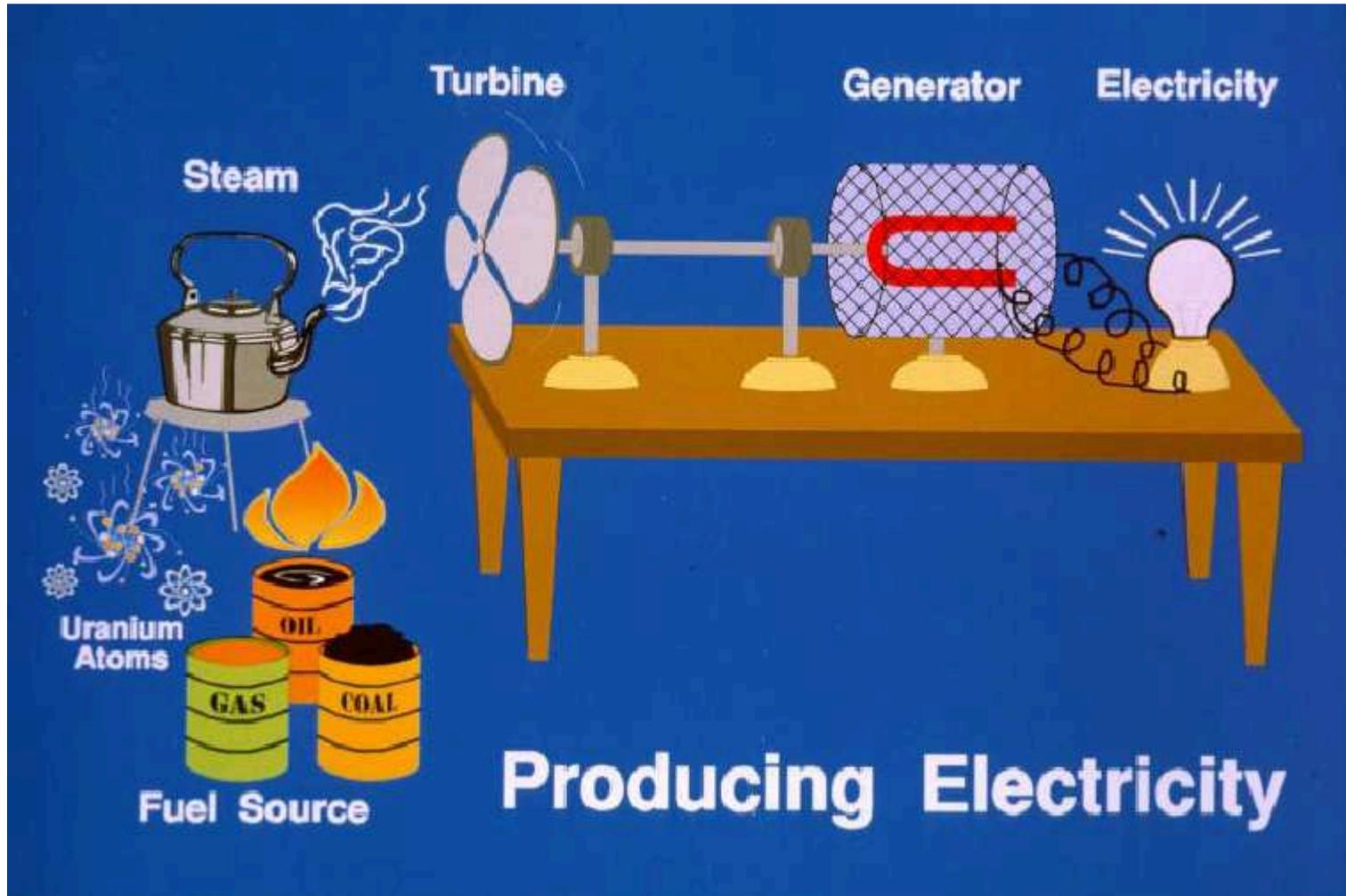


A primeira lei da termodinâmica



**Estudamos até agora 2 formas
de transferência de energia:**

Trabalho (W)

***Equivalente a o levantamento
de um peso**

Calor (Q)

***Causado por diferenças de
Temperatura**

Ainda, vimos que:

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \text{ ou } W, \text{ mas não } W_2 - W_1$$

and

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{12} \text{ ou } Q, \text{ mas não } Q_2 - Q_1$$

Q e W dependem do caminho!

- **Trabalho** e **Calor** são formas de transporte de energia que ocorrem na fronteira de um sistema.
- Quando **Trabalho** e **Calor** cruzam a fronteira, a **Energia** do sistema muda.
- **Trabalho** e **Calor** não são armazenados no sistema, mas a **Energia** sim.

As bases da primeira lei

- A Energia não é destruída: ela é conservada
- Durante um processo termodinâmico, ela é transformada de um tipo em outro.
- A primeira lei expressa um balanço de energia do sistema.
- Os fluxos de energia em um sistema (**trabalho** e **calor**) são relacionados às mudanças da **Energia** do sistema.

Formas de energia de um sistema

- Antes de se formular a primeira lei, devemos considerar quais as formas de energia de um sistema

A energia de um sistema possui 3 componentes

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

- **U : energia interna**
- **KE : energia cinética**
- **PE : energia potencial**

NOTA: Variações (deltas)

Energia interna....

É a energia que as moléculas possuem,
em geral como resultado de:

Translação

Rotação

Vibração

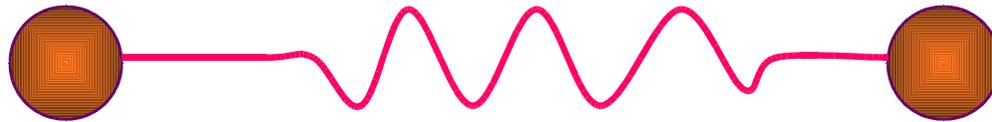
Elas são formas de energia cinética. Vamos desprezar aqui outras formas de energia cinética que existem no nível atômico.

Translação

- **Uma molécula possui energia cinética ao se deslocar no espaço. Por colisões, ela transfere energia para outros sistemas (quantidade de movimento linear).**
- **Ela é uma característica de moléculas poliatômicas e de átomos.**

Vibração

- **Moléculas também vibram durante seu deslocamento no espaço.**



A molécula também possui uma energia (cinética) vibracional

Rotação

- Moléculas (e átomos) também podem girar, possuindo energia cinética de rotação. Elas possuem momento angular que pode ser transportado, acrescentando ou removendo energia.

*Não vamos nos preocupar com os detalhes
microscópicos da energia interna*

**Energia interna é uma propriedade
do sistema.**

**Normalmente ela é percebida como uma
mudança na temperatura ou na pressão de
um sistema ... mas ela também pode se
manifestar como uma alteração na
composição quando se trata de uma
mistura.**

Energia cinética

$$\Delta KE = \frac{1}{2} m (V_f^2 - V_i^2)$$

$$= \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$$

Qual a variação de energia de uma massa de 10 kg acelerada de $V_i = 0$ a $V_f = 10$ m/s?

$$\Delta \text{KE} = \frac{1}{2} m (V_f^2 - V_i^2)$$

$$= \frac{1}{2} (10 \text{ kg} \cdot 100 \frac{m^2}{s^2}) \cdot \left(1 \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \frac{m}{s^2}} \right) = 500 \text{ N} \cdot m$$

$$= 500 \text{ N} \cdot m \times \left(\frac{\text{J}}{\text{N} \cdot m} \right) \times \left(\frac{\text{kJ}}{1,000 \text{ J}} \right) = 0.5 \text{ kJ}$$

Energia potencial : em sistemas mecânicos, ela é normalmente relacionada à gravidade.

$$\begin{aligned}\Delta PE &= mg (z_f - z_i) \\ &= mg (z_2 - z_1)\end{aligned}$$

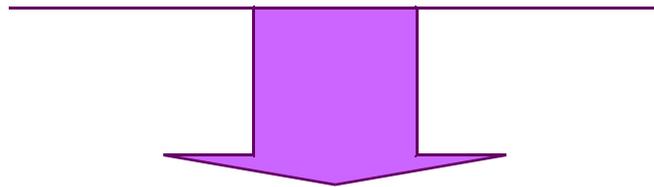
Trabalho pode ser realizado por mudanças na elevação do sistema

Conservação de energia

$$\Delta E = \Delta U + \Delta PE + \Delta KE = Q - W$$



Mudança
na energia
total do
sistema
durante Δt



Mudanças durante
 Δt nas quantidades
das diversas formas
de energia



Quantidade
líquida de
energia
transferida
pelo sistema
sob forma de
calor



Quantidade
líquida de
energia
transferida
pelo sistema
sob forma de
trabalho

Alguns comentários sob a primeira lei

$$Q - W = \Delta E$$

- Os termos do lado esquerdo são fluxos de energia cruzando a fronteira do sistema
- Q entrando é positivo, W saindo é positivo
- O lado direito é a variação da energia do sistema
- Forma algébrica da primeira lei

O lado direito consiste de 3 termos

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

- **ΔKE** – migração do sistema como o todo em relação a certos sistemas de referência fixos.
- **ΔPE** – mudanças de posição do sistema como o todo no campo gravitacional.
- **ΔU** – energia interna: translação, rotação, vibração das moléculas [mas também a energia armazenada nos estados orbitais, no spin, etc.].

A energia do sistema pode ser alterada:

- **Mudando-se a energia interna do sistema (o exemplo mais comum é por aquecimento)**
- **Mudando a PE, alterando-se a elevação do sistema.**
- **Mudando K, acelerando ou freando o sistema**

Conservação de energia para um sistema estacionário

- **Estacionário** = sem movimento, logo ΔPE e ΔKE são nulos e a primeira lei torna-se:

$$Q - W = \Delta U$$

Primeira lei para sistema estacionários

- **Forma diferencial:** $\delta Q - \delta W = dU$

- **Forma de taxas:** $\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt}$

- **Forma integral:** ${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1$

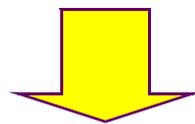
A primeira lei também pode ser escrita na forma diferencial

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

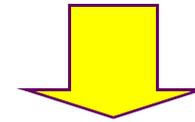
$$dU + dPE + dKE = \delta Q - \delta W$$



Mudança na quantidade de energia do sistema.



Quantidade diferencial de calor transferido para (+) ou do (-) sistema.



Quantidade diferencial de trabalho transferida do (+) ou para (-) o sistema.

*Ao se analisar processos
transientes, estamos interessados
em taxas*

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dU}{dt} + \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt}$$

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt}$$

Em termos de taxas, podemos calcular:

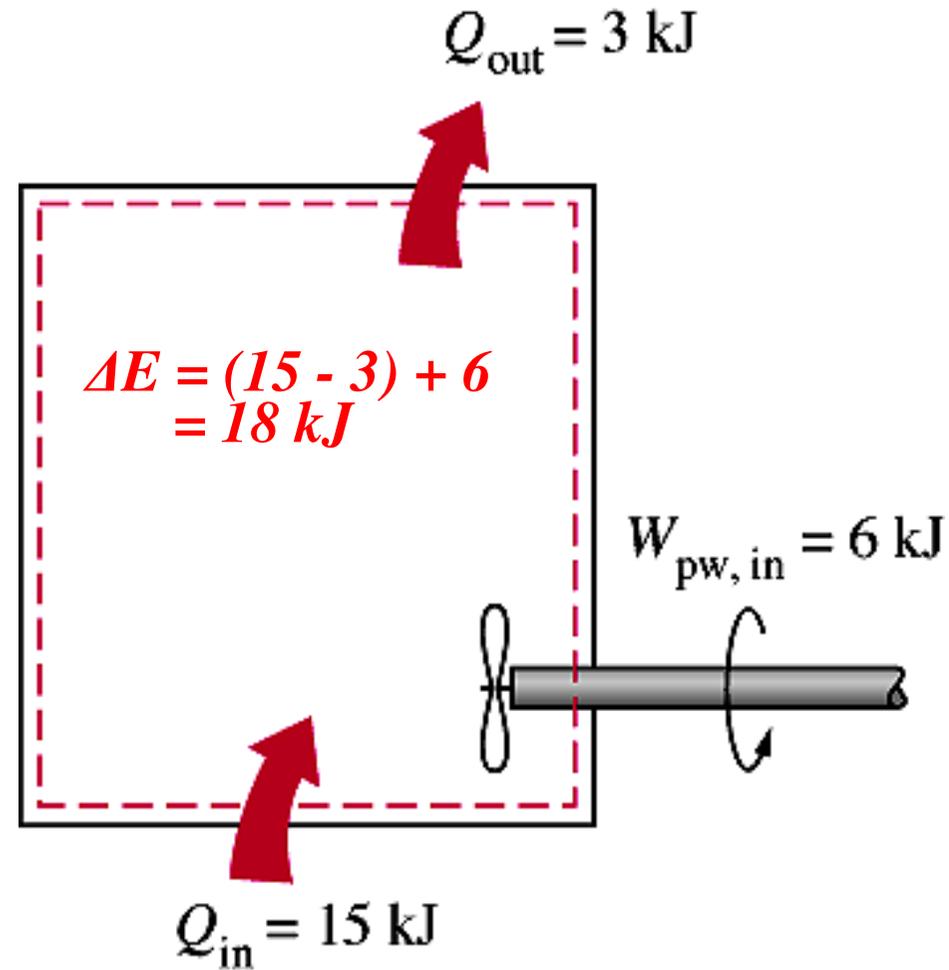
- **Mudanças de temperatura com o tempo**
- **Mudanças de pressão com o tempo**
- **Mudanças de velocidade com o tempo**
- **Mudanças de elevação com o tempo**

Dicas para se tratar um problema

- 1. Defina cuidadosamente o sistema, delimitando claramente sua fronteira**
- 2. Utilise todas as hipóteses simplificadoras pertinentes**
- 3. Indique os fluxos de calor e de trabalho através da fronteira, assim como seus respectivos sinais**
- 4. Em algumas casos, esboce o processo termodinâmico em um diagrama Pv or Tv .**

Mudança de energia do sistema

$$\begin{aligned}\Delta E &= Q - W \\ &= (Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}) \\ &\quad - (W_{\text{out}} - W_{\text{in}})\end{aligned}$$



Exemplo 4-1

0.01 kg de ar é comprimido em um dispositivo do tipo pistão-cilindro. Encontre a taxa de aumento de temperatura no instante de tempo em que $T = 400\text{K}$. Trabalho é realizado a uma taxa de 8.165 KW e calor é removido a uma taxa de 1.0 KW .

Exemplo 4-2: Processo isotérmico

Um gás perfeito é comprimido reversivelmente e isotermicamente de um volume de 0.01 m^3 e uma pressão de 0.1 MPa para uma pressão de 1 MPa . Quanto calor é transferido neste processo?

Exemplo 4-3: Processo isobárico

O volume sob um pistão contém 0.01 kg de água. A área do pistão é de 0.01 m² e a massa do pistão é 102 kg. A face superior do pistão está a pressão atmosférica, 0.1 MPa. A água encontra-se inicialmente a 25 °C e seu estado final é vapor saturado (x=1). Quanto calor e trabalho são realizados ou absorvidos pela água?

Processo isobárico

Para um processo a pressão constante:

$$\begin{aligned}W_b + \Delta U &= P\Delta V + \Delta U \\ &= \Delta(U + PV) = \Delta H\end{aligned}$$

Logo,

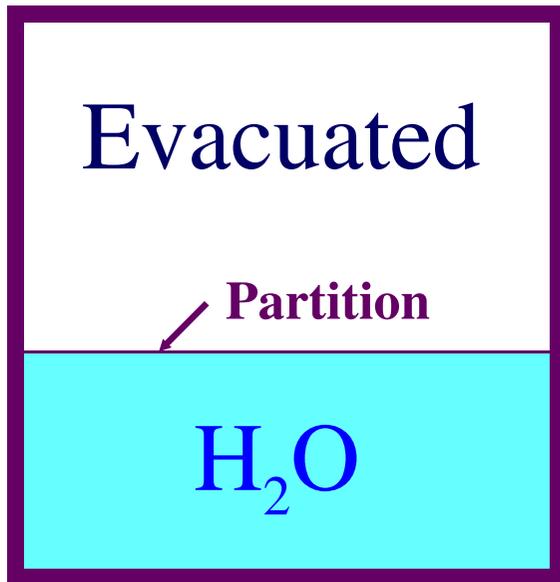
$$Q - W_{other} = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \quad (kJ)$$

Exemplo: ferver água a pressão constante

Exemplo

Um tanque adiabático possui 2 partes por meio de uma divisória. Uma parte contém 2.5 kg de líquido comprimido a 60°C e 600 kPa, enquanto a outra parte está a vácuo. A divisória é removida bruscamente, e a água se expande de forma a ocupar todo o tanque. Determine a temperatura final da água e o volume do tanque de forma a se obter uma pressão final de 10 kPa.

Exemplo



$$m = 2.5 \text{ kg}$$

$$T_1 = 60^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 600 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 10 \text{ kPa}$$

$$\Delta E = Q - W$$

Solução - pag. 1

Primeira lei: $Q - W = \Delta E$

$$Q = W = \Delta KE = \Delta PE = 0$$

$$\Delta E = \Delta U = m(u_2 - u_1) = 0$$

$$u_1 = u_2$$

Solução - pag. 2

Estado 1: líquido comprimido

$$P_1 = 600 \text{ kPa}, T_1 = 60^\circ\text{C}$$

$$v_f = v_{f@60^\circ\text{C}} = 0.001017 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_f = u_{f@60^\circ\text{C}} = 251.11 \text{ kJ/kg}$$

Estado 2: mistura líquido-vapor saturado

$$P_2 = 10 \text{ kPa}, \quad u_2 = u_1 = 251.11 \text{ kJ/kg}$$

$$u_f = 191.82 \text{ kJ/kg}, \quad u_{fg} = 2246.1 \text{ kJ/kg}$$

Solução - pag. 3

$$x_2 = \frac{u_2 - u_f}{u_{fg}} = \frac{251.11 - 191.82}{2246.1} = 0.0264$$

logo, $T_2 = T_{\text{sat}@10 \text{ kPa}} = 45.81^\circ\text{C}$

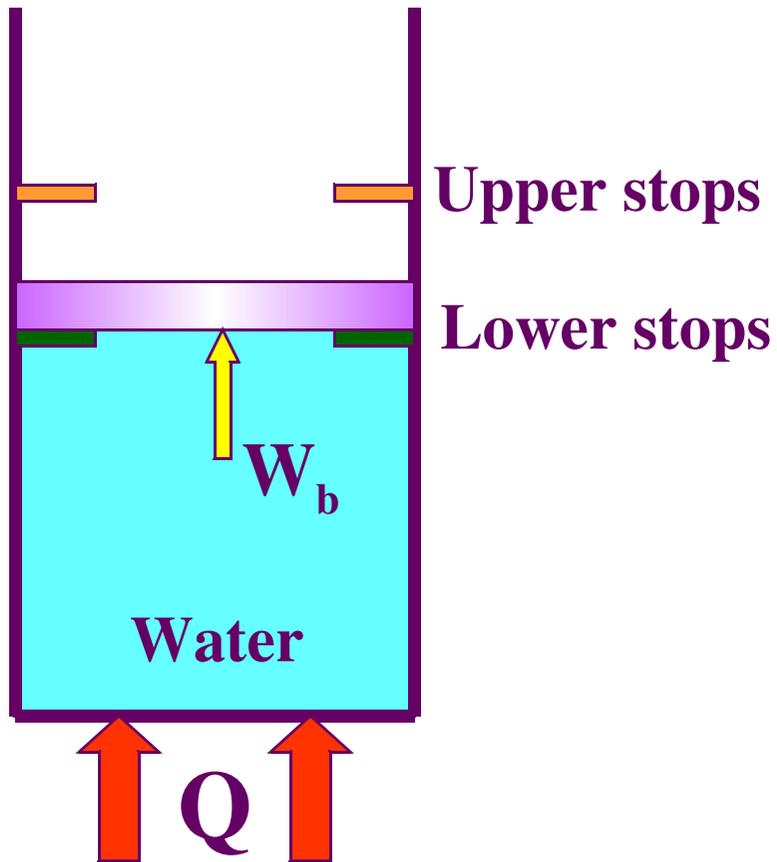
$$\begin{aligned} V_2 &= V_f + X_2 V_{fg} \\ &= [0.00101 + 0.0264 * (14.67 - 0.00101)] \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 0.388 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$V_2 = m v_2 = (2.5 \text{ kg})(0.388 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.97 \text{ m}^3$$

Exemplo - Trabalho

Um dispositivo pistão-cilindro contém um quilograma de água a 100°C. Inicialmente, o pistão repousa sobre calços inferiores do cilindro, de forma que a água ocupa um volume de 0.835 m³. O cilindro possui também calços em uma parte superior, de forma que quando o pistão encosta em tais calços o volume no interior do dispositivo é de 0.841 m³. Uma pressão de 200 kPa é necessária para suportar o pistão. Calor é fornecido à água até que ela se torne vapor saturado. Quanto trabalho a água realiza sobre o pistão?

Exemplo



$$m = 1 \text{ kg}$$

$$T_1 = 100^\circ\text{C}$$

$$V_1 = 0.835 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0.841 \text{ m}^3$$

Exemplo

- 3 Processos:
 - 1 \rightarrow 2 : Aquecimento a volume constante
 - 2 \rightarrow 3 : Expansão a pressão constante (200 kPa)
 - 3 \rightarrow 4 : Aquecimento a volume constante

Solução - pag. 1

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0.835 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} = 0.835 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Estado 1: mistura liquido-vapor saturado

$$T_1 = 100^\circ\text{C},$$

$$v_f = 0.001044 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 1.6729 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_f < v < v_g \implies \text{saturação } P_1 = 101.35 \text{ kPa}$$

$$v = v_f - x v_{fg} \implies x = 0,4988$$

$$u = u_f - x u_{fg} \implies u_1 = 1460 \text{ kJ/kg}$$

Solução - pag. 2

Estado 2: mistura liquido-vapor saturado

$$P_2 = 200 \text{ kPa} , v_2 = v_1 = 0.835 \text{ m}^3$$

$v_f < v < v_g \Rightarrow$ bifásico

tab A-1.2 \Rightarrow $x = 0,9427$

Processo 2-3: Volume aumenta enquanto a pressão permanece constante.

O pistão encosta no calço superior antes ou depois de atingir o estado de vapor saturado?

Solução - pag. 3

$$v_3 = \frac{V_3}{m} = 0.841 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Estado 3: Mistura liquido-vapor saturado

$$P_3 = P_2 = 200 \text{ kPa}$$

$$v_f = 0.001061 \text{ m}^3/\text{kg}, v_g = 0.8857 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$v_f < v_3 < v_g \implies$ pistão atinge calço superior antes da água atingir o estado de vapor saturado.

Tab A-1.2 $\implies x = 0,9495$

Solução - pag. 4

Processo 3-4 : o volume permanece constante durante a fase final de aquecimento (para a fase de vapor saturado) e a pressão aumenta.

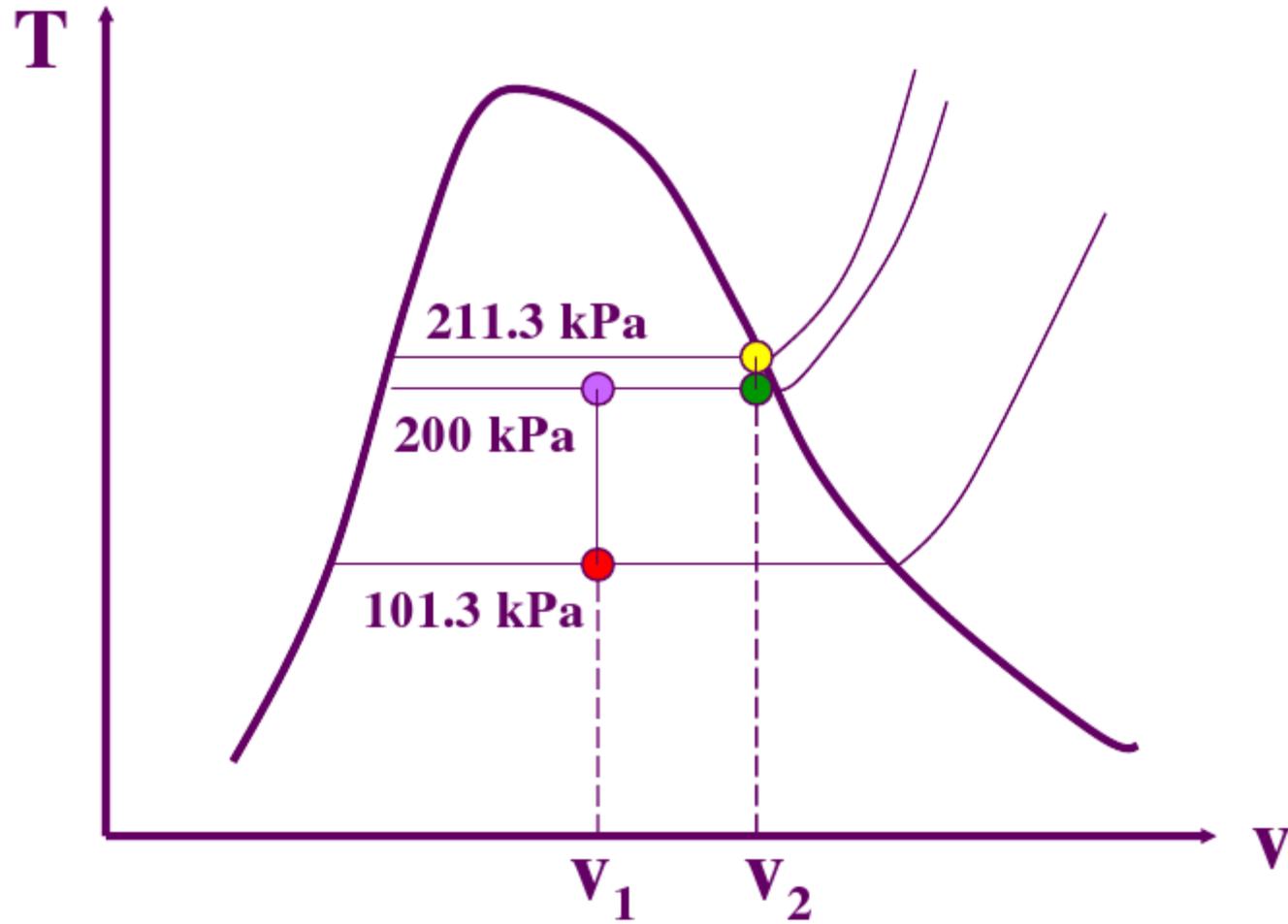
Estado 4: vapor saturado

$$v_4 = v_3 = 0.841 \text{ m}^3/\text{kg} = v_g$$

Interpolação tab. A-1.2

$$u_4 = 2531 \text{ kJ/kg}, \quad P_4 = 211.3 \text{ kPa}, \quad T_4 = 122^\circ\text{C}$$

Diagrama T-v



Solução - pag. 5

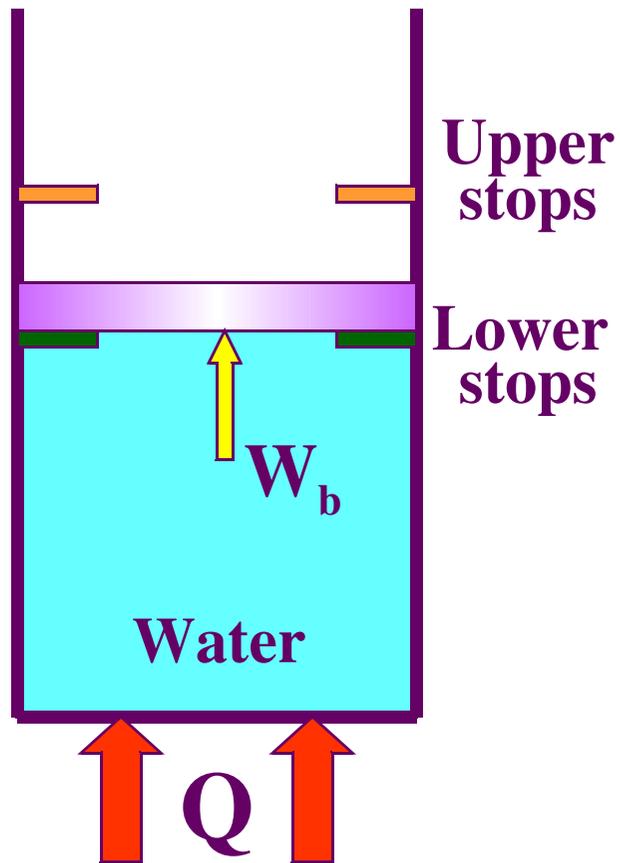
$$W_{b,14} = \int_1^4 P dV = \int_1^2 P dV + \int_2^3 P dV + \int_3^4 P dV$$

$$= 0 + mP_2(v_3 - v_2) + 0$$

$$= (1 \text{ kg})(200 \text{ kPa})(0.841 - 0.835) \frac{m^3}{\text{kg}} \frac{\text{kJ}}{m^3 \text{ kPa}}$$

$$= 1.2 \text{ kJ} \quad (> 0, \text{ realizado pelo sistema})$$

Exemplo: transferência de calor



**Encontre a
transferência de
calor para a água no
exemplo precedente**

Solução - pag. 1

Primeira lei: Conservação de energia

$$Q - W = \Delta E = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE}$$

$$Q_{14} = W_{b,14} + \Delta U_{14}$$

$$\Delta U_{14} = m(u_4 - u_1)$$

Solução - pag. 2

Estado 1: mistura liquido-vapor saturado

$$T_1 = 100^\circ\text{C},$$

$$v_f = 0.001044 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 1.6729 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_f < v < v_g \implies \text{satura\c{c}\~{a}o } P_1 = 101.35 \text{ kPa}$$

$$v = v_f - x v_{fg} \implies x = 0,4988$$

$$u = u_f - x u_{fg} \implies u_1 = 1460 \text{ kJ/kg}$$

Solução - pag. 3

Estado 4: vapor saturado

$$v_4 = 0.841 \text{ m}^3/\text{kg} = v_g$$

$$u_4 = 2531.48 \text{ kJ/kg} \quad (\text{interpolação})$$

$$Q_{14} = W_{b,14} + m(u_4 - u_1)$$

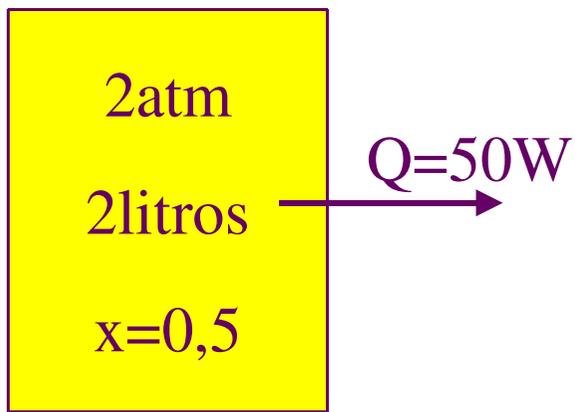
$$= 1.2 \text{ kJ} + (1 \text{ kg})(2531.48 - 1460.23) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 1072.45 \text{ kJ}$$

(> 0, fornecido à água)

Questão : EX. 4.6

Uma panela de pressão com volume interno de 2 litros opera a uma pressão de 0.2 MPa com água ($x = 0.5$). Depois da operação, a panela de pressão é deixada de lado para seu conteúdo esfriar. Se a taxa de perda de calor é de 50 watts, quanto tempo demora para a pressão interna cair para 1 atm (0.1 MPa)? Qual o estado da água nesse ponto? Indique o processo em um diagrama T-v.



Estado 1

x=0,5

V = 2 litros

P1=0,2MPa

T_{sat}=120°C

v_{1L}=0,001m³/kg

v_{1G}=0,8919m³/kg

u_{1L}=503,5KJ/kg

u_{1G}=2025,8KJ/kg

Vol. Estado1 = Vol. Estado2

$$v=(1-x)v_L+xv_G$$

$$v=0,5*0,001+0,5*0,8919$$

$$v_1=v_2=0,446\text{m}^3/\text{kg}$$

$$m= \text{cte} = V/v = 0,00451 \text{ kg}$$

$$P_2 = 0,101 \text{ MPa}$$

$$v_f < v_2 < v_g \Rightarrow \text{bifásico!}$$

$$T_2 = T_{\text{sat}} = 99,63^\circ\text{C}$$

Título Estado 2

$$x_2 = \frac{v - v_L}{v_G - v_L} = \frac{0,446 - 0,001}{1,672} = 0,261$$

Estado 2

$P_2=0,1$ MPa

$T_{\text{sat}}=199,63$ °C

$x=0,261$

$v_{2L}=0,001043$ m³/kg

$v_{2G}=1,6940$ m³/kg

$u_{2L}=417,36$ KJ/kg

$u_{2G}=2506,1$ KJ/kg

Energia interna estado2:

$$u_2 = (1-x)u_{2L} + xu_{2G}$$

$$u_2 = 963 \text{ KJ/kg}$$

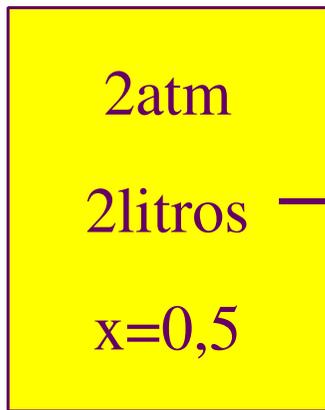
$$U_2 = m u_2 = 4343,6 \text{ J}$$

Energia interna estado1:

$$u_1 = (1-x)u_{1L} + xu_{1G}$$

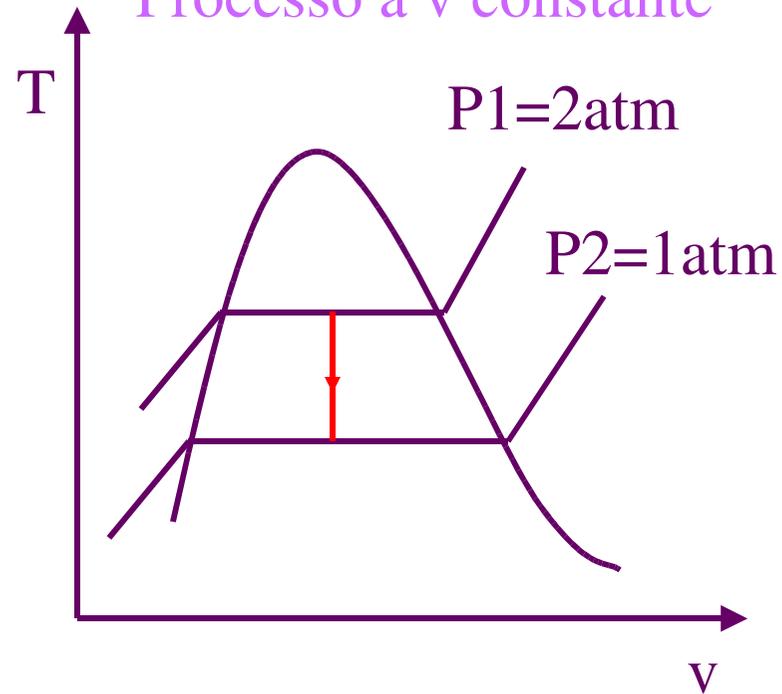
$$u_1 = 1517 \text{ KJ/kg}$$

$$U_1 = m u_1 = 6842,9 \text{ J}$$



$$Q=50W$$

Processo a v constante



1ª Lei ($W=0$)

$$\dot{Q} = \frac{dU}{dt} = -50 \text{ J/s}$$

$$dt = \frac{dU}{\dot{Q}} = \frac{-2499,3 \text{ J}}{-50 \text{ J/s}}$$

Questão EX. 4.7

Um poderoso misturador de 1,2 hp (0,8481 Btu/s) é usado para fazer a temperatura de 3 lbm de água aumentar de 68 °F para 158 °F . Se a água perde calor para o meio a uma taxa de 10 Btu/min, quanto tempo demorará o processo?

$$W_{\text{mec}} = -1,2 \text{ HP} = 0,8481 \text{ Btu/s}$$

$$T_1 = 68 \text{ }^\circ\text{F} \text{ (águas no estado líquido)}$$

$$T_2 = 158 \text{ }^\circ\text{F} \text{ (águas no estado líquido)}$$

$$Q = -10 \text{ Btu/min}$$

$$m = 3 \text{ lbm}$$

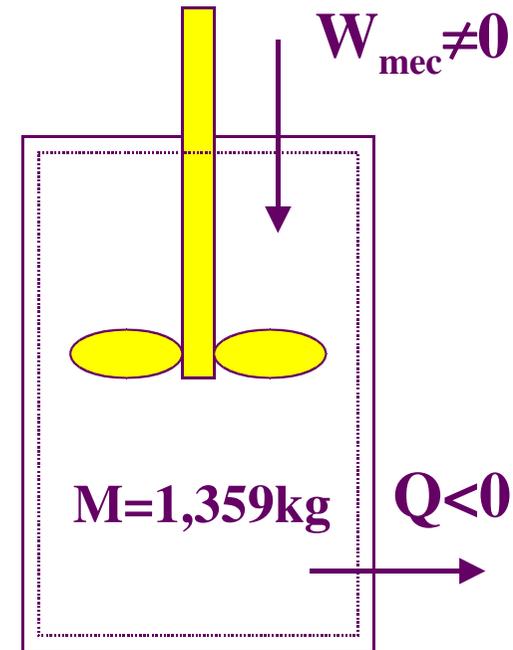
Tab B-1.1 (liq. Sat => liq compr.)

interpolação:

$$u_1 = 36,09 \text{ Btu/lbm}$$

$$u_2 = 125,94 \text{ Btu/lbm}$$

$$\Delta U = m\Delta u = 269,6 \text{ Btu}$$



$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt}$$

$$-0,1667 \text{ Btu/s} + 0,8481 \text{ Btu/s} = \frac{269,6 \text{ Btu}}{dt}$$

$$dt = 6 \text{ min } 36 \text{ s}$$

Questão EX. 4.10

Ar, aqui considerado como gás perfeito, é comprimido em um dispositivo pistão-cilindro fechado em um processo politrópico reversível com $n=1.27$. A temperatura do ar antes da compressão é $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e depois da compressão é de 130°C . Calcule o calor transferido por unidade de massa no processo de compressão.

Ex4.10)

$$T_1 = 303 \text{ K}$$

$$T_2 = 403 \text{ K}$$

$$n = 1,27$$

$$W = \int P dv$$

$$Pv^n = \text{const.}$$

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{MR(T_2 - T_1)}{1-n}$$

Trabalho – específico

$${}_1w_2 = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \frac{-297 \times 100}{0,27} = -110 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Calor \rightarrow 1ª Lei

$${}_1q_2 - {}_1w_2 = (u_2 - u_1)$$

$${}_1q_2 = C_v \Delta T + {}_1w_2$$

$${}_1q_2 = 0,7165 \times 110 - 110 = -38,3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Para comprimir do estado 1 ao 2 é necessário transferir 38,3 KJ por kg de ar comprimido.