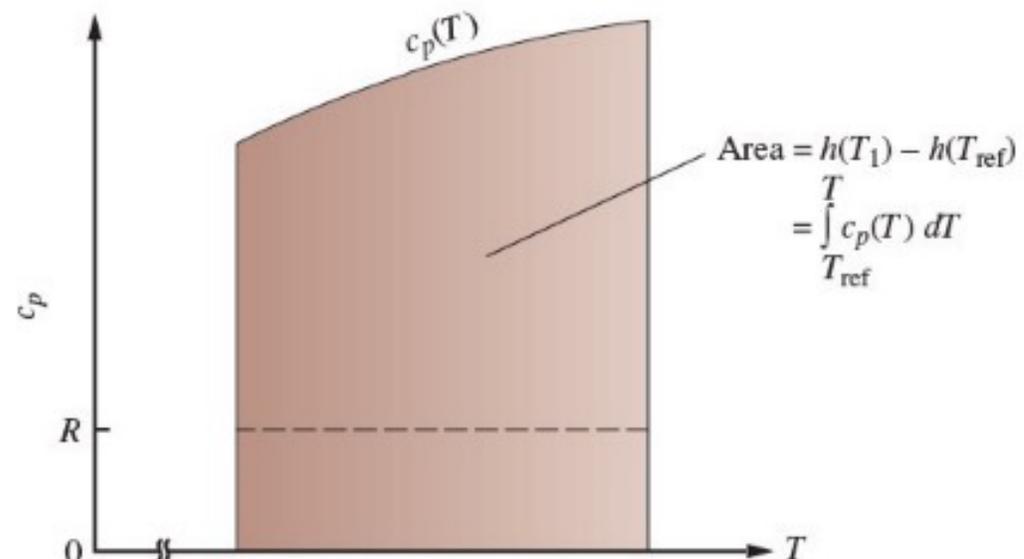
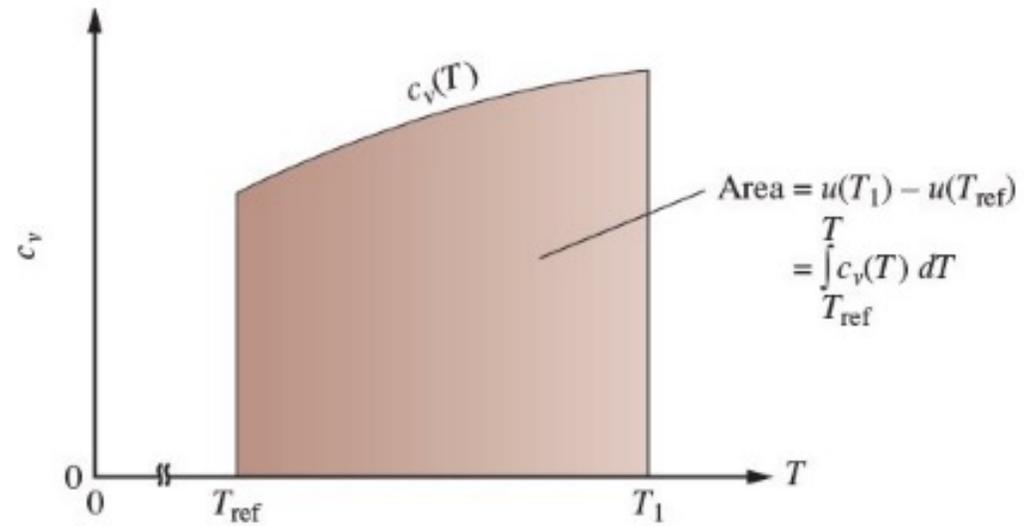
$$dh = du + pdv + vdp$$

$$dv \rightarrow 0(\text{incompressível})$$

$$v \rightarrow \text{pequeno}$$

$$dh \approx du \approx cdT$$

Quando c_p e c_v dependem de T



Turns, Stephen R..
Thermodynamics: Concepts and
Applications Cambridge University
Press.

Cuidado Final

➤ Por exemplo, para gases perfeitos:

$$u_2 - u_1 = c_{v0}(T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1)$$

➤ **Jamais:**

~~$$u_1 = c_{v0}(T_1)$$~~

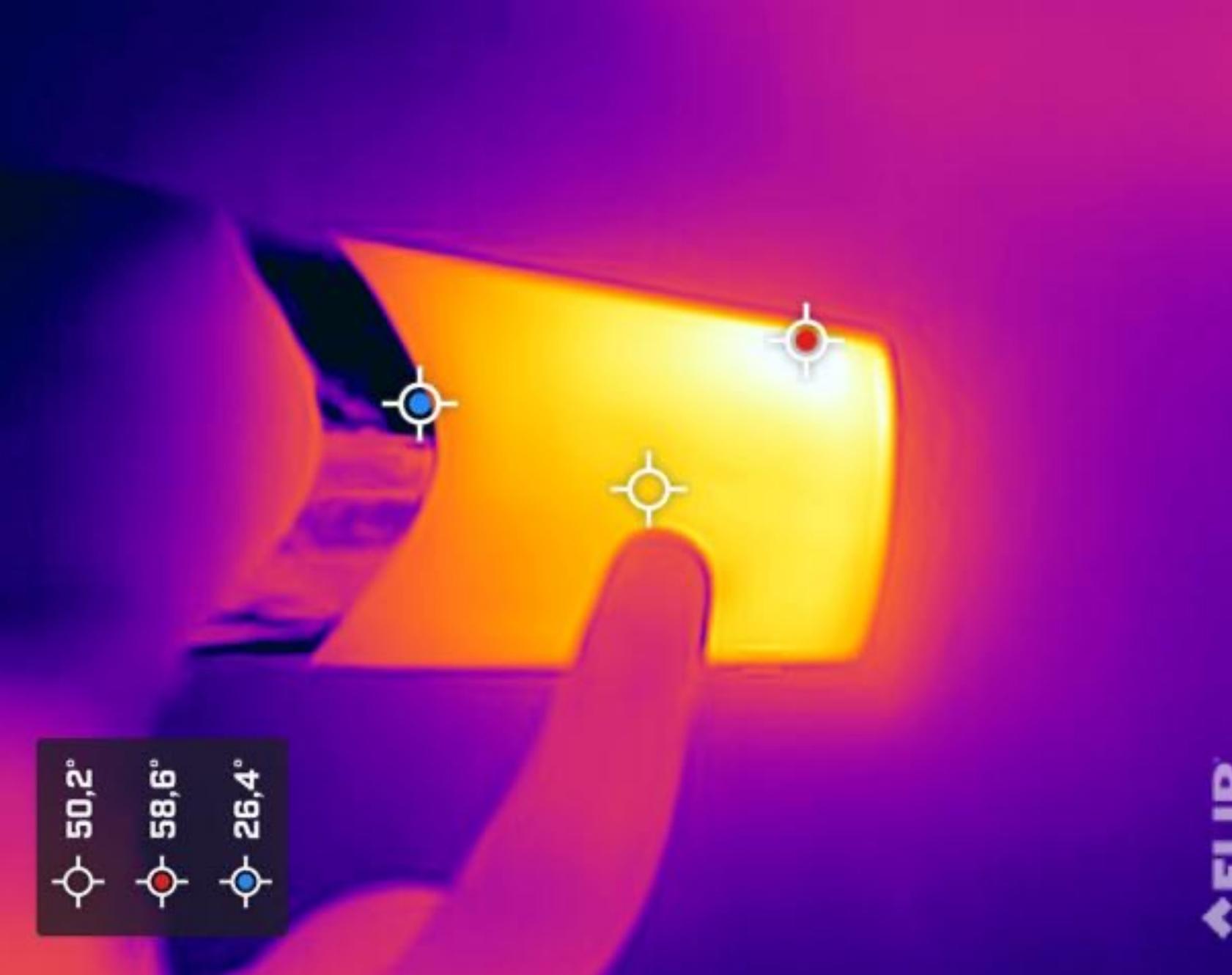
~~$$h_1 = c_{p0}(T_1)$$~~

➤ **Somente quando estamos montando nossa própria tabela e em apenas um estado, o chamado estado de referência, podemos fazer tanto para energia interna como entalpia**

$$u = u(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_v dT$$

Exercício para Discussão

- Dois colegas da disciplina termodinâmica de 2019 estavam assistindo **atentamente e empolgados** a aula do Prof. Cadu. Certo momento, um deles nota que um pernilongo (provavelmente *Aedes aegypti*!!!) pousou na bochecha do outro. Gentilmente prepara-se para salvar o colega e não hesitou em acertar um vigoroso tapa na bochecha esquerda de seu amigo! Salvou-o de qualquer problema futuro. Agora, o professor notou que houve um aumento da temperatura da região atingida de **1,0 °C**. Considerando que a massa da mão do colega seja de **1 kg** e que **0,5 kg** do tecido da face e da mão (não podemos esquecer o pernilongo) tenham sido afetados pelo impacto. Estime a velocidade da mão em km/h, imediatamente antes do impacto. O calor específico do tecido (face e mão) é 4,0 kJ/kgK. Discutam o tipo de conversão de energia. Essa energia interna do tecido face e mão, 1 °C a mais seria capaz de fazer a mão voltar a ter uma energia cinética na velocidade de impacto?

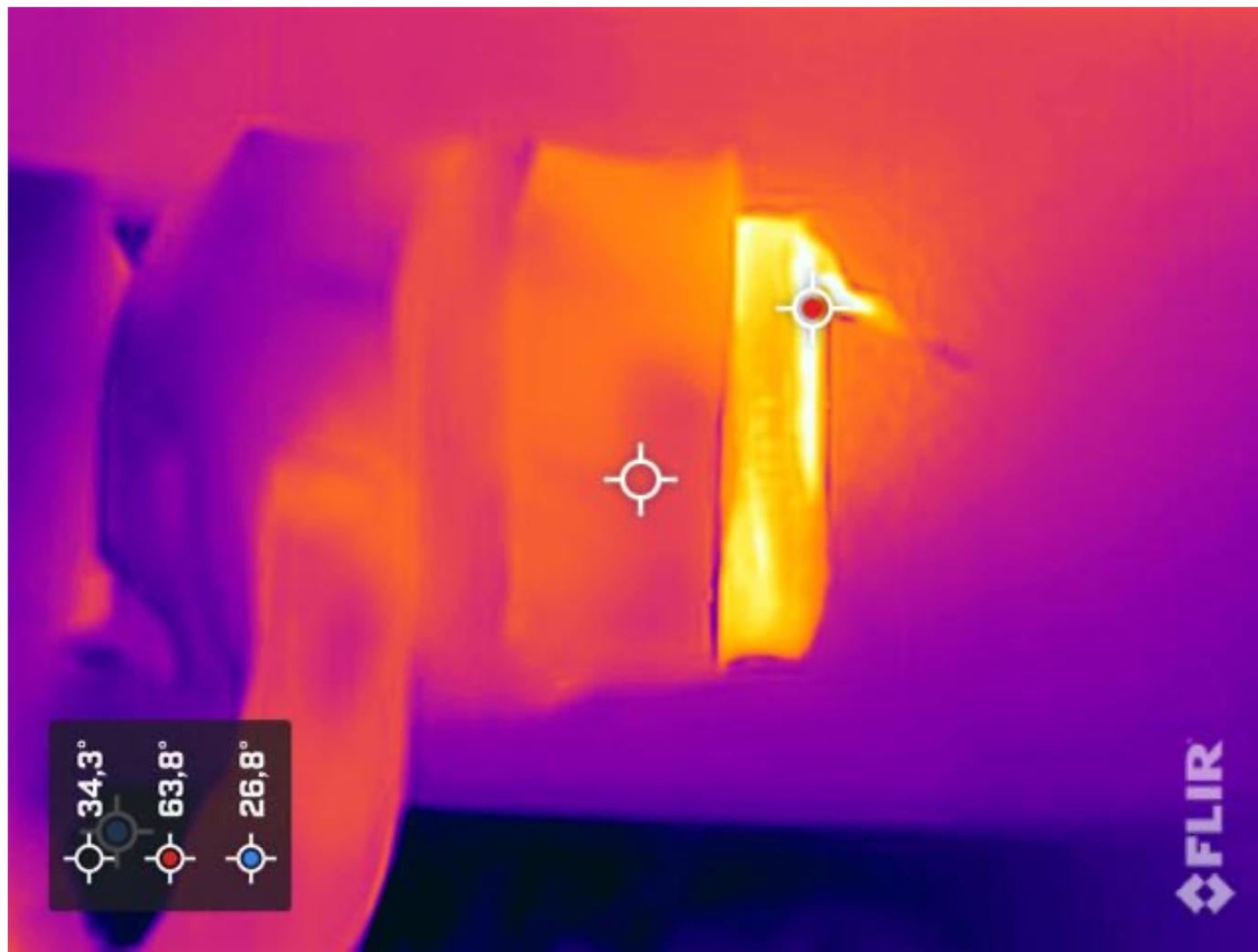


Para equip. térmicos reais e cotidianos

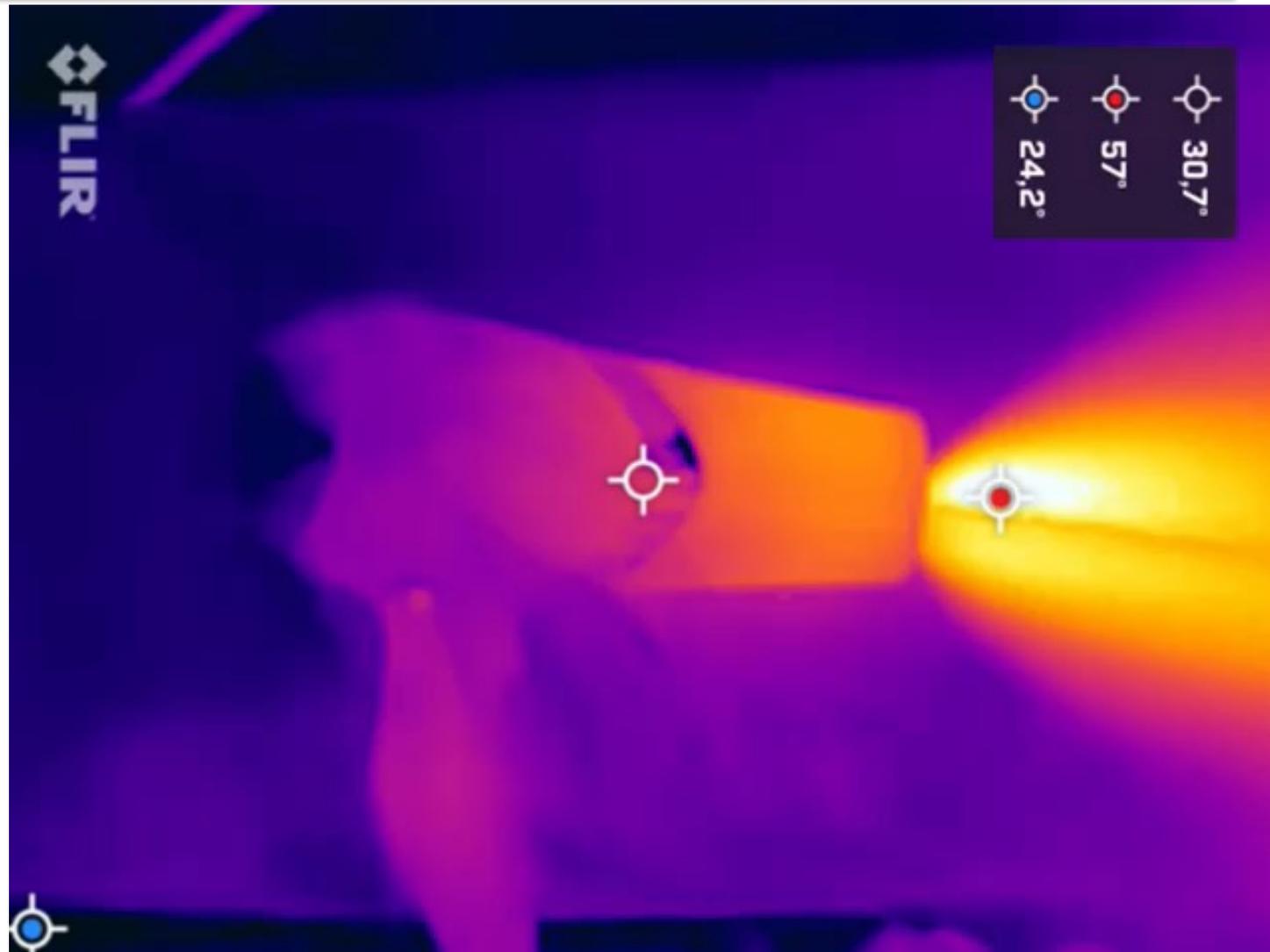
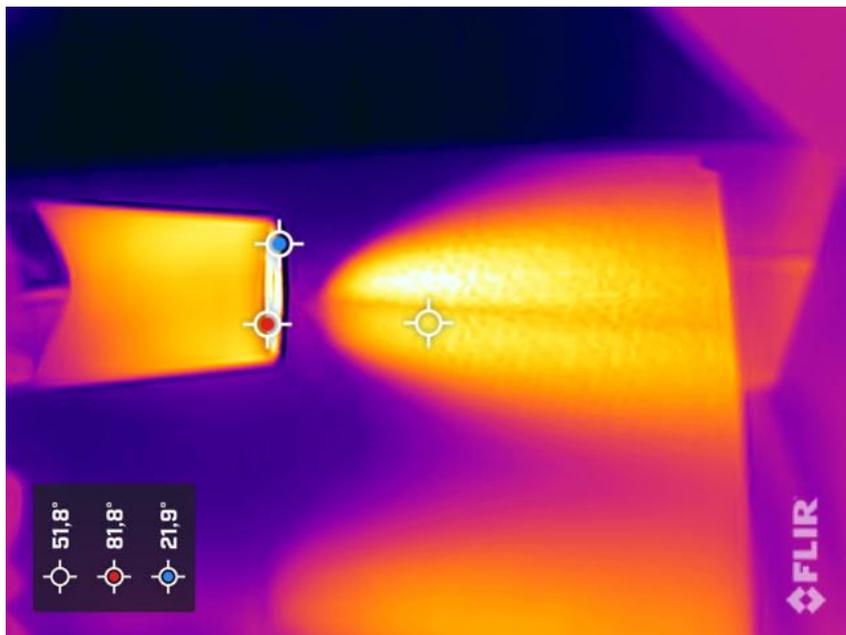
- O que significa uma temperatura maior do que a do ambiente?
 - ✓ Calor **perdido** para o ambiente?
 - ✓ É bom ou ruim?
- Daria para melhorar o desempenho deste equipamento?



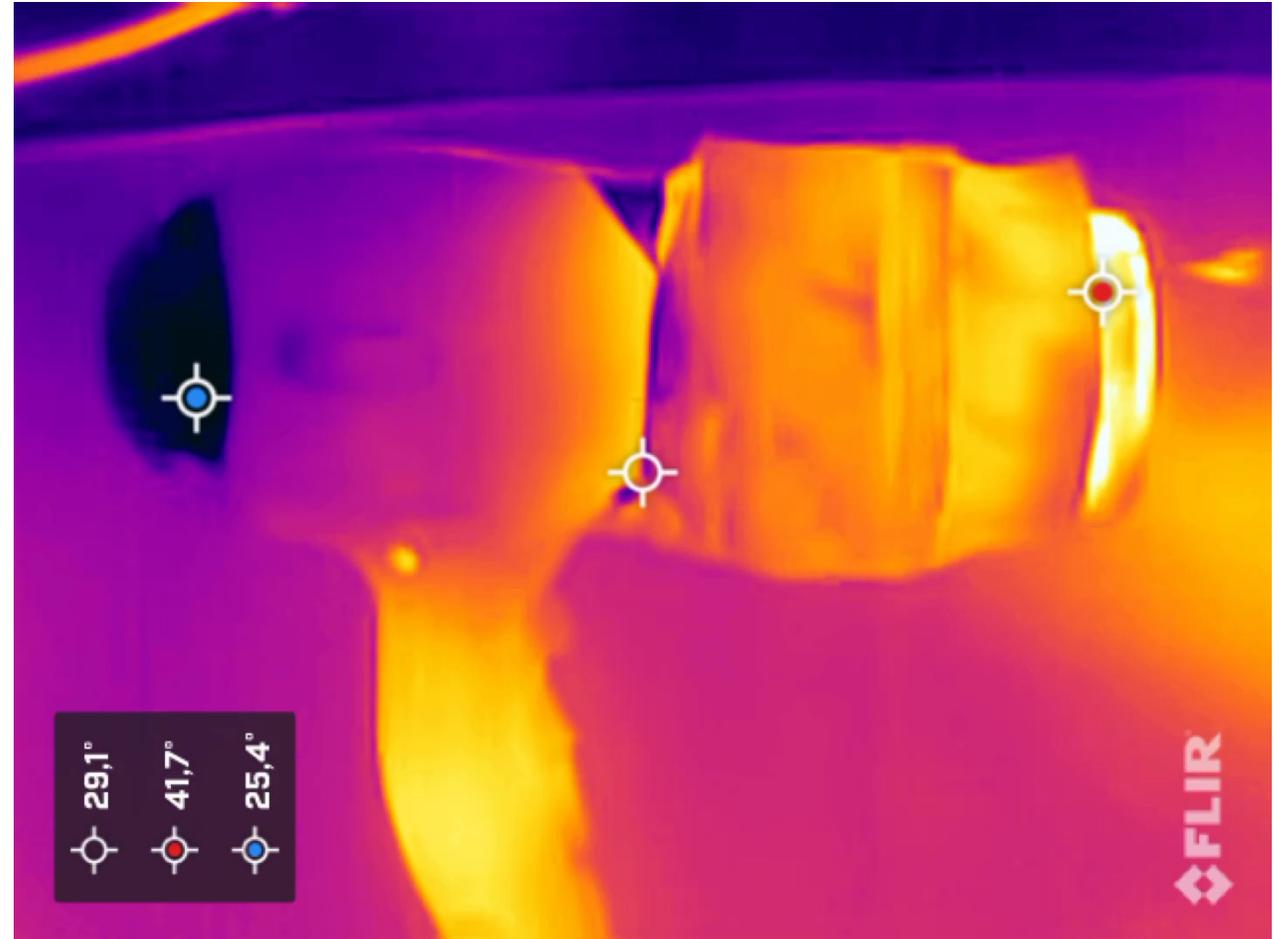
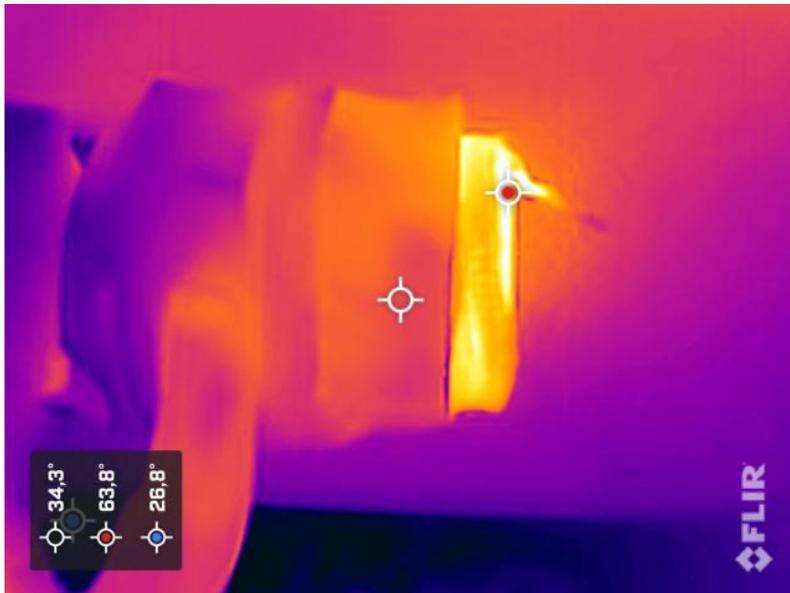
E se isolarmos o equipamento?



Agora vamos aplicar? –
Atinge o Regime
permanente?



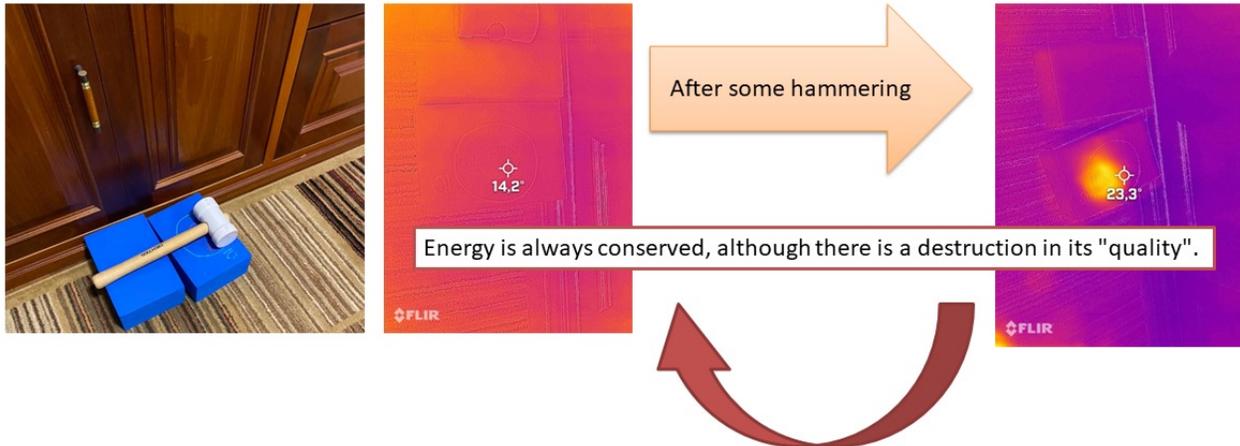
E se isolarmos, o que acontece?



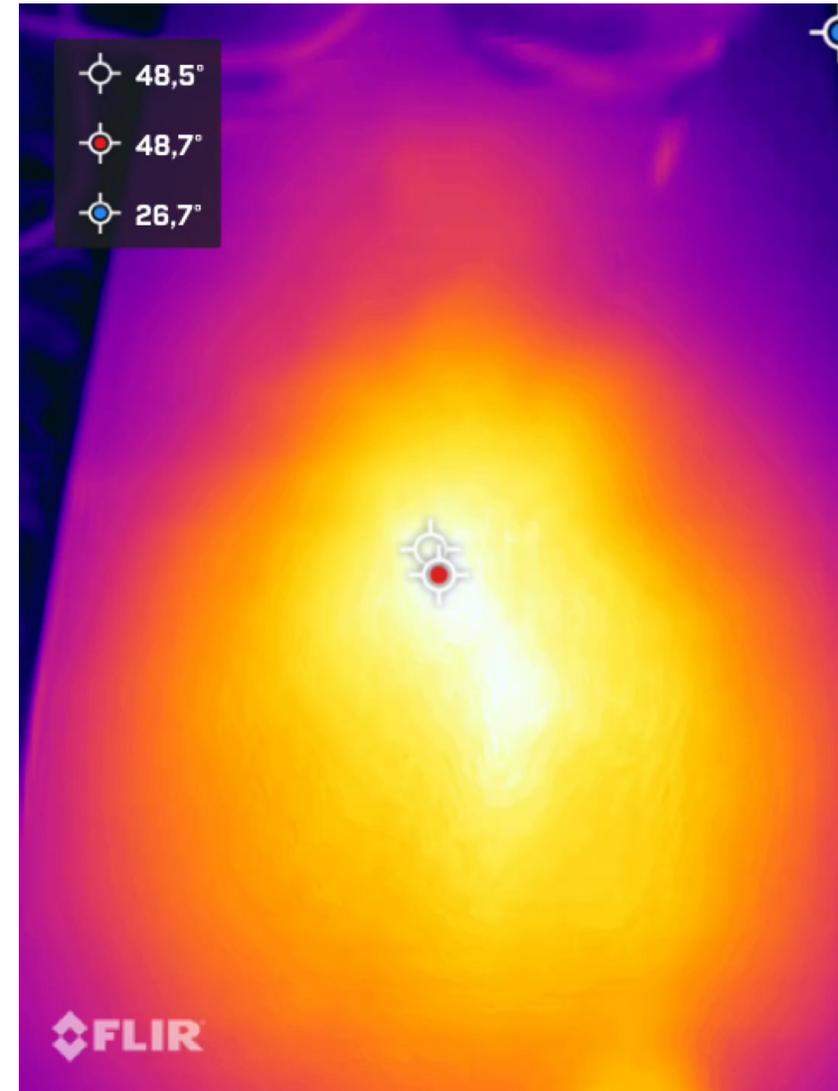
Já esquentamos o bloco com martelada, e agora?

Simple example of lost or destruction of the “quality” of energy

- Never!!!! Our life experience is dictated by the Law of Thermodynamics.
- ✓ The **Second Law of Thermodynamics** and its restriction. We already know it, the next step is to properly understand, agree and apply.

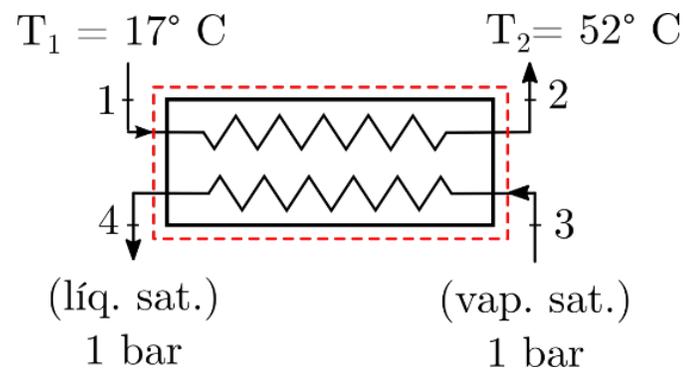
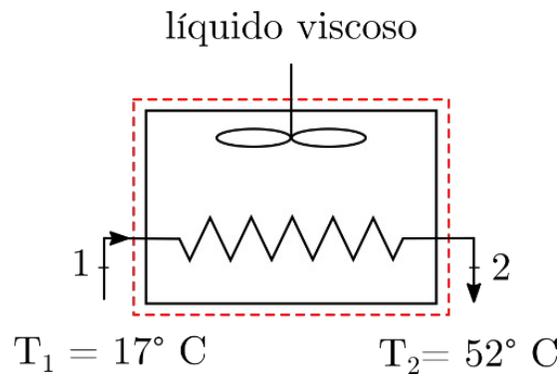


Is it not possible to return to the original conditions only by the touch of the hammer? 7



Exercício da Lista 1

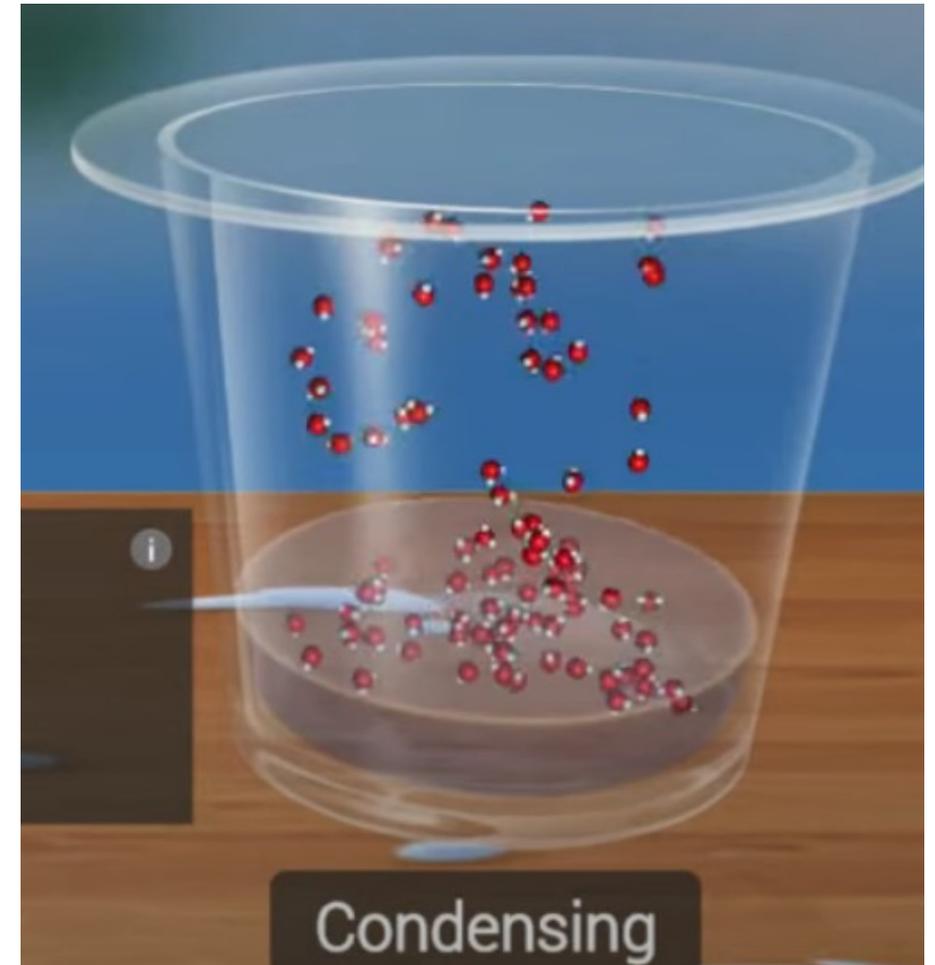
- (10) Um secador de cabelo fornece ar a 83 °C com uma velocidade de 9.1 m/s . O ar entra no duto secador a 22 °C e $3,7\text{ m/s}$ (entrada e saída encontram-se na pressão atmosférica). Considerando que a área de entrada da seção transversal do duto é de $18,7\text{ cm}^2$, que não há variação significativa de pressões entre a seção de entrada e saída e desprezando as perdas de calor para o ambiente, determine:
- ✓ (a) A potência elétrica consumida. (b) **Uma expressão da eficiência do aparelho baseada na 2ª Lei, calcule essa eficiência para as condições de operação do secador.**
- (12) Dois sistemas são propostos para aquecer ar de $17\text{ a }52\text{ °C}$ à pressão constante. Admitindo operação em regime permanente, sem perdas para o meio ambiente e desprezando as variações de energia cinética e potencial, calcule a taxa de produção de entropia por kg de ar que é aquecido para cada um dos sistemas propostos.



Mudanças de fase da água vapor - líquido



Phase Change & Temperature of Water (cK-12 Simulation)

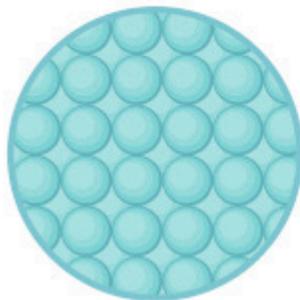


Energia e Estado da Matéria

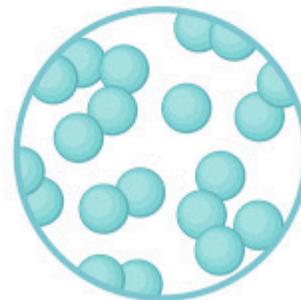
➤ https://www.youtube.com/watch?v=99yNZ_NFZY – O Mundo de Beakman termodinâmica



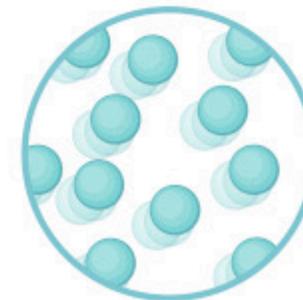
Sólido



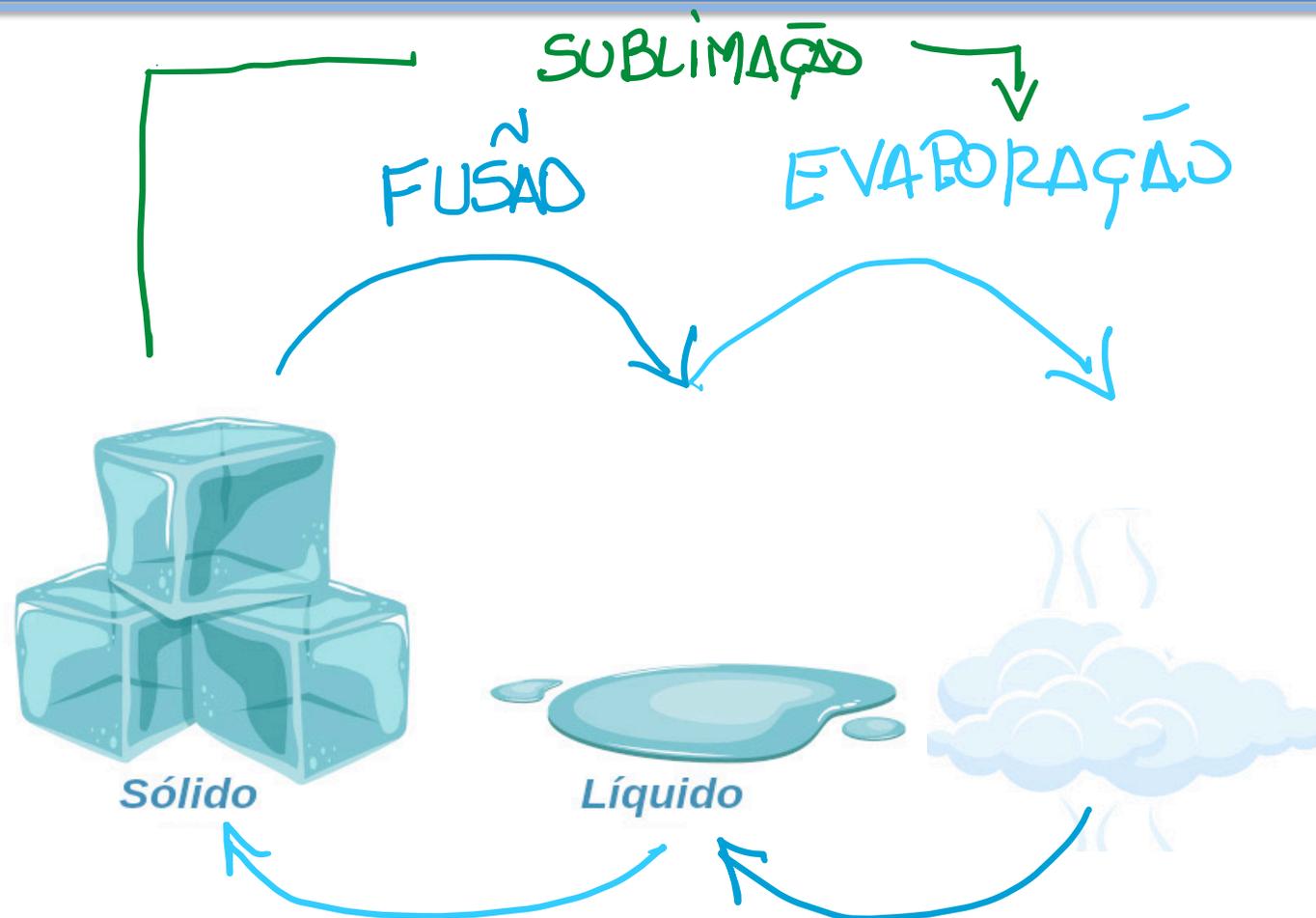
Líquido



Gasoso

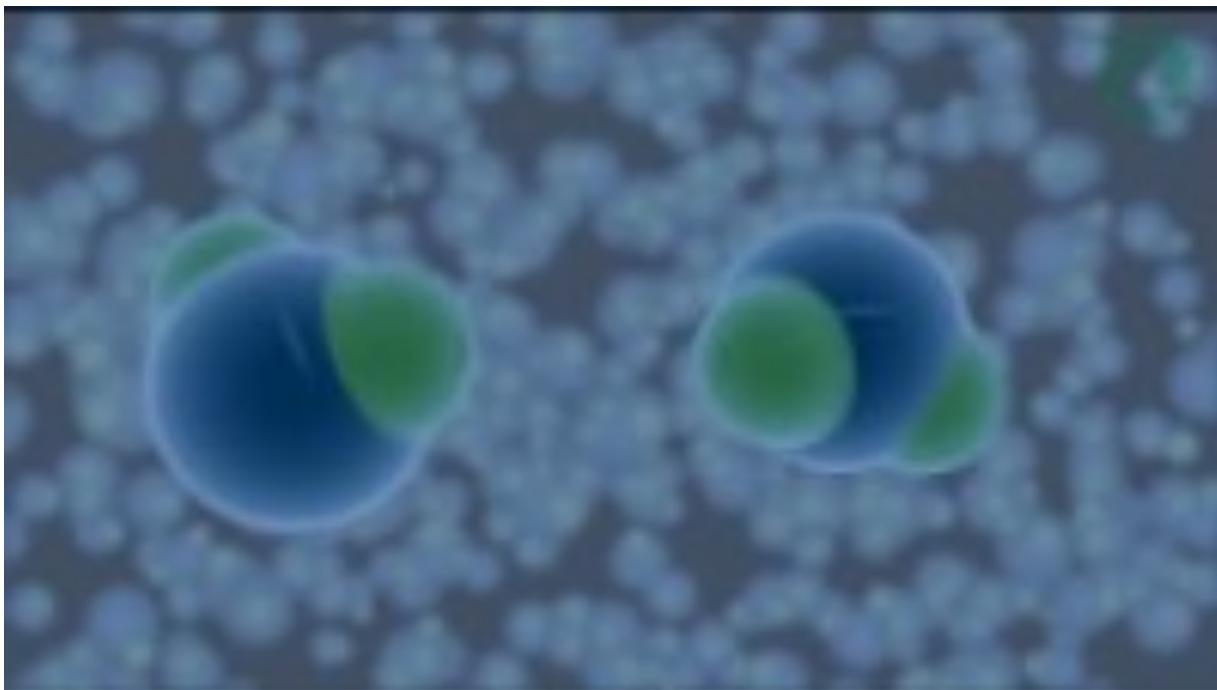


Mudanças de Estado da Água – Com Mudança de Fase

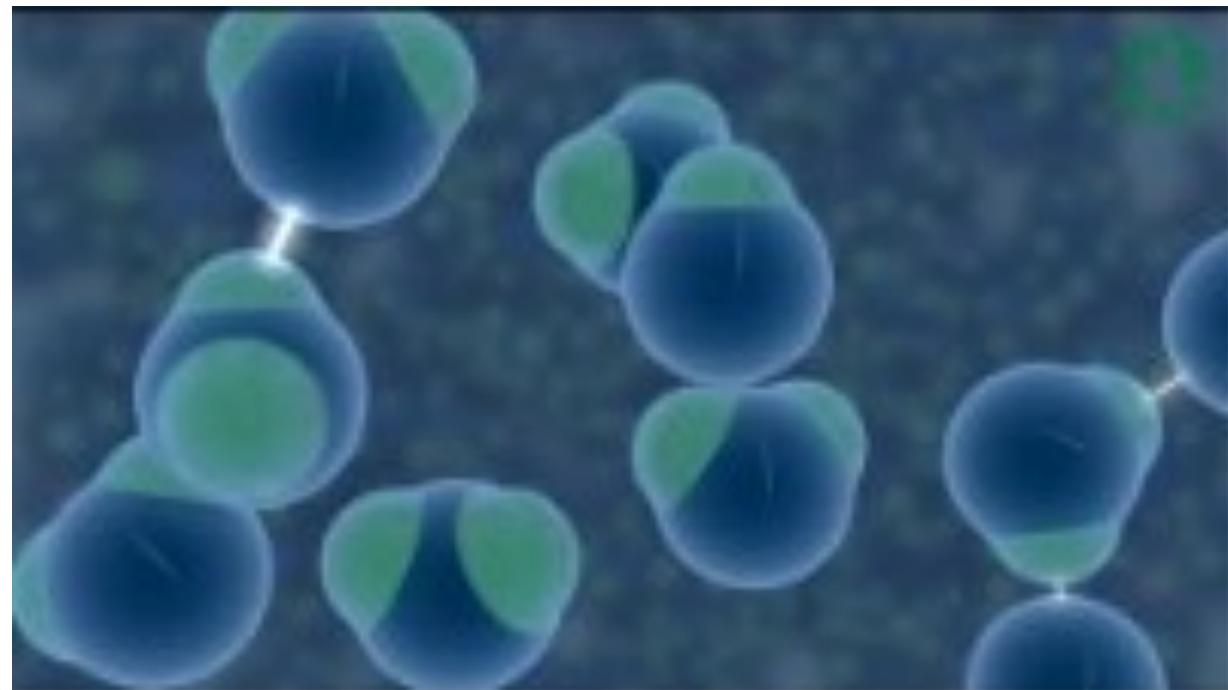


PERDA DE ENERGIA ←

GANHO DE ENERGIA →



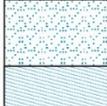
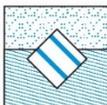
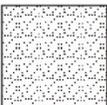
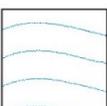
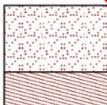
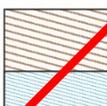
Water Molecules - part 1



Water Molecules - part 2

Estado e Propriedades de uma substância

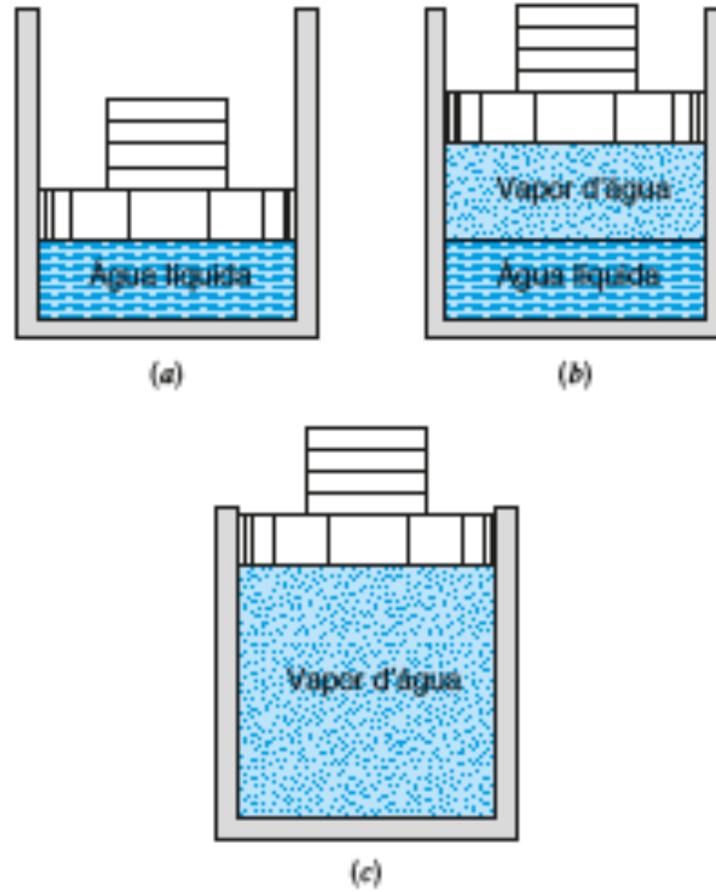
- **Fase:** Quantidade de matéria totalmente homogênea em composição química e em estrutura física. Em uma fase todas as propriedades são uniformes.

	Homogênea (fase única)	Heterogênea (várias fases)
Componente único	 Vapor  Água 	 Vapor e água  Gelo e água 
Vários componentes	 Ar  Gases de combustão 	 Ar e ar líquido  Vapor de combustível, ar e combustível líquido  Água e óleo

Fora do escopo

Obtido em notas de aula de Silvio de Oliveira Junior (EPUSP – Termo I)

Mudanças de Fase

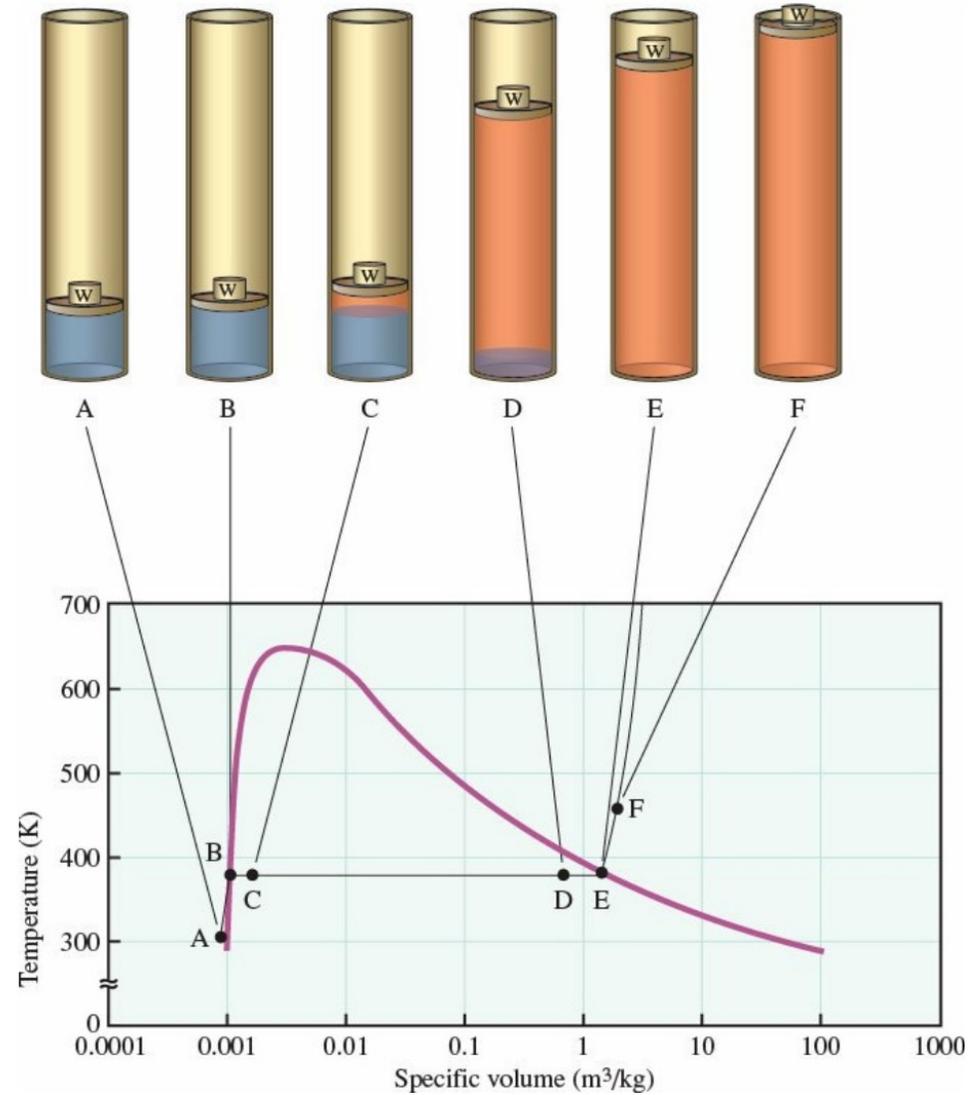


E a água sólida (gelo)?
Um pouco fora do escopo do curso, mas vamos analisar com um pouco de calma mais adiante.

Figura 2.1

Mudança da fase líquida para vapor de uma substância pura a pressão constante.

A uma dada pressão ...



Mudança de fase de líquido para vapor

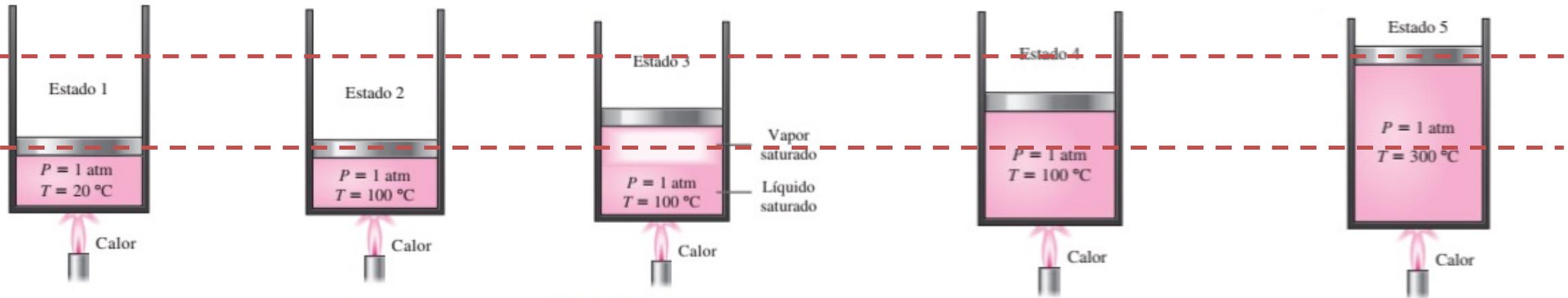


FIGURA 3-6 A 1 atm e $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a água se encontra na fase líquida (*líquido comprimido*).

FIGURA 3-7 A 1 atm e $100 \text{ }^\circ\text{C}$, a água se encontra como um líquido pronto para se vaporizar (*líquido saturado*).

FIGURA 3-8 À medida que calor é transferido, parte do líquido saturado se evapora (*mistura líquido-vapor saturada*).

FIGURA 3-9 A 1 atm, a temperatura permanece constante a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ até que a última gota de líquido se evapore (*vapor saturado*).

FIGURA 3-10 À medida que mais calor é transferido, a temperatura do vapor começa a subir (*vapor superaquecido*).

ONDE PODEMOS encontrar os U_i

Diagrama de fases T-v

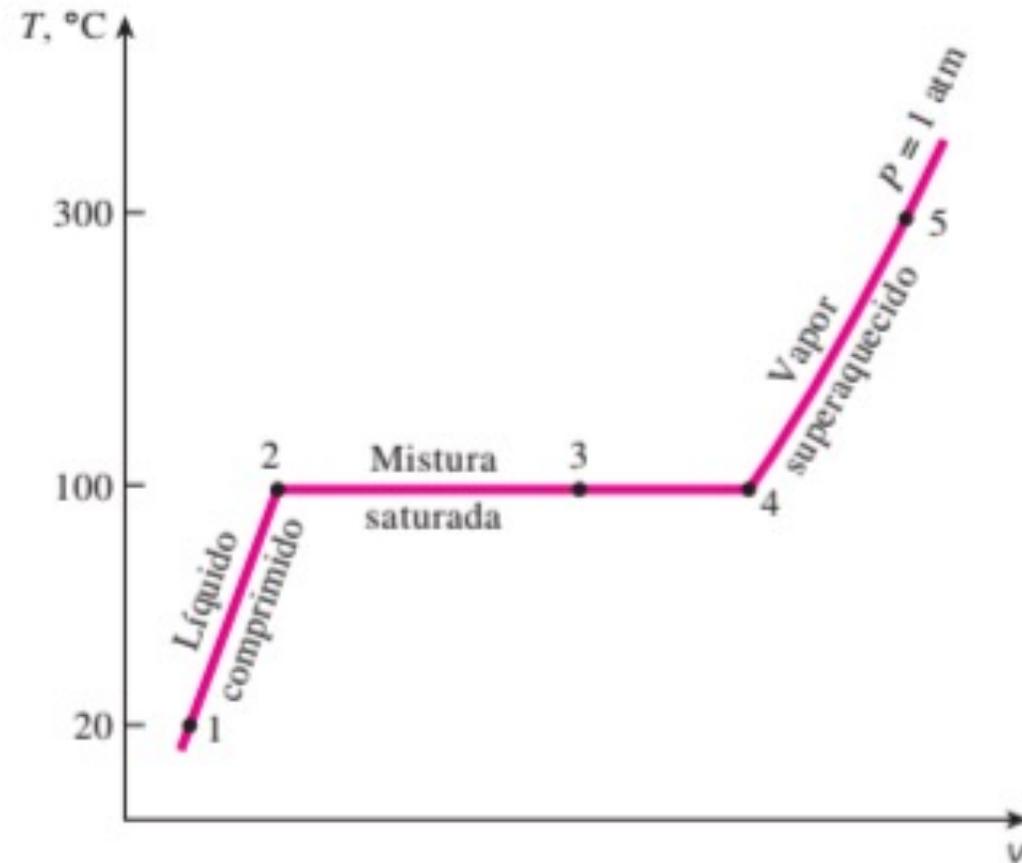


FIGURA 3-11 Diagrama T-v para o processo de aquecimento de água à pressão constante

Interdependência de Tsat e Psat

➤ Qual conclusão podemos tirar da temperatura e pressão quando estamos na saturação?

✓ Elas nos fornecem estado termodinâmico ou falta alguma propriedade?

TABELA 3-1

Pressão de saturação (ebulição) da água a diversas temperaturas

Temperatura (T, °C)	Pressão de saturação (P _{sat} , kPa)
-10	0,26
-5	0,40
0	0,61
5	0,87
10	1,23
15	1,71
20	2,34
25	3,17
30	4,25
40	7,39
50	12,35
100	101,4
150	476,2
200	1.555
250	3.976
300	8.588

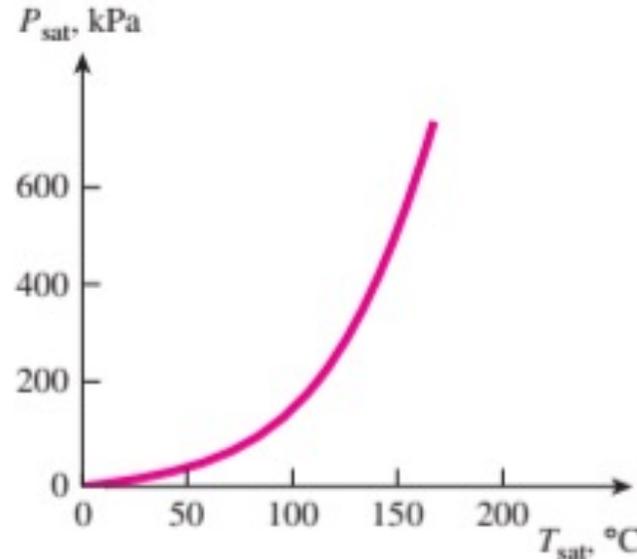


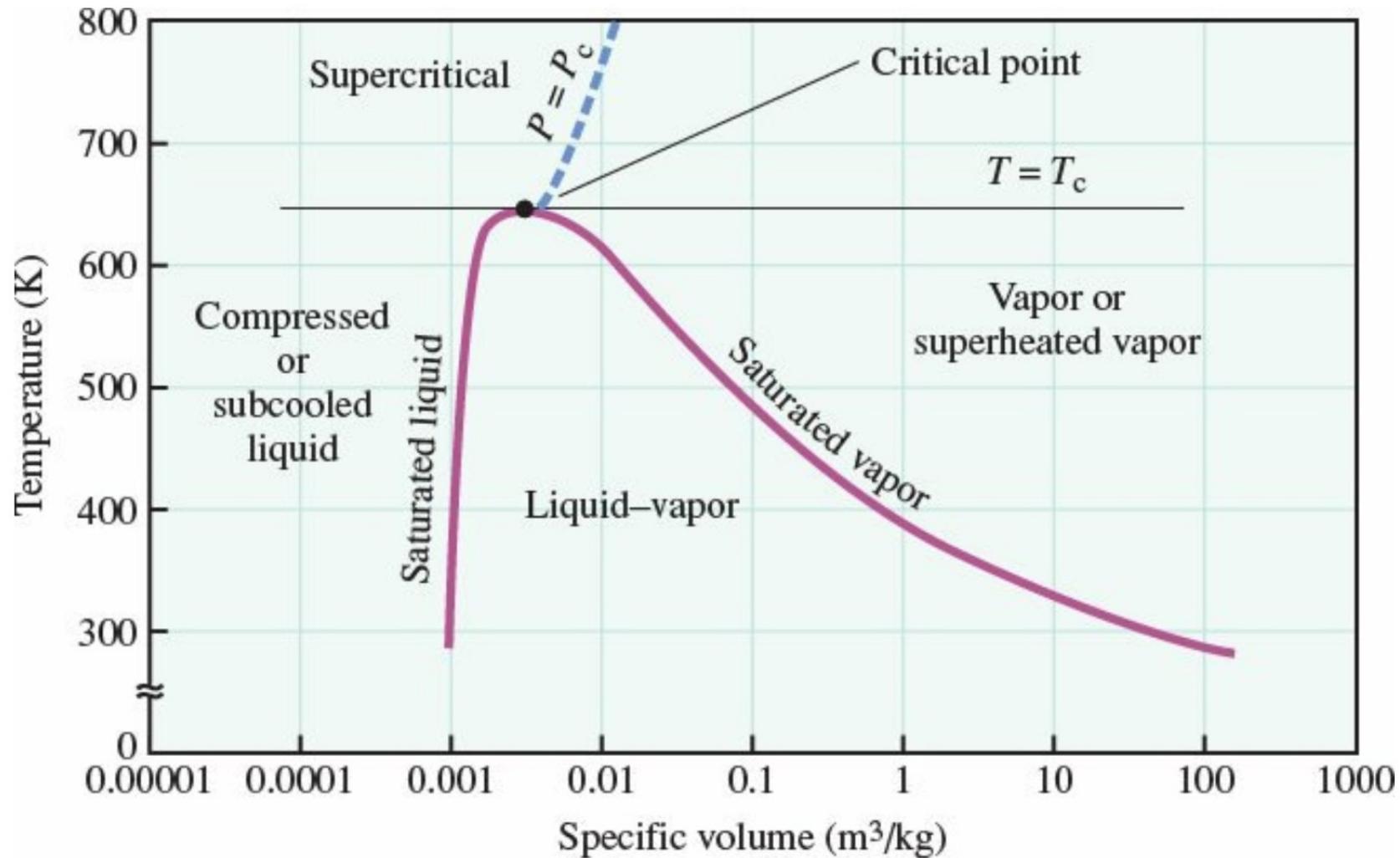
FIGURA 3-12 A curva de saturação líquido-vapor de uma substância pura (os valores numéricos são para a água).

TABELA 3-2

Variação da pressão atmosférica padrão e da temperatura de ebulição (saturação) da água em função da altitude

Altitude (m)	Pressão atmosférica (kPa)	Temperatura de ebulição (°C)
0	101,33	100,0
1.000	89,55	96,5
2.000	79,50	93,3
5.000	54,05	83,3
10.000	26,50	66,3
20.000	5,53	34,7

Diagrama de Fases da Água



Diagramas de fase “reais” da água: T x v e p x v

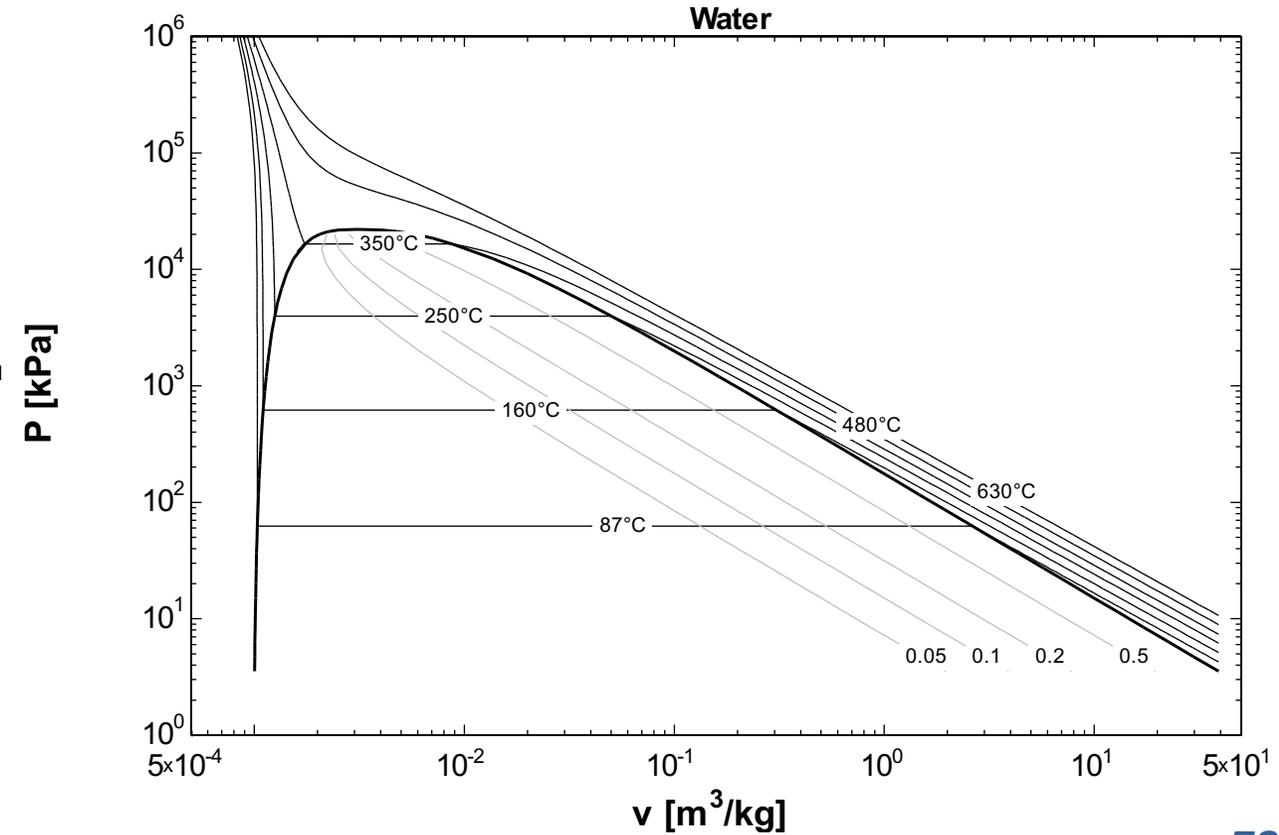
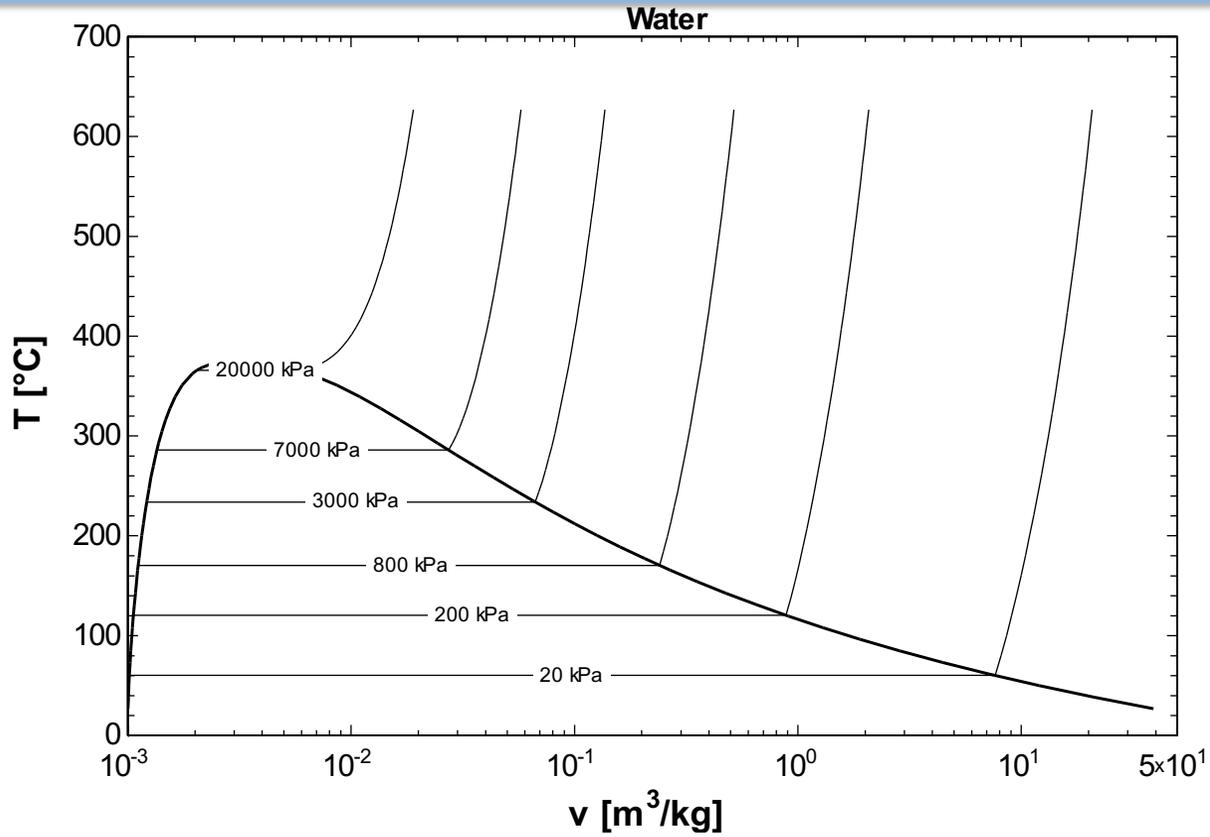
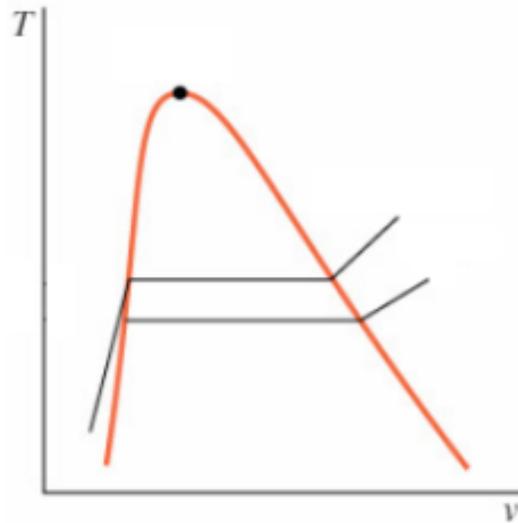


Diagrama de Fases (T x v) & (p x v)

Observe nos dois diagramas as linhas de saturação, as isobáricas, as isotérmicas, o ponto crítico, as regiões de líquido comprimido, mistura líquido-vapor saturados e vapor superaquecido.



FERREIRA, M. S.. Slides de Termodinâmica. 2015. EPUSP

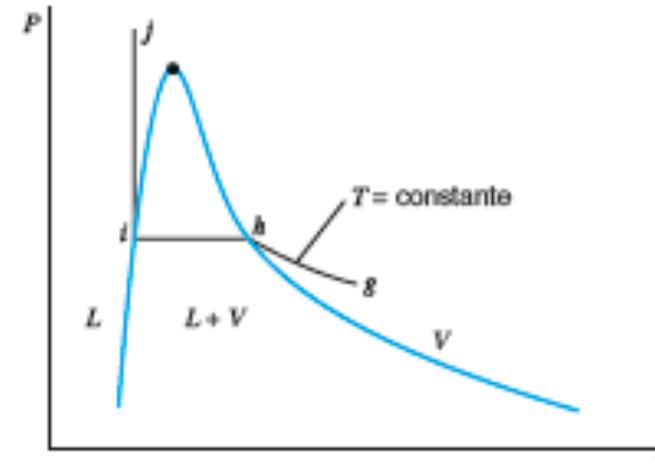
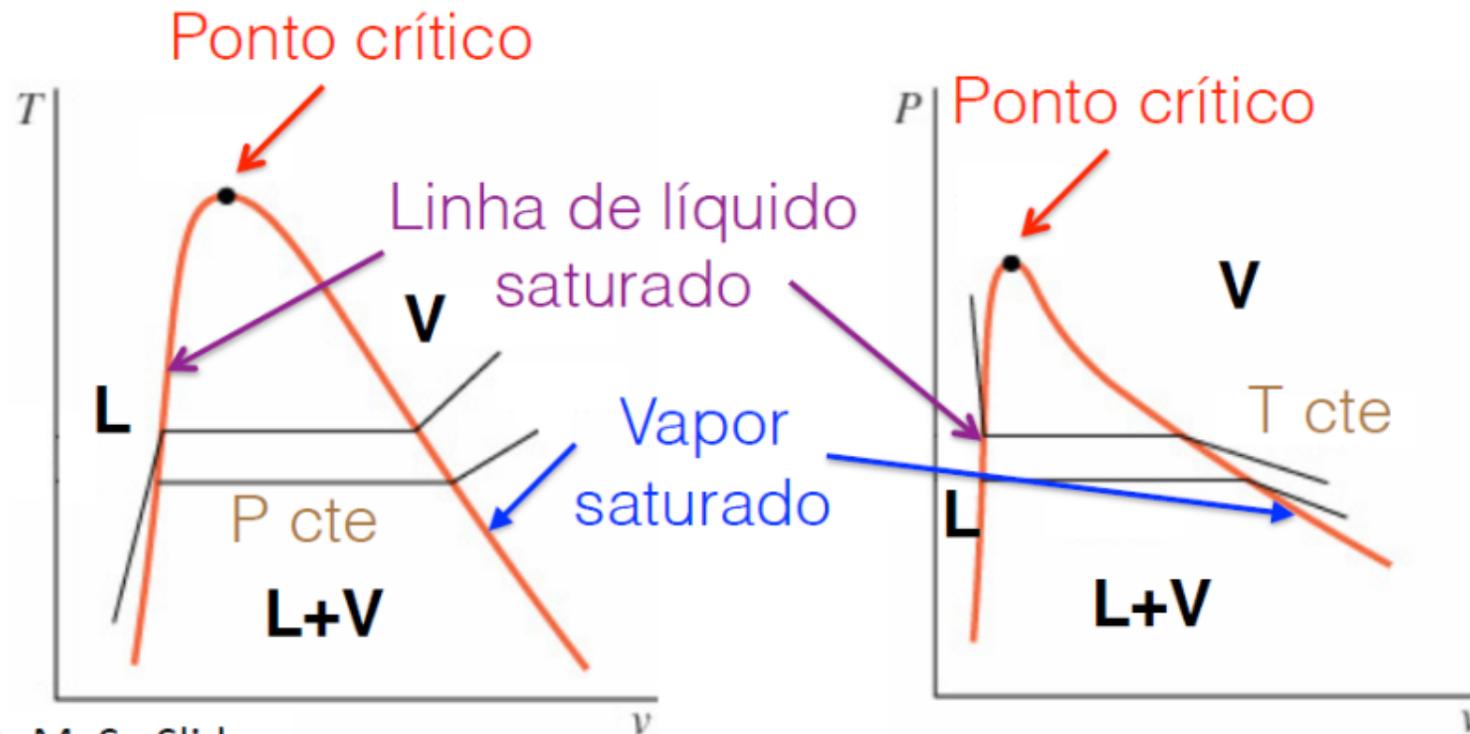


Figura 2.9
Diagrama P.V. para a região de duas fases L.V.

Fundamentos da Termodinâmica – Claus Borgnakke / Richard E. Sonntag

Diagrama de Fases

- Por que a temperatura aumenta com aumento do volume específico em uma **isobárica**, enquanto que a pressão decresce com o volume específico para uma **isoterma**?

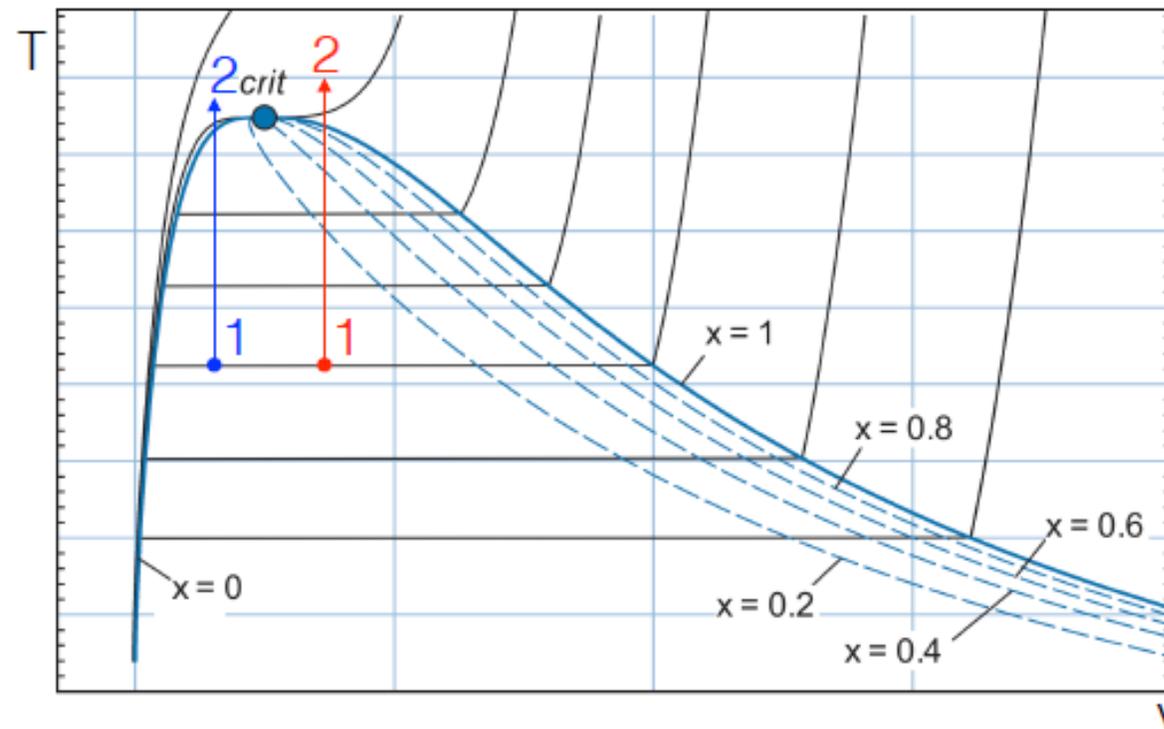


FERREIRA, M. S.. Slides de Termodinâmica. 2015. EPUSP

Estado Supercrítico

- <https://www.youtube.com/watch?v=yBRdBrnllTQ>
- Para o CO_2 : <https://www.youtube.com/watch?v=-gCTKteN5Y4>
- Vapor saturado “úmido”: <https://www.youtube.com/watch?v=8InpXBbjtPU&t=199s>

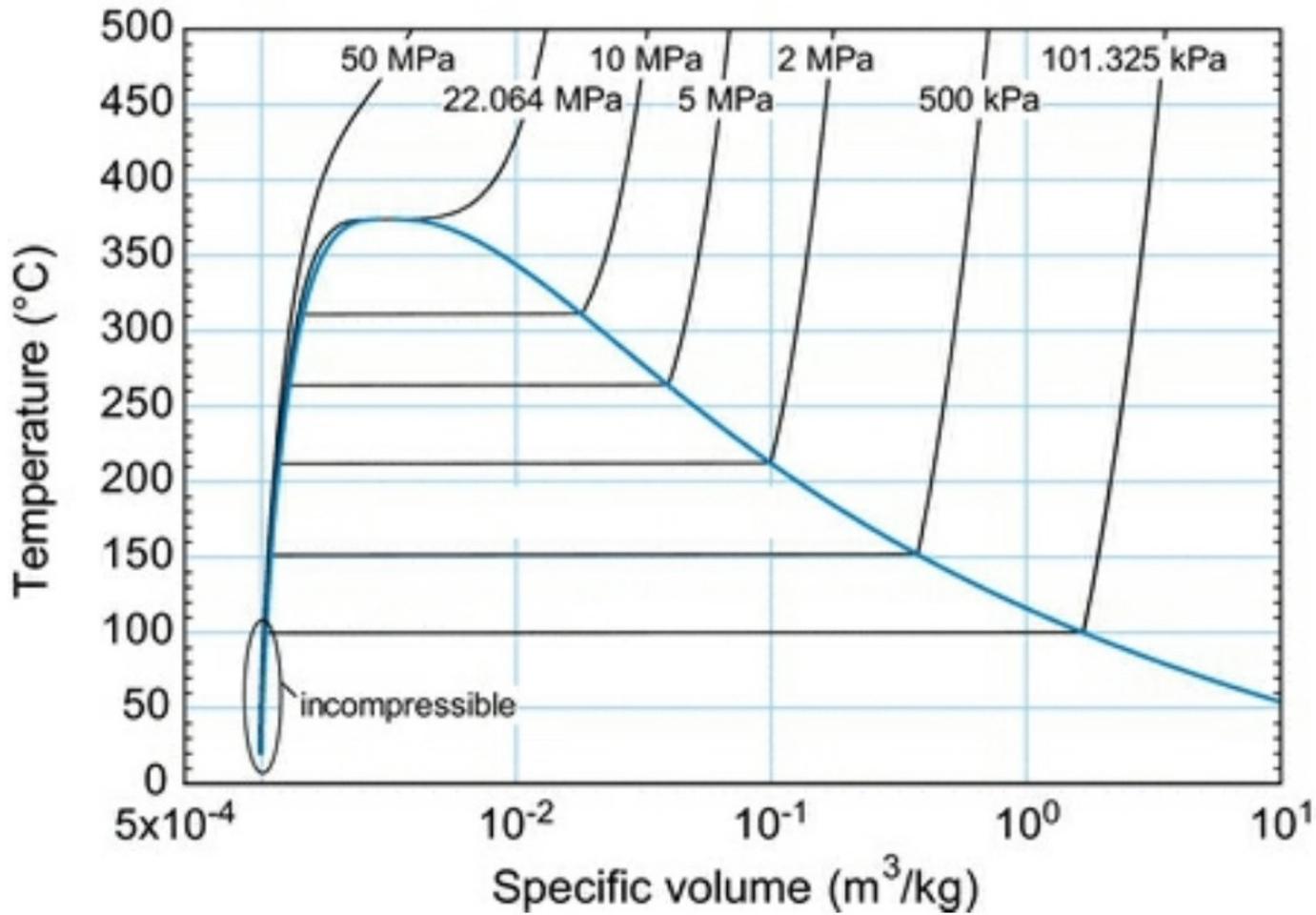
Com base no vídeo anterior, você seria capaz de representar dois processos, um que o nível do líquido *diminui* e outro em que o nível do líquido *aumenta*, no diagrama $T - v$?



O mesmo acontece com qualquer fluido



Diagrama de Fases



Tabelas de Propriedades Termodinâmicas – Água saturada

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958

c_p e c_v não existem
na mudança de fase

Vapor de água Superaquecido

Tabela B.1.3

Vapor d'água superaquecido

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
	$P = 10 \text{ kPa (45,81)}$				$P = 50 \text{ kPa (81,33)}$				$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$			
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	14,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182
	$P = 200 \text{ kPa (120,23)}$				$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				$P = 400 \text{ kPa (143,63)}$			
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	0,46246	2553,55	2738,53	6,8958
150	0,95964	2576,87	2768,80	7,2795	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778	0,47084	2564,48	2752,82	6,9299
200	1,08034	2654,39	2870,46	7,5066	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115	0,53422	2646,83	2860,51	7,1706
250	1,19880	2731,22	2970,98	7,7085	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165	0,59512	2726,11	2964,16	7,3788
300	1,31616	2808,55	3071,79	7,8926	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022	0,65484	2804,81	3066,75	7,5661
400	1,54930	2966,69	3276,55	8,2217	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329	0,77262	2964,36	3273,41	7,8984
500	1,78139	3130,75	3487,03	8,5132	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250	0,88934	3129,15	3484,89	8,1912
600	2,01297	3301,36	3703,96	8,7769	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892	1,00555	3300,22	3702,44	8,4557
700	2,24426	3478,81	3927,66	9,0194	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319	1,12147	3477,95	3926,53	8,6987
800	2,47539	3663,19	4158,27	9,2450	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575	1,23722	3662,51	4157,40	8,9244
900	2,70643	3854,49	4395,77	9,4565	1,80406	3854,20	4395,42	9,2691	1,35288	3853,91	4395,06	9,1361
1000	2,93740	4052,53	4640,01	9,6563	1,95812	4052,27	4639,71	9,4689	1,46847	4052,02	4639,41	9,3360
1100	3,16834	4257,01	4890,68	9,8458	2,11214	4256,77	4890,41	9,6585	1,58404	4256,53	4890,15	9,5255
1200	3,39927	4467,46	5147,32	10,0262	2,26614	4467,23	5147,07	9,8389	1,69958	4466,99	5146,83	9,7059

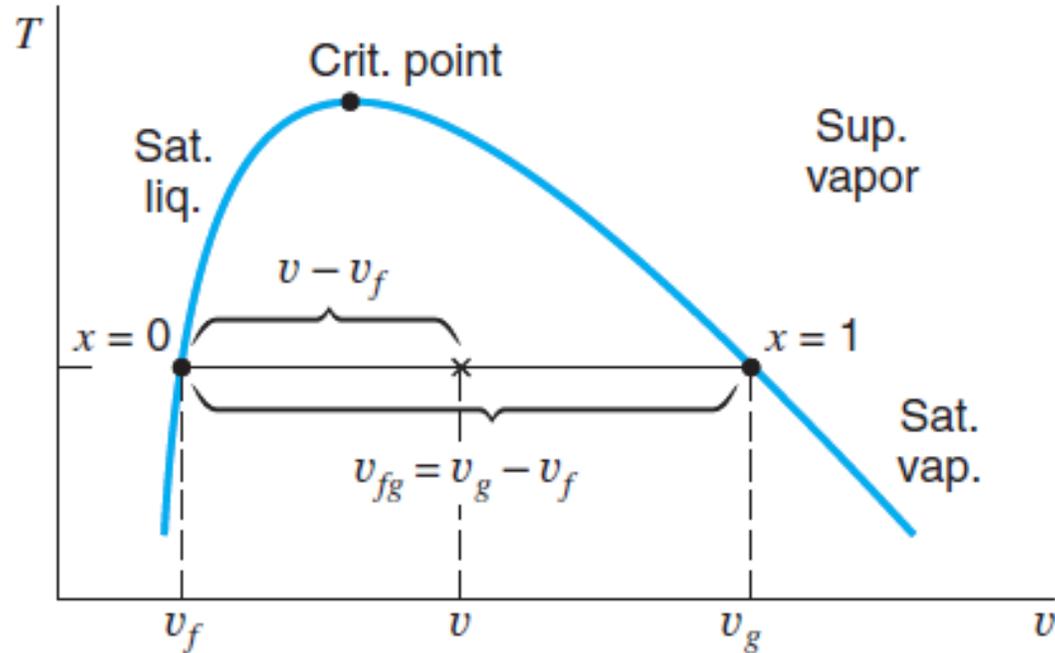
Tabela B.1.3

Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	$P = 10 \text{ kPa (45,81)}$				$P = 50 \text{ kPa (81,33)}$				$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$			
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	14,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182

Definição da propriedade “título”

- $v_f < v_{\text{título}} < v_g$ (volume específico do líquido é menor do que o volume específico com um certo título que é menor do que o volume específico do vapor saturado).



$$V = V_{\text{liq}} + V_{\text{vap}} = m_{\text{liq}}v_f + m_{\text{vap}}v_g$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_{\text{liq}}}{m}v_f + \frac{m_{\text{vap}}}{m}v_g = (1 - x)v_f + xv_g$$

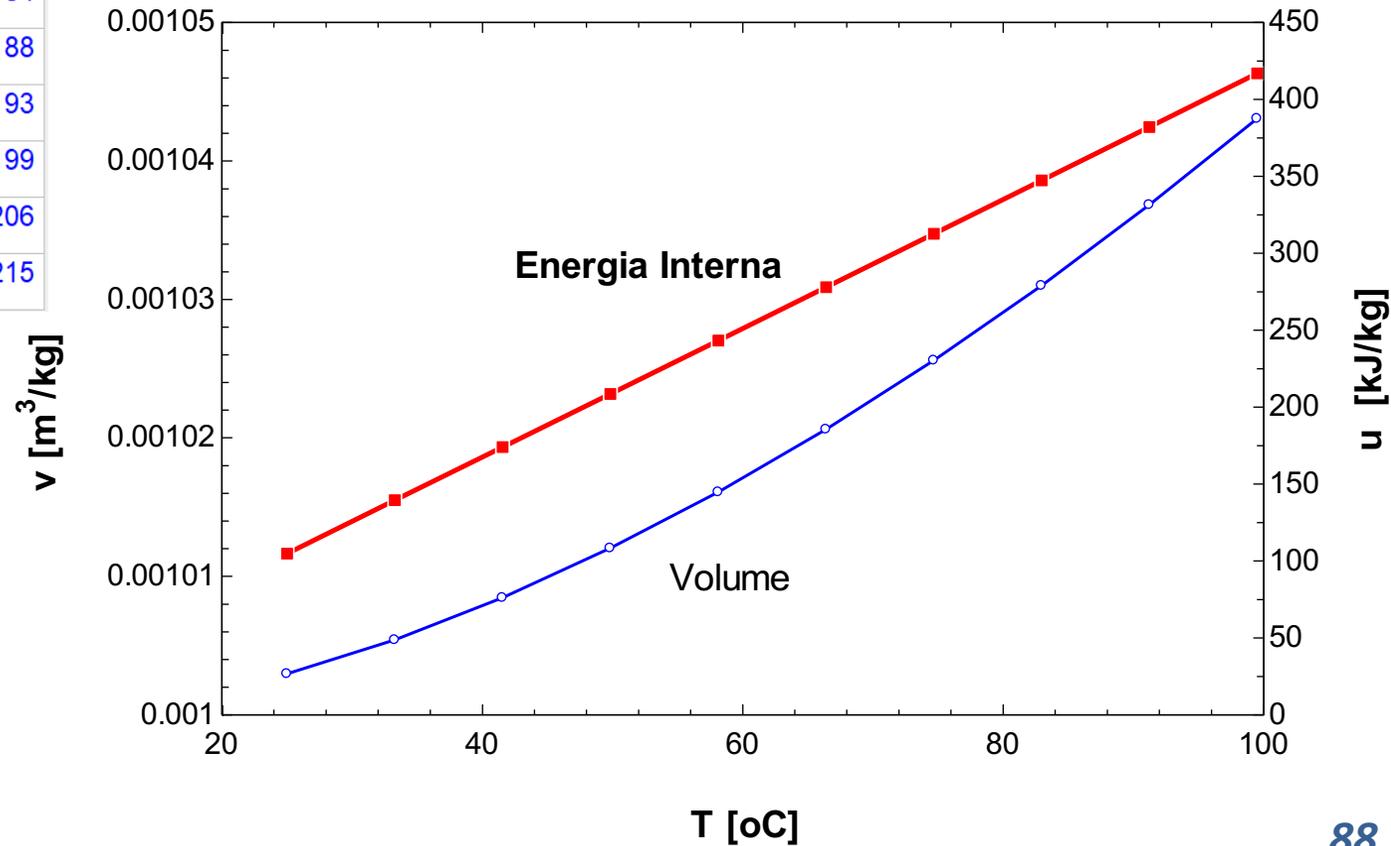
$$v_{fg} = v_g - v_f$$

$$v = v_f + xv_{fg}$$

Líquido Sub-resfriado

	T [°C]	v [m ³ /kg]	u [kJ/kg]	cp [kJ/kgK]
Run 1	25	0.001003	104.8	4.181
Run 2	33.28	0.001005	139.4	4.179
Run 3	41.56	0.001008	174	4.18
Run 4	49.83	0.001012	208.6	4.181
Run 5	58.11	0.001016	243.2	4.184
Run 6	66.39	0.001021	277.9	4.188
Run 7	74.67	0.001026	312.6	4.193
Run 8	82.94	0.001031	347.3	4.199
Run 9	91.22	0.001037	382.1	4.206
Run 10	99.5	0.001043	417	4.215

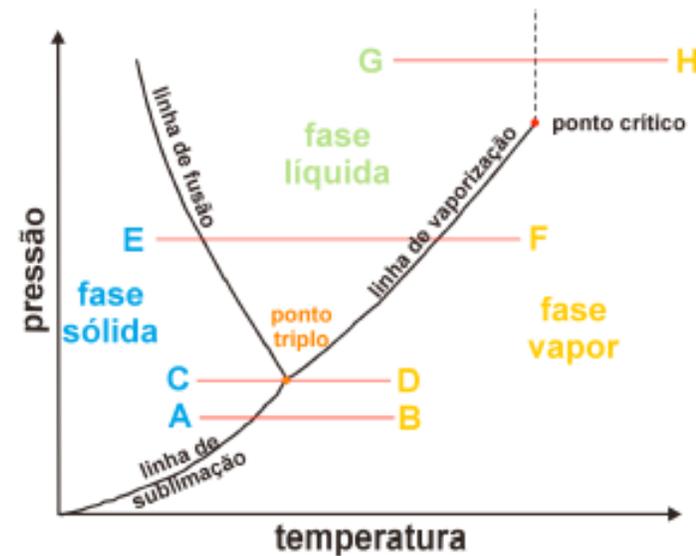
Volume quase não muda – 3,84%



Mudanças de Fase

Em um ponto triplo três fases coexistem em equilíbrio.

As substâncias puras apresentam vários pontos triplos, mas só um em que líquido, sólido e gás coexistem.



Processos:

A B mudança de sólido para gás;

C D mudança de sólido para gás, passando pelas três fases;

E F mudança de sólido para gás, passando pela fase líquida;

G H mudança de estado sem mudança de fase.

Ponto Triplo

➤ Dados de alguns pontos triplos de substâncias puras:

	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)
Hidrogênio	-259	7,194
Nitrogênio	-219	0,150
Oxigênio	-210	12,530
Mercúrio	-39	520,8
Água	0,01	0,00000013
Zinco	419	0,6113
Prata	961	0,01

➤ Vídeo sobre o ponto triplo da água (célula de ponto triplo)

<https://www.youtube.com/watch?v=EkFmrWsSzgA>

Ponto Triplo

➤ Dados de alguns pontos triplos de substâncias puras:

	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)
Hidrogênio	-259	7,194
Nitrogênio	-219	0,150
Oxigênio	-210	12,530
Mercúrio	-39	520,8
Água	0,01	0,00000013
Zinco	419	0,6113
Prata	961	0,01

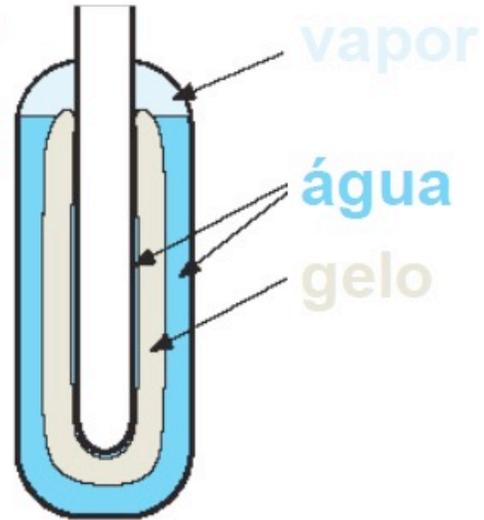


➤ Vídeo sobre o ponto triplo da água (célula de ponto triplo)

<https://www.youtube.com/watch?v=EkFmrWsSzgA>

Ponto Triplo da Água

$T_{PT} = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $\pm 0.0001 \text{ } ^\circ\text{C!}$



- Supply of temperature fixed-point cells for the calibration of standard platinum resistance thermometers and thermocouples

Diagrama de Fases

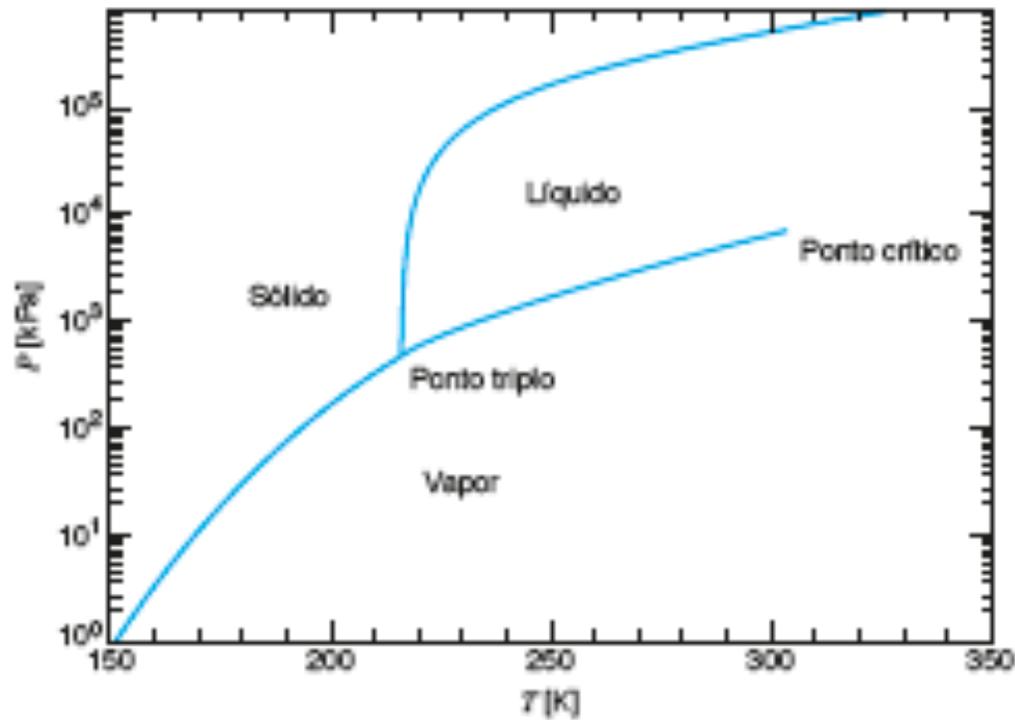


Figura 2.5

Diagrama de fases do dióxido de carbono.

Fundamentos da Termodinâmica – Claus Borgnakke
/ Richard E. Sonntag

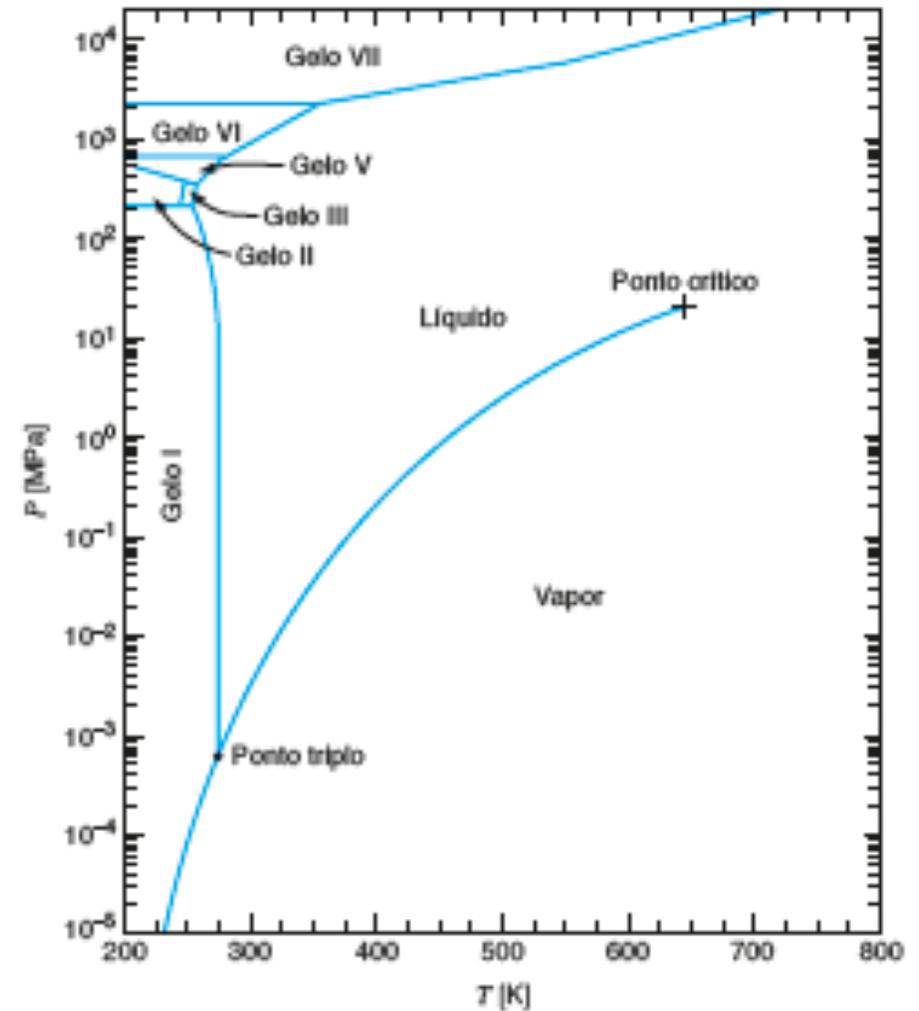
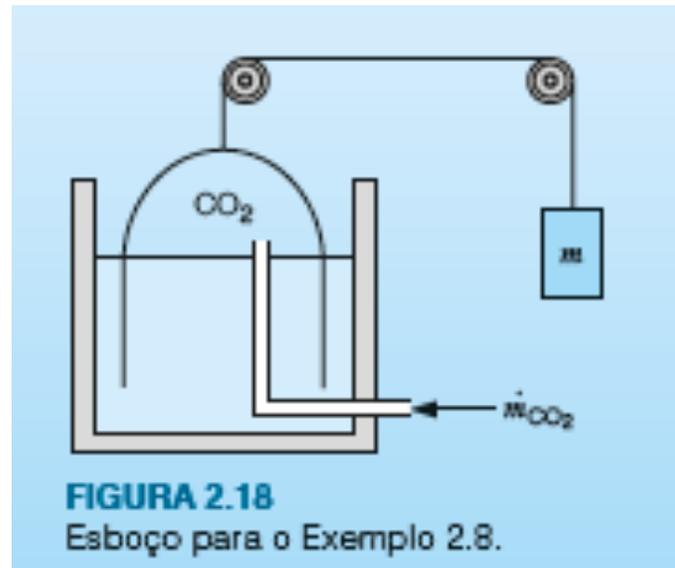


Figura 2.4

Diagrama de fases da água.

Gases Perfeitos

- Exemplo 4: Qual a massa de ar contida num quarto de $6 \times 10 \times 4$ m caso a pressão seja 100 kPa e temperatura 25°C .
- Exemplo 5: Uma tanque de $0,5 \text{ m}^3$ contem 10 kg de um gas ideal de massa molar de 24 kg/kmol. A temperatura é de 25°C . Qual a pressão?
- Exemplo 6: Um sistema de armazenamento de CO_2 é submerso em água líquida com uma massa em contrabalanço. A pressão interna é medida em 105 kPa e a temperatura de 21°C . Um volume de $0,75 \text{ m}^3$ aumenta em um período de 185 s. Qual a vazão volumétrica e a vazão mássica que entra no volume de controle durante esse período.



Quando que podemos considerar a água gás ideal

- Para efeitos de análise nesse curso, em nenhum caso. Somente em um capítulo de Termo II (Psicrometria)

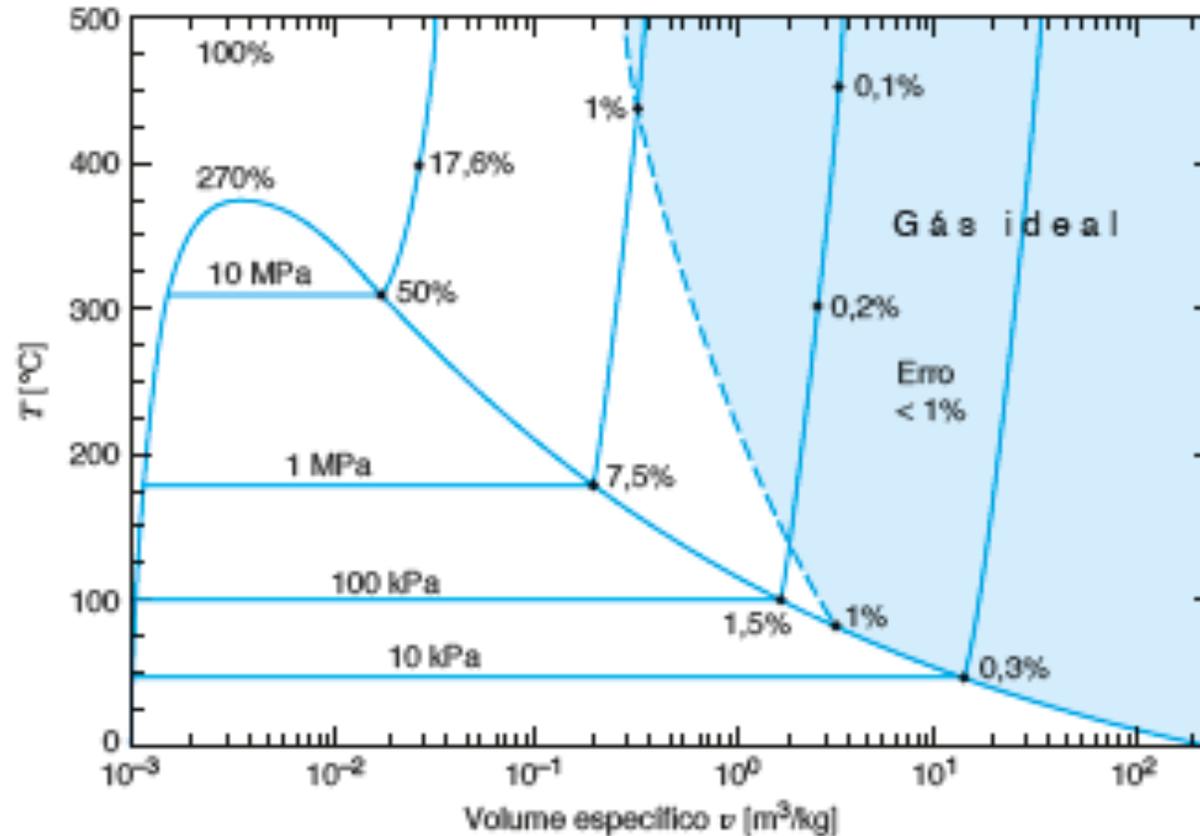


Figura 2.19

Diagrama temperatura-volume específico para a água.

Fator de Compressibilidade

- Forma mais quantitativa de se avaliar o quão longe uma molécula está do comportamento de gás ideal.

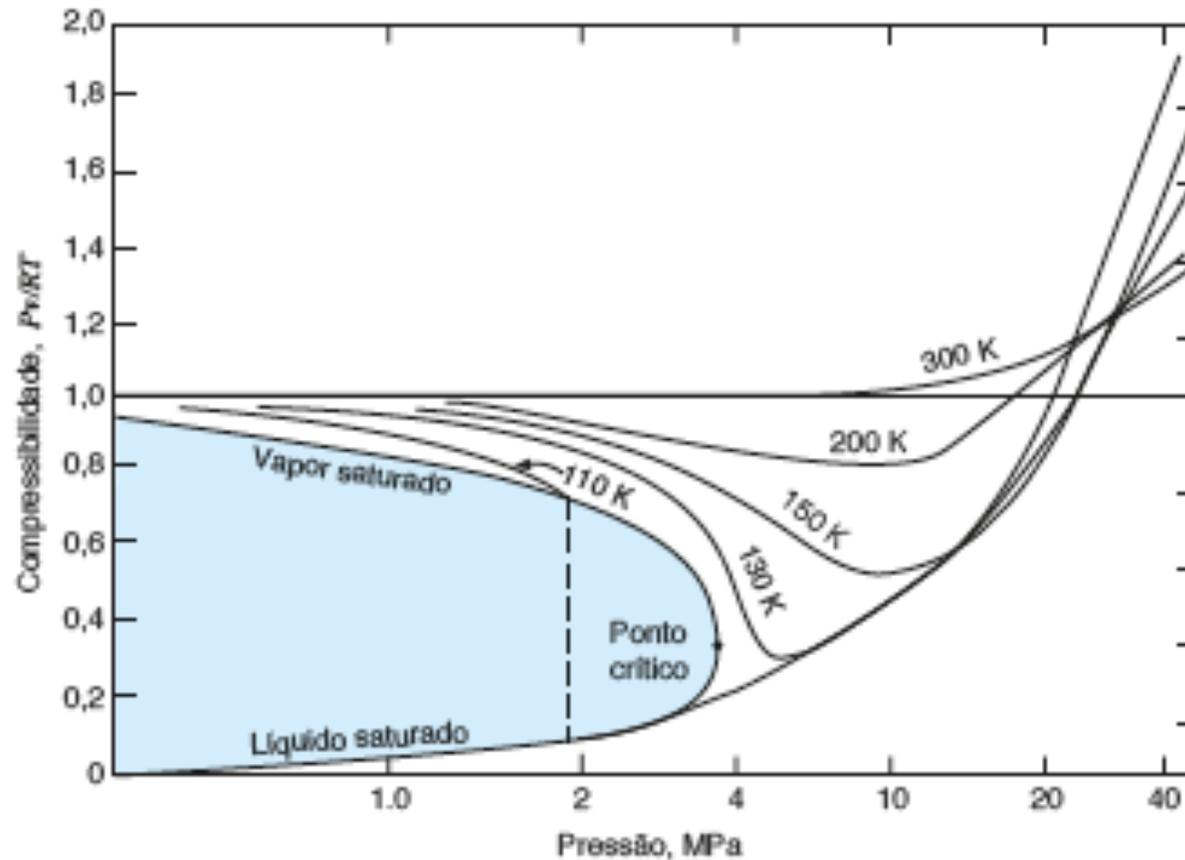
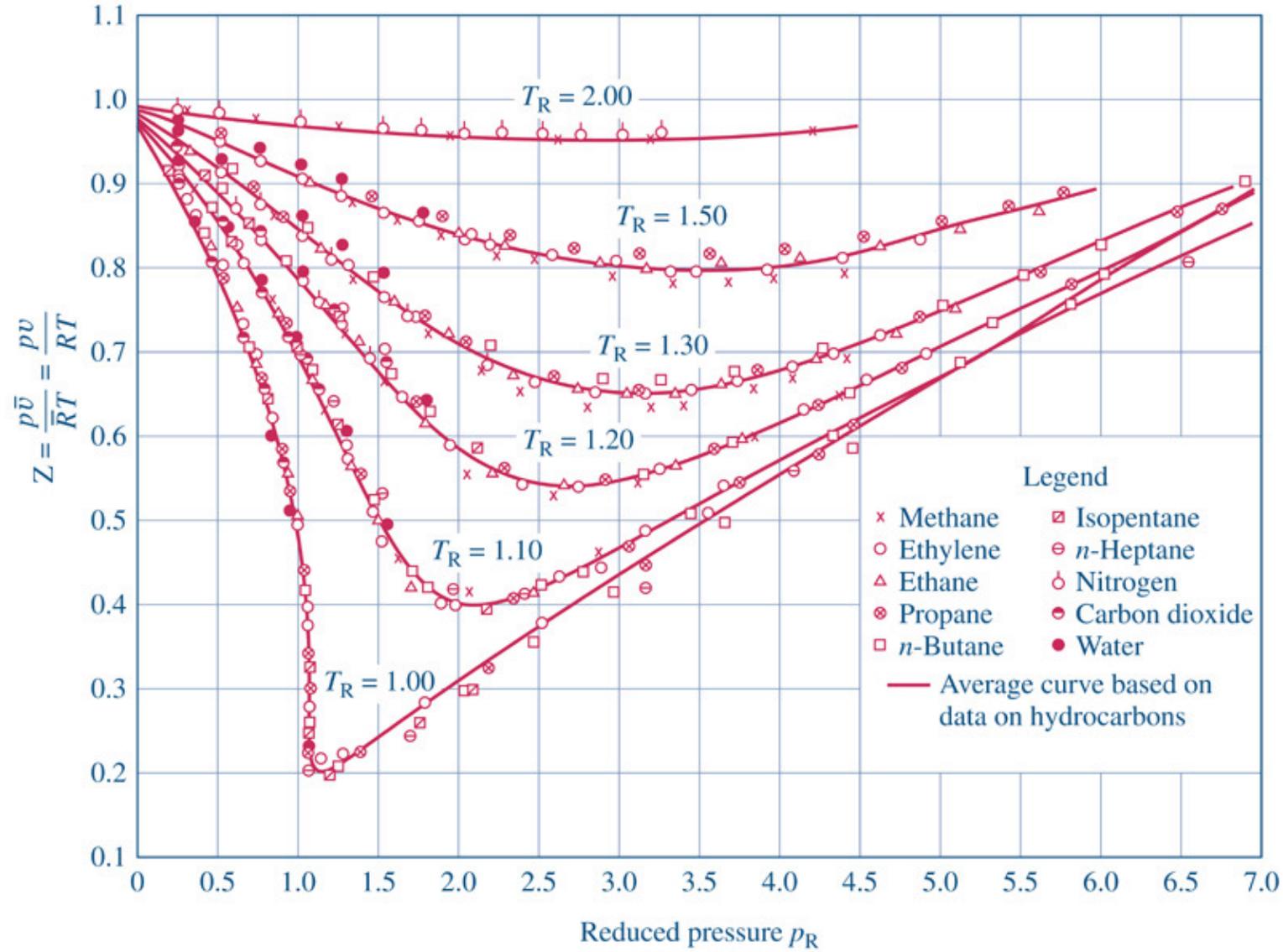


Figura 2.20
Compressibilidade do nitrogênio.

Diagramas Generalizados de Compressibilidade



Equações de Estado – Somente a título de informação

$$p = \frac{\bar{RT}}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}^2} \quad \text{Van der Waals}$$

$$p = \frac{\bar{RT}}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}(\bar{v} + b)T^{1/2}} \quad \text{Redlich – Kwong}$$

$$p = \frac{\bar{RT}}{\bar{v}} + \frac{\beta}{\bar{v}^2} + \frac{\gamma}{\bar{v}^3} + \frac{\delta}{\bar{v}^4} \quad \text{Equação de Beattie-Bridgeman}$$

Referências Bibliográficas

- - **Livro Texto:** Moran M.J. e Shapiro H.N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7th ed., John Wiley & Sons, 2010.
- Moran M.J. e Shapiro H.N., *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*, 7a ed. LTC Editora, 2013.
- -**Referências Complementares:** Sonntag, R.E., Borgnakke, C., Van Wylen, G.J. *Fundamentos da Termodinâmica*, 6ª, Edgar Blucher, SP, 2003.

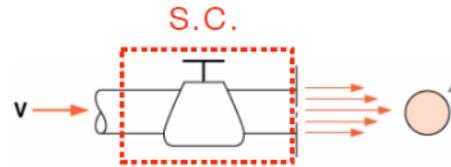
- Notas de aula : Professor Silvio de Oliveira Junior – EPUSP.
- Notas de aula : Professor Maurício Silva Ferreira – EPUSP.

Tabela 4.1
Equipamentos e dispositivos que operam em regime permanente

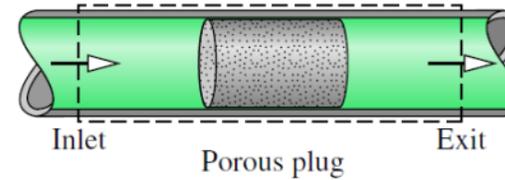
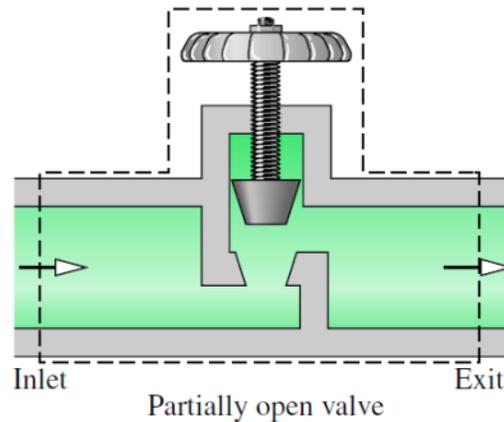
Equipamento/Dispositivo	Função	Característica	Hipótese usual
Aquecedor	Aquece substâncias	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Aquecedor de água de alimentação	Aquece a água líquida com outro fluxo	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Bocais	Cria EC; Reduz a P.; Mede vazões	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Bomba de calor	Transfere calor de T_{baixo} para T_{alto} ; necessita entrar trabalho	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Bombas	O mesmo que compressores, mas manipulam líquidos	$W_{\text{entra}}, P_{\text{aumenta}}$	$P = \text{constante}$
Caldeira	Levar o fluido ao estado vapor	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Câmara de mistura	Mistura dois ou mais fluxos	$w = 0$	$q = 0$
Compressor	Eleva a temperatura da substância	w_{entra}	$q = 0$
Condensador	Remove calor e leva a substância para o estado líquido	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Desaerador	Remove gases dissolvidos no líquido	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Dessuperaquecedor	Adiciona água ao vapor superaquecido para fazê-lo vapor saturado	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Desumidificador	Remove água do ar	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Difusor	Converte EC em pressões maiores P	$w = 0$	$q = 0$
Economizador	Trocador de calor baixo- T e baixo- P	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Evaporador	Leva a substância para o estado vapor	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Evaporador instantâneo	Gera vapor por expansão (estrangulamento)	$w = 0$	$q = 0$
Expansor	Semelhante a turbina, mas pode ter fluxo de calor	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Gerador de Vapor	O mesmo que caldeira; esquentar água líquida para vapor superaquecido	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Humidificador	Adiciona água na mistura ar-água	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Maçarico	Queima o combustível e injeta calor	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Máquina térmica	Converte parte do calor em trabalho	$Q_{\text{entra}}, W_{\text{sai}}$	$P = \text{constante}$
Pós-resfriador (Aftercooler)	Resfriar o fluido depois de comprimido	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Reator	Promove a reação de duas ou mais substâncias	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Redução	O mesmo que válvula	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Regenerador	Usualmente um trocador de calor para recuperar energia	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Resfriamento intermediário (Intercooler)	Troca calor entre estágios de compressão	$w = 0$	$q = 0$
Superaquecedor	Um trocador de calor que coloca T além de T_{sat}	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Supercarregador	Um compressor acionado pelo eixo motor para forçar ar para a câmara de combustão	W_{entra}	$P = \text{constante}$
Trocador de calor	Transfere calor de um meio para outro	$w = 0$	$P = \text{constante}$
Turbina	Cria eixo motor a partir de fluxo a alta P	W_{sai}	$P = \text{constante}$
Turbocarregador	Um compressor acionado por uma turbina a fluxo de exaustão para carregar ar na máquina	$W_{\text{turbina}} = -\dot{W}_C$	
Válvula	Controla o fluxo por restrição	$w = 0$	$q = 0$
Ventiladores/Sopradores	Mova uma substância, tipicamente o ar	$W_{\text{entra}}, EC_{\text{aumenta}}$	$P = \text{constante}, q = 0$

Exemplo 1

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC}$$



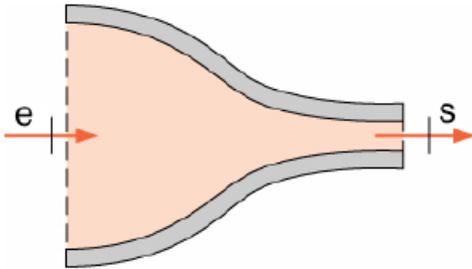
1ª Lei: $h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + q_{vc} - w_{vc} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$



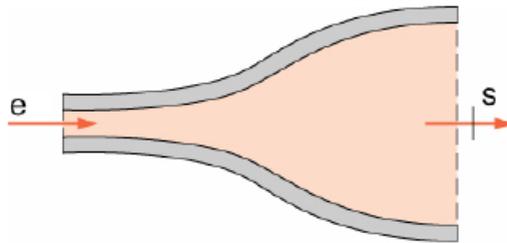
▲ **Figure 4.13** Examples of throttling devices.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC}$$

Bocal / Difusor

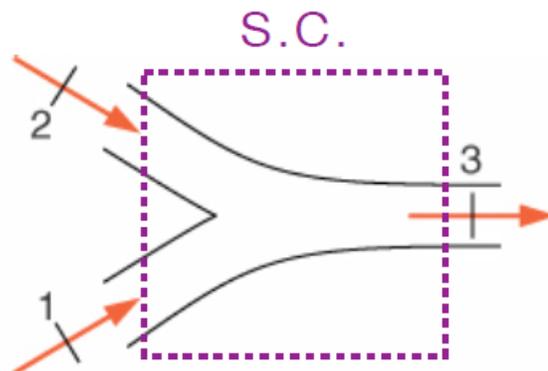


$$h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + \cancel{\dot{q}_{vc}} - \cancel{\dot{w}_{vc}} = h_s + \frac{V_s^2}{2} + \cancel{gz_s}$$



$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

Misturador



$$\sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s + \cancel{\dot{Q}_{vc}} - \cancel{\dot{W}_{vc}} = 0$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

Volumes de Controle

- A ideia é ir caminhando com a análise até conseguir descrever com o máximo de precisão sistemas como o indicado abaixo

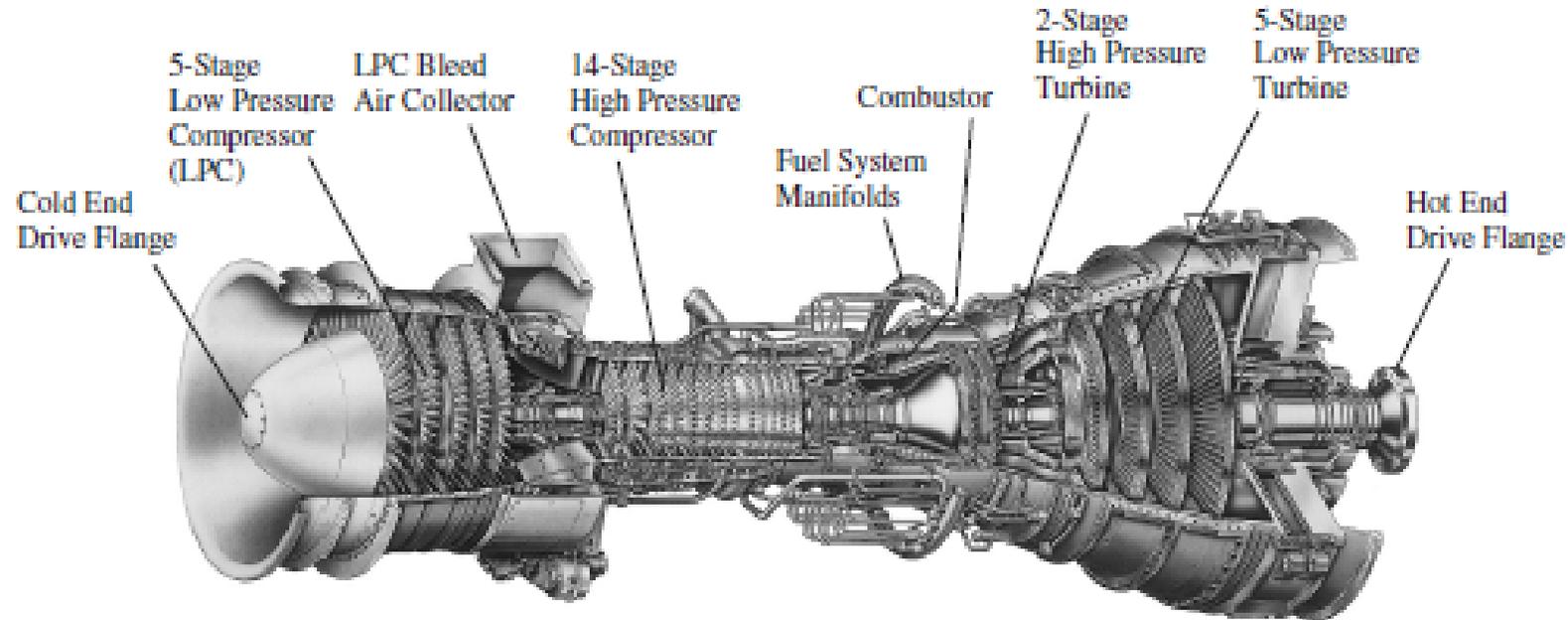


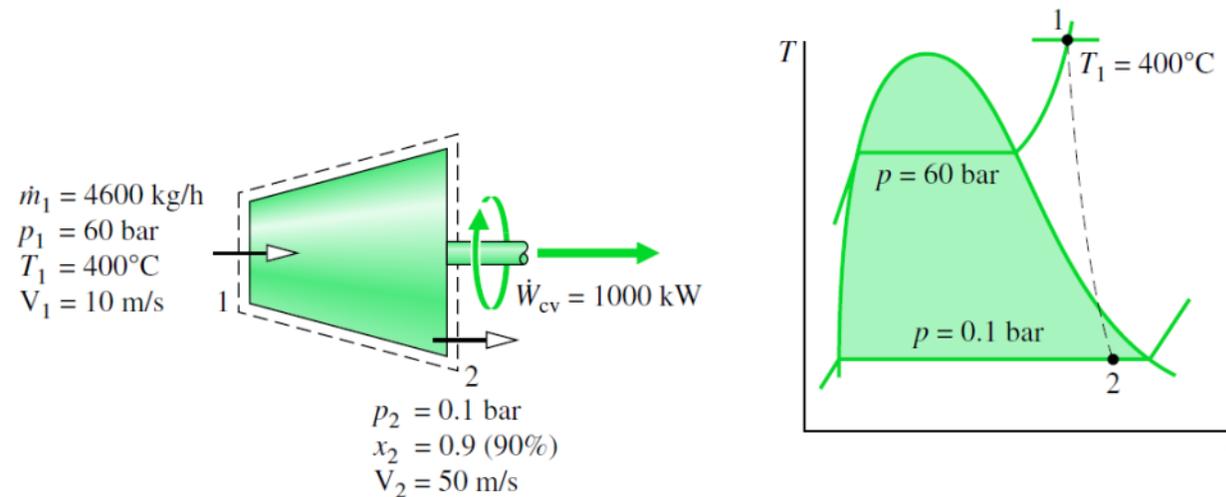
FIGURE 5-24

A modern land-based gas turbine used for electric power production. This is a General Electric LM5000 turbine. It has a length of 6.2 m, it weighs 12.5 tons, and produces 55.2 MW at 3600 rpm with steam injection.

Courtesy of GE Power Systems

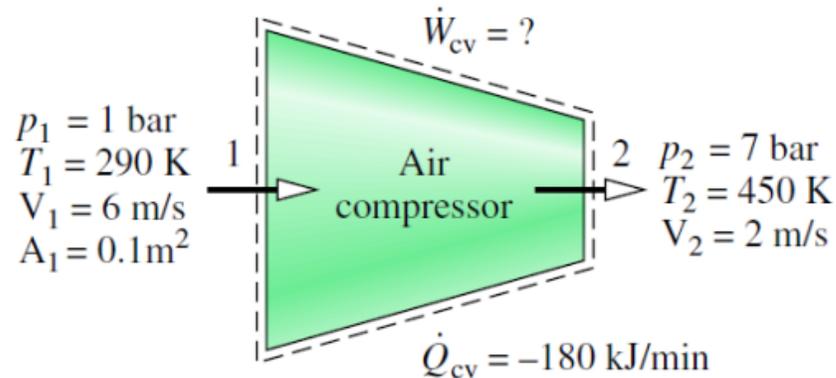
Exemplos do Livro Shapiro

Steam enters a turbine operating at steady state with a mass flow rate of 4600 kg/h. The turbine develops a power output of 1000 kW. At the inlet, the pressure is 60 bar, the temperature is 400°C, and the velocity is 10 m/s. At the exit, the pressure is 0.1 bar, the quality is 0.9 (90%), and the velocity is 50 m/s. Calculate the rate of heat transfer between the turbine and surroundings, in kW.



$$\begin{aligned}\dot{Q}_{cv} &= (1000 \text{ kW}) + \left(4600 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)(-831.8 + 1.2) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right| \\ &= -61.3 \text{ kW}\end{aligned}$$

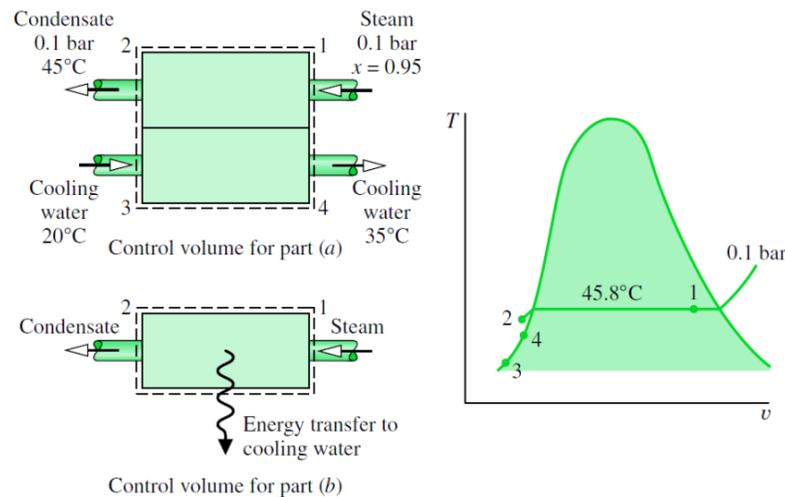
Air enters a compressor operating at steady state at a pressure of 1 bar, a temperature of 290 K, and a velocity of 6 m/s through an inlet with an area of 0.1 m². At the exit, the pressure is 7 bar, the temperature is 450 K, and the velocity is 2 m/s. Heat transfer from the compressor to its surroundings occurs at a rate of 180 kJ/min. Employing the ideal gas model, calculate the power input to the compressor, in kW.



$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{cv} &= \left(-180 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} \right) \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| + 0.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[(290.16 - 451.8) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{(6)^2 - (2)^2}{2} \right) \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \right] \\
 &= -3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 0.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (-161.64 + 0.02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 &= -119.4 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right| = -119.4 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

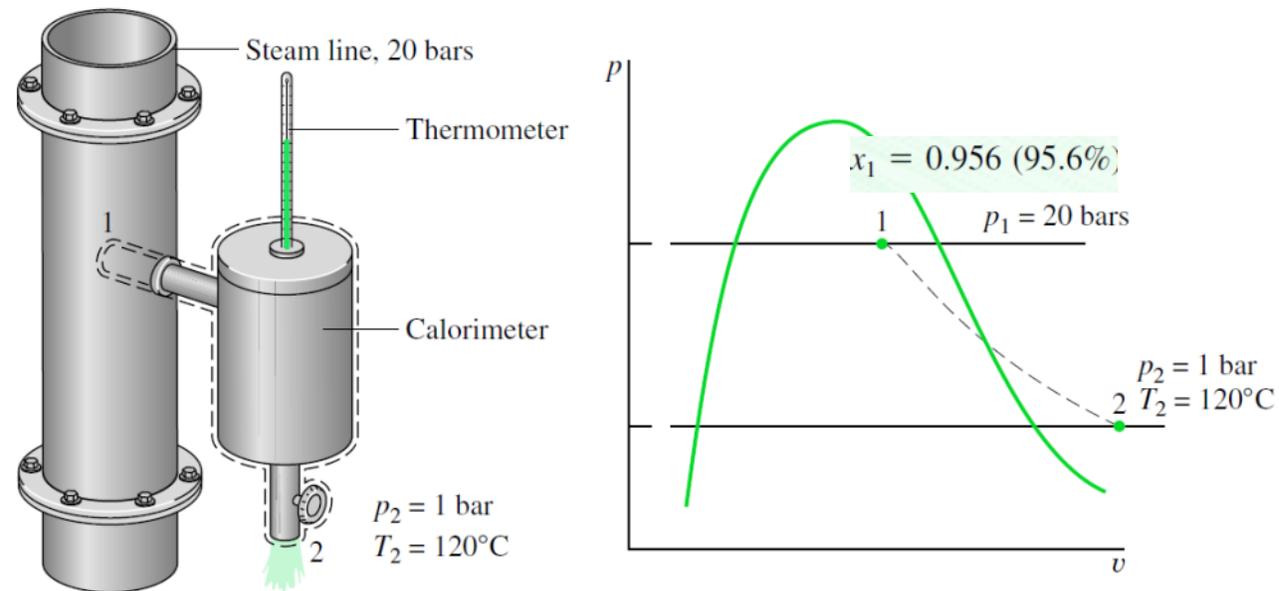
Steam enters the condenser of a vapor power plant at 0.1 bar with a quality of 0.95 and condensate exits at 0.1 bar and 45°C. Cooling water enters the condenser in a separate stream as a liquid at 20°C and exits as a liquid at 35°C with no change in pressure. Heat transfer from the outside of the condenser and changes in the kinetic and potential energies of the flowing streams can be ignored. For steady-state operation, determine

- (a) the ratio of the mass flow rate of the cooling water to the mass flow rate of the condensing stream.
- (b) the rate of energy transfer from the condensing steam to the cooling water, in kJ per kg of steam passing through the condenser.



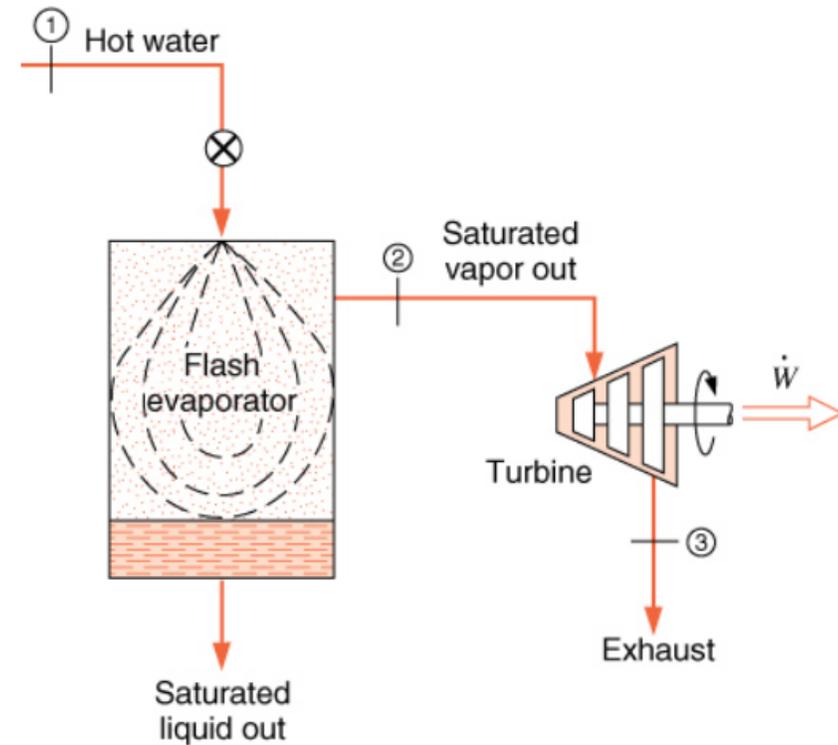
$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}_1} = h_2 - h_1 = 188.45 - 2465.1 = -2276.7 \text{ kJ/kg}$$

A supply line carries a two-phase liquid–vapor mixture of steam at 20 bars. A small fraction of the flow in the line is diverted through a throttling calorimeter and exhausted to the atmosphere at 1 bar. The temperature of the exhaust steam is measured as 120°C. Determine the quality of the steam in the supply line.



Evaporador “flash” – Ou Separador Líquido-Vapor

Propõem-se usar um suprimento geotérmico de água quente para acionar uma turbina a vapor d'água utilizando o dispositivo esquematizado na figura. Água a alta pressão, 1,5 MPa e 180 °C, é estrangulada e segue para um evaporador instantâneo (“flash”) adiabático, de modo a se obter líquido e vapor à pressão de 400 kPa. O líquido sai pela parte inferior do evaporador, enquanto o vapor é retirado para alimentar a turbina. O vapor sai da turbina a 10 kPa e com título igual a 90%. Sabendo que a turbina produz uma potência de 1 MW, qual é a vazão necessária de água quente que deve ser fornecida pela fonte geotérmica.



Dissipadores/Trocadores de Calor:

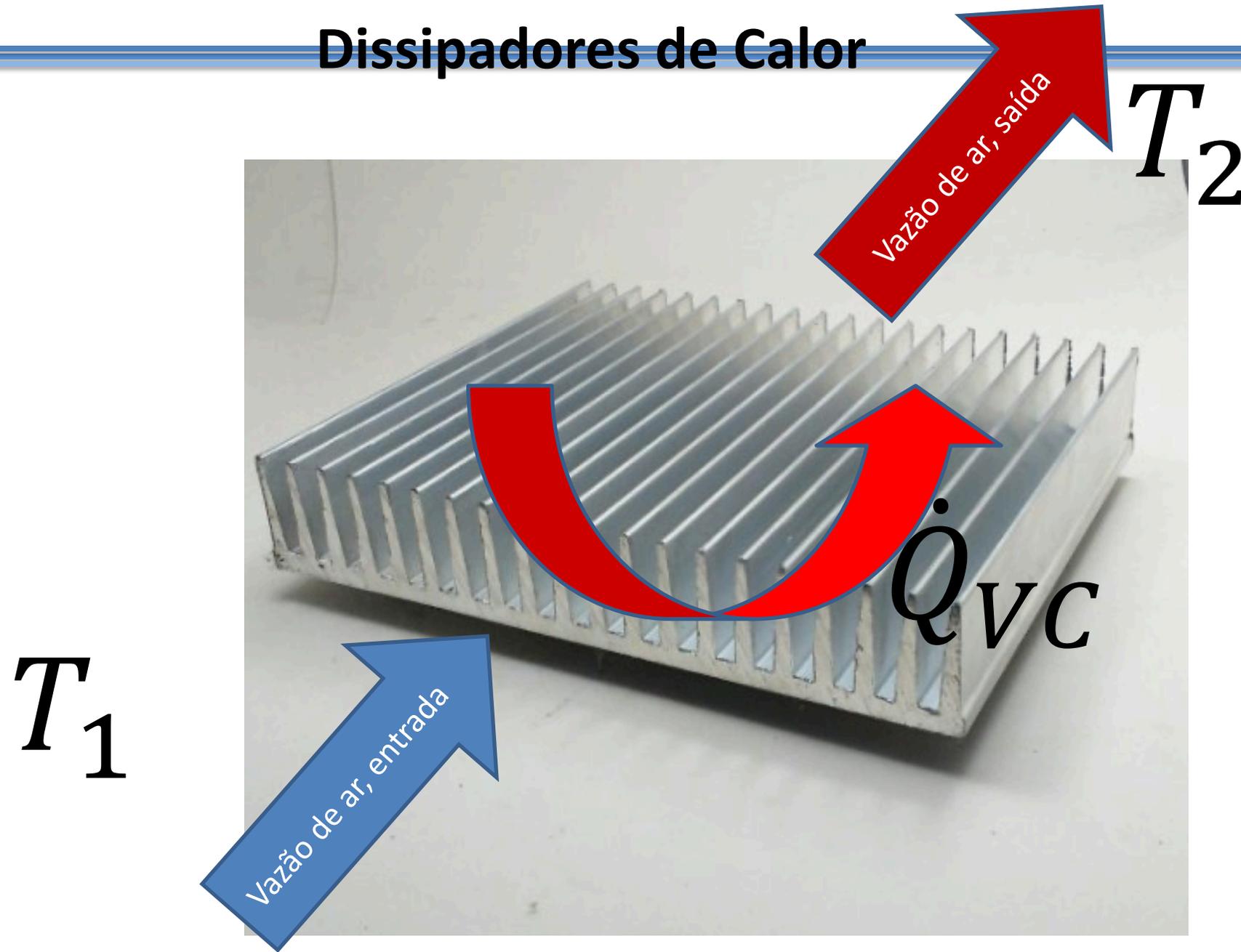
“Jogar” calor para o ambiente de forma mais eficaz

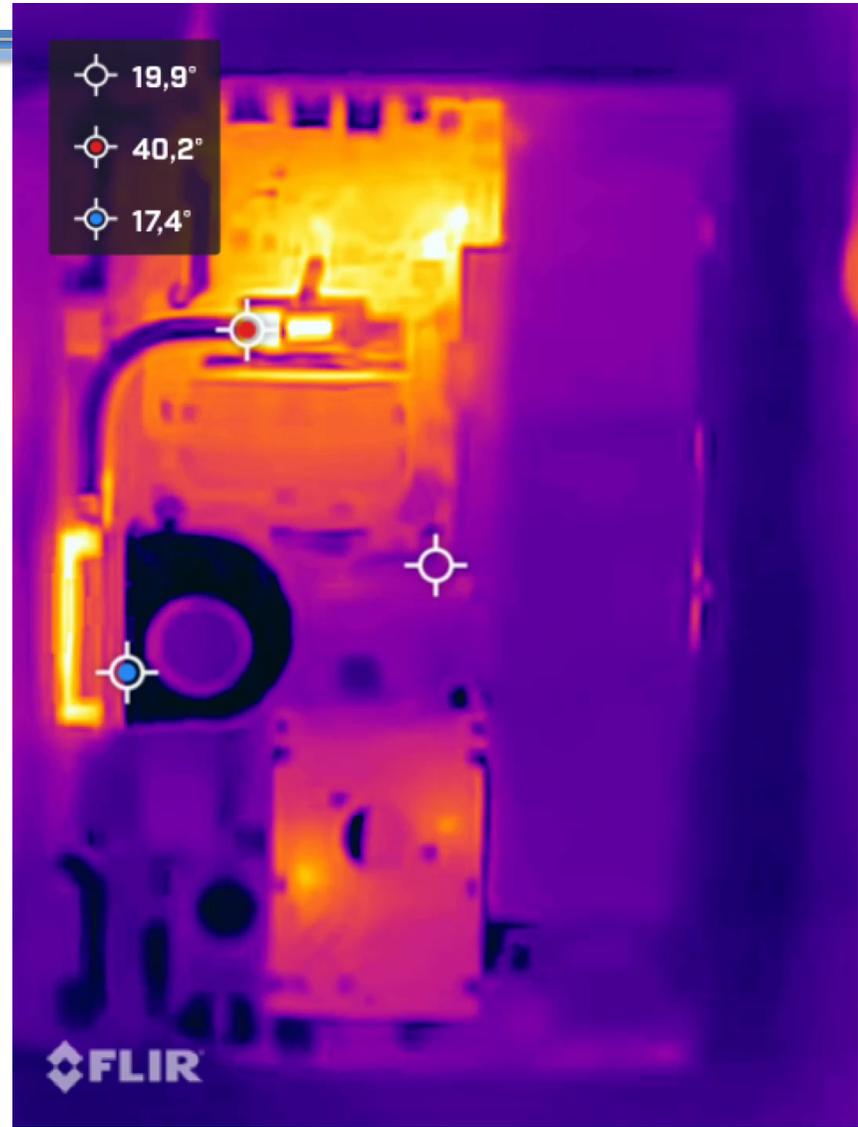
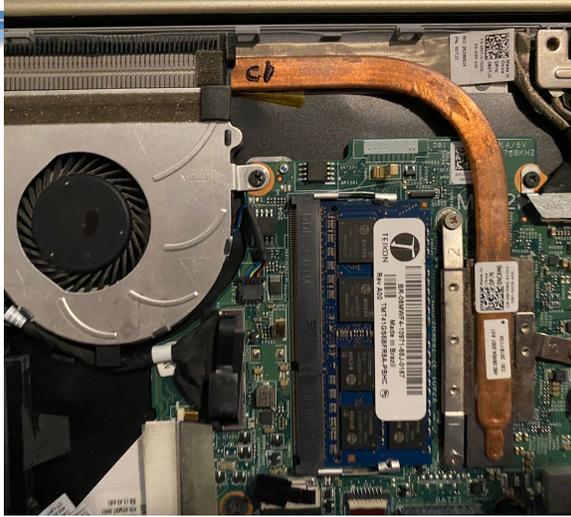
Trocar calor entre dois fluidos da melhor forma possível

Vamos entender a natureza humana primeiro?



Dissipadores de Calor

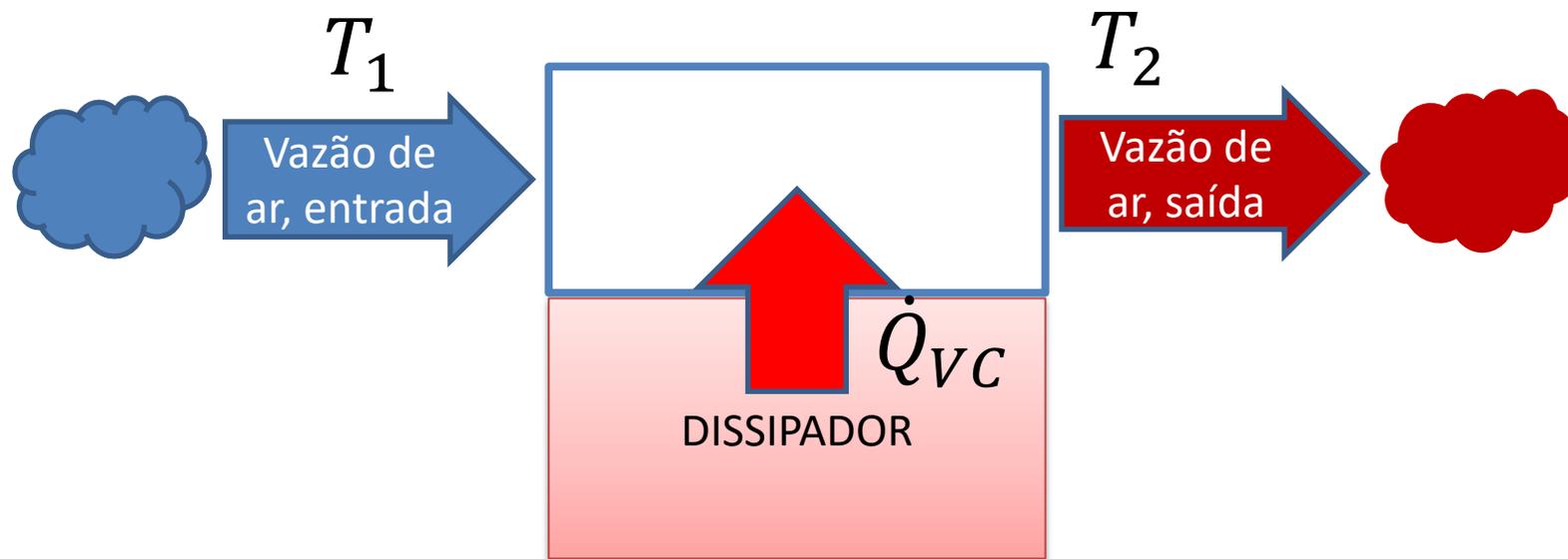




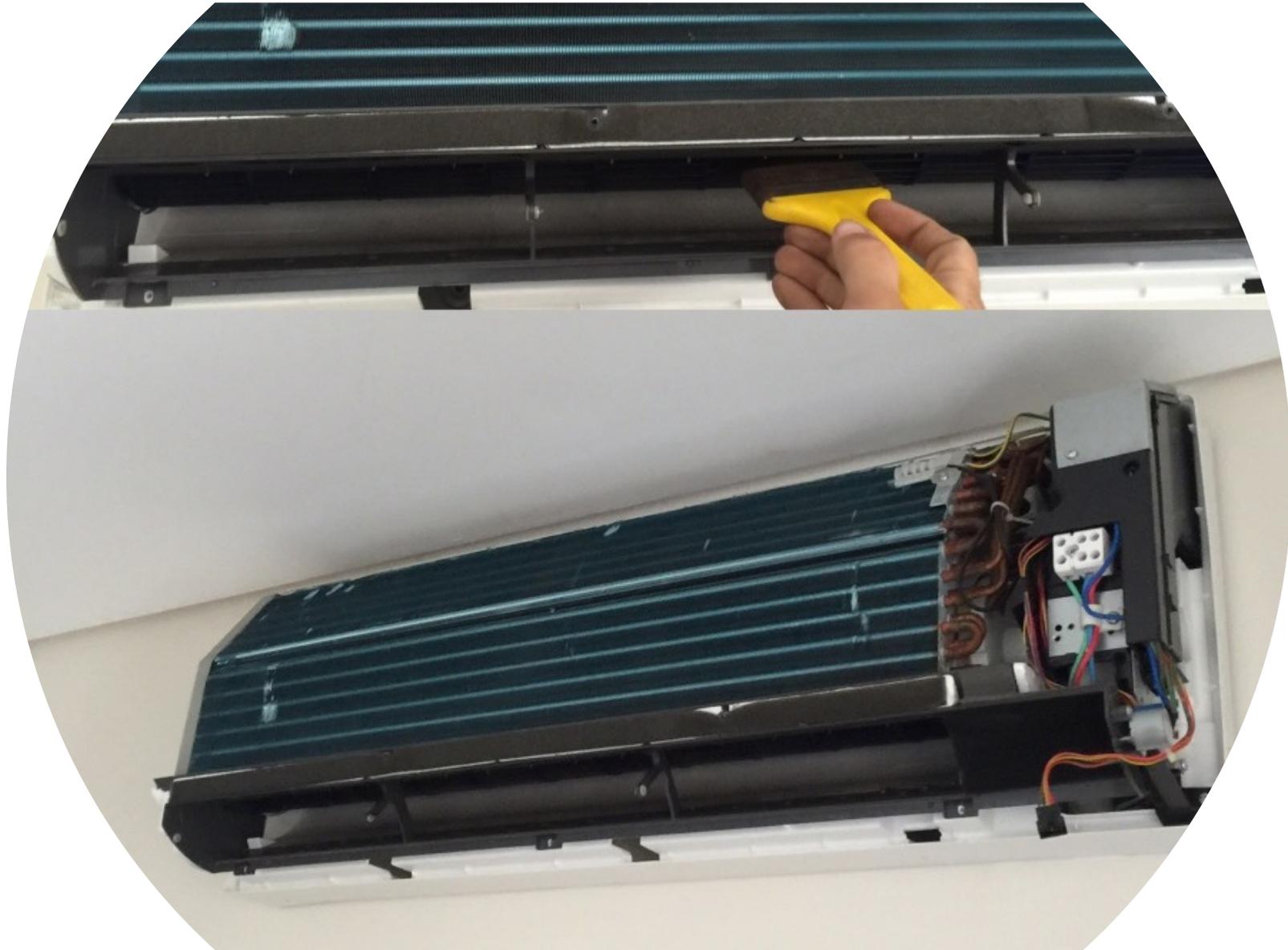
Como Equacionar? Como fazer hipóteses?

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{entra} \dot{m}_e - \sum_{sai} \dot{m}_s$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_{entra} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2000} + \frac{gZ_e}{1000} \right) - \sum_{sai} \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2000} + \frac{gZ_s}{1000} \right) + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC}$$

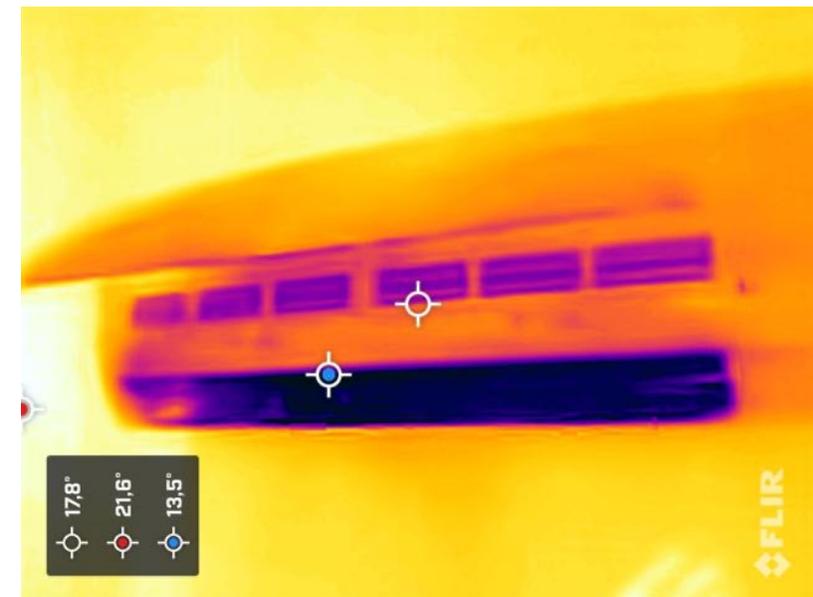
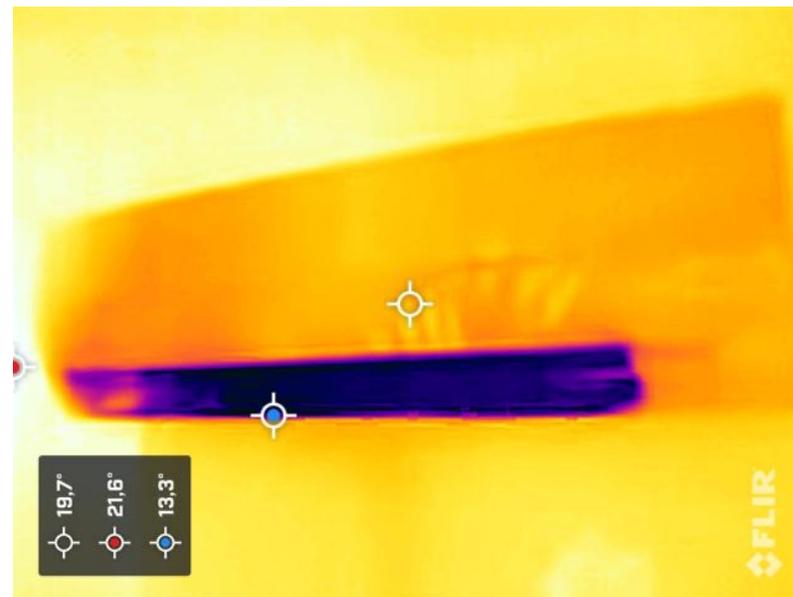
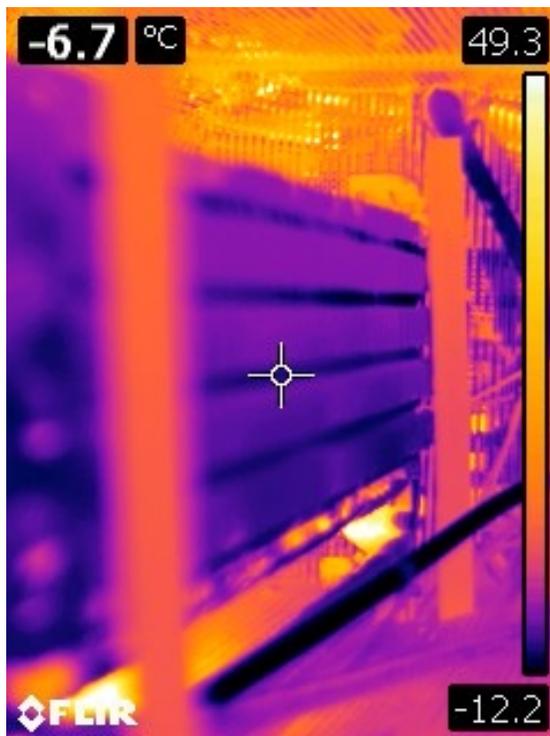


EVAPORADORA



Trocadores de Calor – Evaporadora (Ar cond)

Ar perde calor com a serpentina que está mais fria que o ambiente refrigerado.



Condensadora do ar condicionado

Ar troca calor
com o **fluido
quente,
resfriando-o**

