

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



PME 3344

Termodinâmica Aplicada

5) Primeira Lei da Termodinâmica



1ª Lei da Termodinâmica

Introdução

Em Física Geral, aprendemos sobre o princípio da conservação de Energia:

“A quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante”.

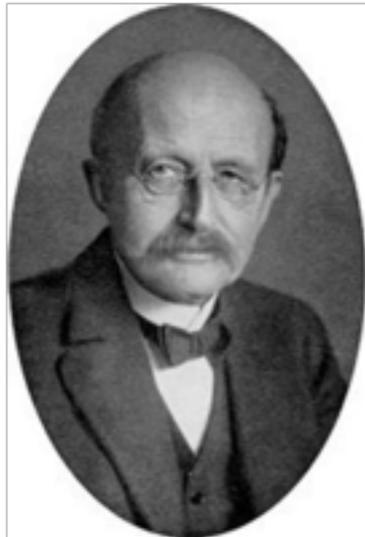
Uma outra maneira de enunciar esse princípio é dizer que:

“A energia não pode ser criada nem destruída: a energia pode apenas ser acumulada ou transformar-se de um tipo em outro(s)”



1ª Lei da Termodinâmica

Introdução



Max Planck
1858-1947

Segundo Max Planck, a *1ª Lei da Termodinâmica* nada mais é do que a expressão matemática do princípio da conservação da energia aplicado aos fenômenos que envolvam transferência de calor.



1ª Lei da Termodinâmica

Para um sistema num ciclo termodinâmico (propriedades finais coincidem com as iniciais) tem-se que:

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

Integral cíclica

$$0 = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

variação de uma
propriedade

$$\Delta E = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

energia



1ª Lei da Termodinâmica

Para um sistema que passa por uma mudança infinitesimal de estado, podemos realizar um balanço de energia:

Variação da
energia do sistema
no processo

=

Energia que
entra no sistema
durante o
processo

-

Energia que sai
do sistema
durante o
processo

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



Expressão diferencial
da 1ª. Lei



1ª Lei da Termodinâmica

Para entender os sinais que aparecem na expressão diferencial da 1ª Lei, precisamos lembrar da convenção de sinais adotada.

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

★ $\delta Q > 0$ quando o calor é “transferido” da vizinhança para o sistema;

★ $\delta Q < 0$ quando o calor é “transferido” do sistema para a vizinhança;

★ $\delta W > 0$ trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $\delta W < 0$ trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

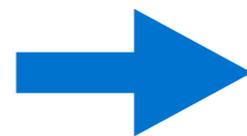


1ª Lei da Termodinâmica

Podemos integrar a expressão diferencial entre os estados 1 e 2 e assim obter a expressão da 1ª Lei para um sistema:

$$\int_1^2 dE = E_2 - E_1$$

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1-2}$$



$$E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$\int_1^2 \delta W = W_{1-2}$$



1ª Lei da Termodinâmica

Podemos também realizar um balanço em um determinado instante de tempo, e assim temos:

Taxa de variação
da energia do
sistema

=

Taxa com que
energia que
entra no sistema

-

Taxa com que
energia sai do
sistema

Assim:
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$



1ª Lei da Termodinâmica

Na expressão:

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

Taxa de transferência de calor para o sistema

Taxa de realização de trabalho pelo sistema

Temos uma equação diferencial ordinária (EDO), cuja solução exige o conhecimento da energia no instante inicial.

As seguintes relações são válidas:

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \dot{Q} dt$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 \dot{W} dt$$



1ª Lei da Termodinâmica

Resumo

1ª Lei para um processo (1-2): $\Delta E = Q_{1-2} - W_{1-2}$

1ª Lei para um instante: $\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$



1ª Lei da Termodinâmica

Simplificações

◆ Ciclo: $E_1 = E_2 \quad \therefore \Delta E = 0 \quad \therefore Q = W$

Podemos escrever de outra forma: $\oint \delta Q = \oint \delta W$

← integral cíclica

◆ Regime permanente (propriedades não variam com o tempo):

$$0 \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$



1ª Lei da Termodinâmica

Escrevemos expressões para a conservação da energia sem nos preocuparmos sob quais formas encontramos a energia.

Anteriormente vimos:

A energia total (E) de um sistema composto por uma substância compressível simples em um dado estado é:

$$E = U + E_c + E_p$$

interna
cinética
potencial

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad \text{ou} \quad dE = dU + dE_c + dE_p$$

As igualdades são válidas pois Energia é uma função de ponto!



1ª Lei da Termodinâmica

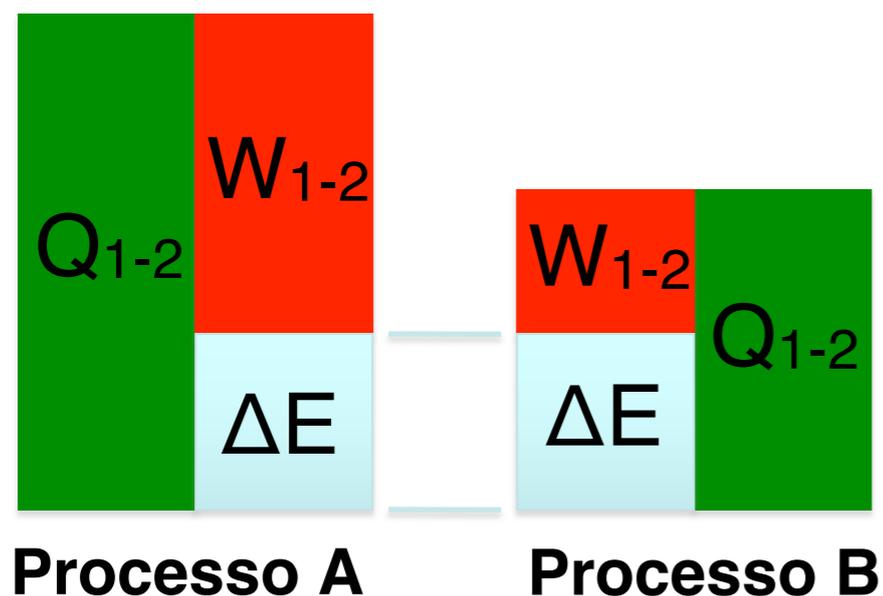
Voltando à questão de função de ponto e caminho:

$$\underbrace{E_2 - E_1}_{\text{Variação da energia (propriedades)}} = \underbrace{Q_{1-2} - W_{1-2}}_{\text{Interação de energia (não-propriedades)}}$$

Variação da energia
(propriedades)

Interação de energia
(não-propriedades)

Observe a figura:



Fica claro que apesar de seguirmos por processos em que trabalho e calor são diferentes, a variação de energia do sistema é a mesma!



Lembrando de Mecânica:

Energia cinética

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

Energia potencial

$$\Delta E_p = mg (z_2 - z_1)$$

Completamos a apresentação da conservação da energia para um sistema. Veremos como avaliar a propriedade energia interna!



U - energia interna (energia)

u – energia interna específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

$$U = U_{liq} + U_{vap} \quad \text{ou} \quad \frac{m u = m_{liq} u_l + m_{vap} u_v}{m}$$

Dividindo por m e introduzindo o título:

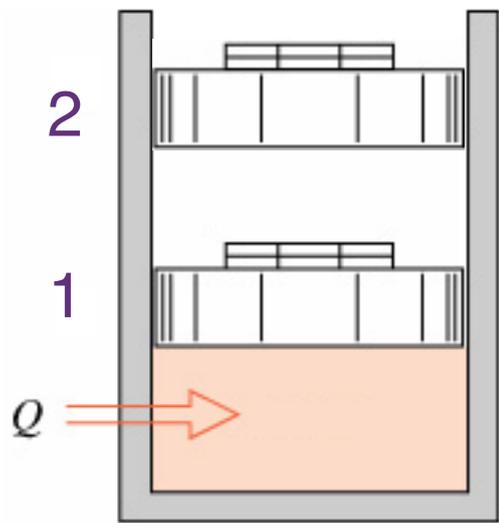
$$u = (1 - x) u_l + x u_v \quad \text{ou} \quad u = u_l + x u_{lv}$$

sendo u_l a energia específica do líquido saturado, u_v a energia do vapor saturado e u_{lv} a diferença entre a primeira e a segunda.



A propriedade entalpia

Considere o gás no conjunto cilindro-pistão como sistema.
Vamos aquecer o sistema lentamente:



• **1ª lei:** $E_2 - E_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$

Simplificando: $E_2 - E_1 \simeq U_2 - U_1$ **Por que?**

$$W_{1-2} = \int P dV = P_1(V_2 - V_1)$$

Combinando as expressões: $U_2 - U_1 = Q_{1-2} - P_1(V_2 - V_1)$

**Define-se
entalpia como:**

$$H = U + PV$$

Assim: $Q_{1-2} = H_2 - H_1$



H - entalpia (energia)

h – entalpia específica (energia / massa)

Para uma mistura líquido vapor:

$$H = H_{liq} + H_{vap} \quad \text{ou} \quad mh = m_{liq}h_l + m_{vap}h_{lv}$$

Introduzindo o título:

$$h = (1 - x)h_l + xh_v \quad \text{ou} \quad h = h_l + xh_{lv}$$

sendo h_l a entalpia específica do líquido saturado, h_v a entalpia do vapor saturado e h_{lv} a entalpia de vaporização.



Aproximações para o líquido comprimido usando as propriedades do líquido saturado

$$V_{liq,comp}(T,P) \approx v_l(T)$$

$$u_{liq,comp}(T,P) \approx u_l(T)$$

$$h_{liq,comp}(T,P) \approx u_l(T) + P \cdot v_l(T)$$

ou

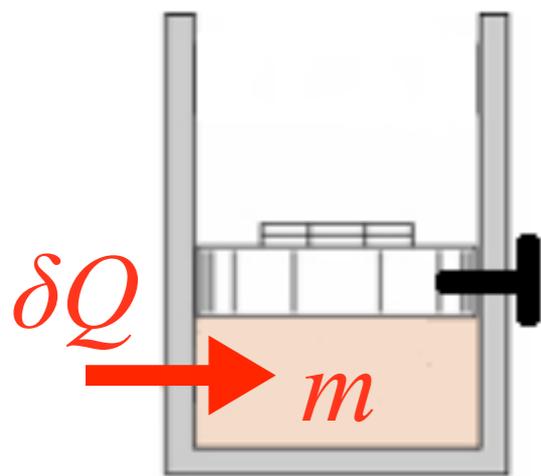
$$h_{liq,comp}(T,P) \approx h_l(T) + v_l(T) \cdot [P - P_{sat}(T)]$$

Apresentamos novas propriedades, agora precisamos aprender a determiná-las!

Calores Específicos

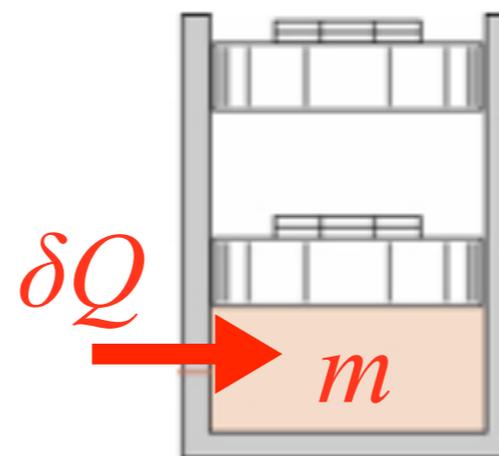
Para calcular as variações de entalpia e energia interna precisamos definir duas novas propriedades termodinâmicas, os **calores específicos a pressão constante e a volume constante**.

Considere os dois experimentos com um fluido:



Calor específico a volume constante

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



Calor específico a pressão constante

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



Calores específicos

Concluimos que:

Calor específico a volume constante $c_v = \frac{\delta Q}{m dT}$

Calor específico a pressão constante $c_p = \frac{\delta Q}{m dT}$

Podemos aplicar a 1ª Lei para os dois casos considerando a substância como sistema:

$$\delta Q = dU + \delta W (=0)$$

$$\delta Q = dU + \delta W (=PdV)$$

Combinando com as expressões dos calores específicos:

$$c_v = \frac{dU}{m dT} \rightarrow c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v$$

$$c_p = \frac{dU + pdV}{m dT} \rightarrow c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p$$



Substância incompressível

O modelo considera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = cte \\ u = u(T) \Rightarrow c_v(T) = \frac{du}{dT} \end{array} \right.$$

Derivando a definição de entalpia:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_P = \frac{du}{dT} \Rightarrow c = c_p = c_v \Rightarrow u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dt$$

Considerando adicionalmente
calor específico constante:

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

Quando podemos fazer essa hipótese?



Gás perfeito

O modelo considera que:

$$\left\{ \begin{array}{l} Pv = RT \\ u(T) \end{array} \right.$$

Considerando a definição da entalpia:

$$h = h(T) = u + RT \Rightarrow dh = du + RdT$$

Combinando a equação anterior com as definições dos calores específicos:

$$c_{v0}(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT}$$

Obtém-se: $c_{p0} = c_{v0} + R$

maior que c_v

indica gás perfeito



Gás perfeito: Aproximações

$$\begin{array}{l} c_{p0} \text{ e } c_{v0} \\ \text{constantes:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} c_{v0}(T) = \frac{du}{dT} \\ c_{p0}(T) = \frac{dh}{dT} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Integrando}} \begin{array}{l} u_2 - u_1 = c_{v0}(T_2 - T_1) \\ h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1) \end{array}$$

Em alguns problemas aparecem u e h isolados, isto é, não aparecem diferenças de u e h . Nessa situação como determinamos as propriedades?

Definimos um estado de referência para u , por exemplo. Nesse estado estabelecemos um valor arbitrário para u e calculamos h correspondente! Vejamos como fazer isso na sequência.



Gás perfeito: Aproximações

Vamos definir o estado de referência. Considere a expressão:

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

Por simplicidade vamos estabelecer que para $T = 0 \text{ K} \Rightarrow u = 0$:

$$u = u(0) + \int_0^T c_v(T) dt \quad \rightarrow \quad u(T) = c_{v0} T$$

Agora calculamos h :

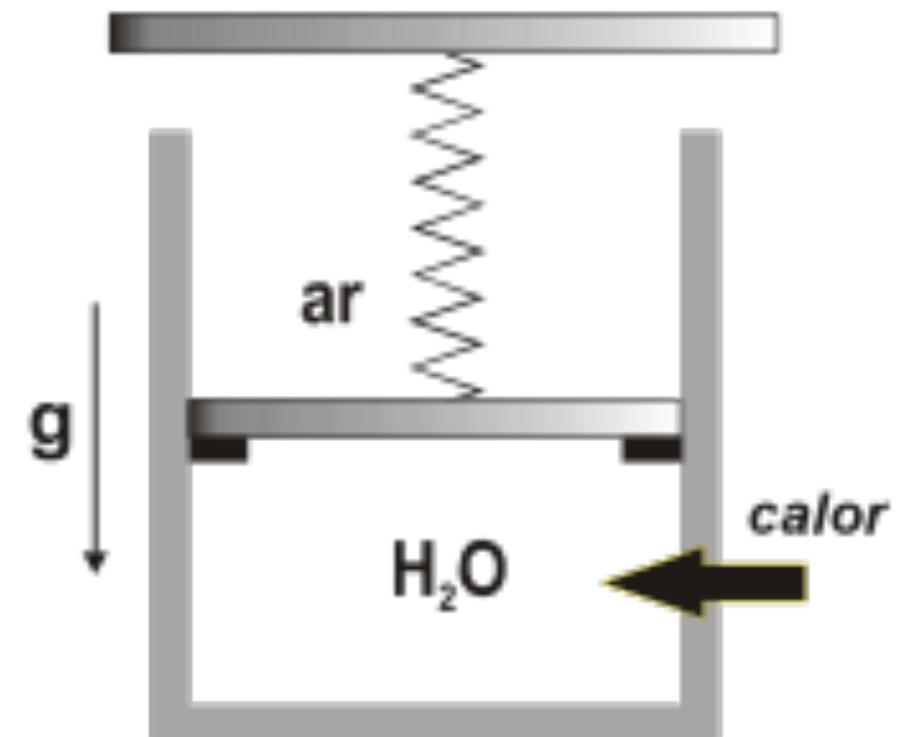
$$h(T_{ref}) = u(T_{ref}) + Pv = 0 + RT_{ref} \quad \rightarrow \quad h(0\text{K}) = 0$$

Analogamente: $h(T) = c_{p0} T$

Exercício 1:

Um conjunto cilindro-êmbolo contém 1 kg de água. A mola encontra-se comprimida na posição inicial, de modo que é necessária uma pressão de 300kPa no fluido para ergue-la. Para um volume de 1,5 m³ a força exercida pela mola é tal que a pressão no fluido é de 500 kPa. No estado inicial a água está a 100 kPa e ocupa um volume de 0,5m³. Calor é então transferido até que a pressão atinja 400 kPa. Pede-se:

- (a) representar o processo em um diagrama p-v, incluindo as linhas de saturação;
- (b) calcular o trabalho;
- (c) determinar calor transferido no processo.





Exercício 1: Solução

Hipóteses:

1. O sistema é a água contida no conjunto;
2. Os processos são de quase-equilíbrio;
3. Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
4. Não há atrito entre o pistão e o cilindro;
5. A mola é linear;
6. Sistema estacionário (sem variação de energia cinética);
7. Variação desprezível da energia potencial.

Exercício 1: Solução

◆ **Estado 1:** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_1 = 0,5/1 = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 1 devemos consultar a tabela de saturação com $P_1 = 100\text{kPa}$ ($T_{sat} = 99,62^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_1 com $v_f=0,001043$ e $v_g=1,694 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	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.
P	T	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843





Exercício 1: Solução

◆ **Estado 1:** Definido, pois conhecemos v e P .

Como $v_l < v_1 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $T_1 = T_{sat}$.
Aproveitamos a oportunidade para buscar da tabela $u_l=417,33$ e $u_v=2506,1$ kJ/kg.

Pressão kPa	Temp. °C	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.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843

O título pode ser prontamente calculado, $x_1 = (v_1 - v_l) / (v_v - v_l) = 0,295$

E a energia interna da mistura é $u_1 = (1 - x_1)u_l + x_1u_v = 1033,5$ kJ/kg



Exercício 1: Solução

◆ **Estado 2 (batente sem atuação):** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_2 = v_1 = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com $P_2 = 300\text{kPa}$ ($T_{sat} = 133,55^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_2 com $v_f=0,001073$ e $v_g=0,6058 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_f < v_2 < v_g$, temos **líquido + vapor**. Logo $T_2 = T_{sat}$.

Aproveitamos a oportunidade para buscar da tabela $u_f=561,13$ e $u_g=2543,6\text{kJ/kg}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_2=(v_2-v_f)/(v_g-v_f) = 0,825$

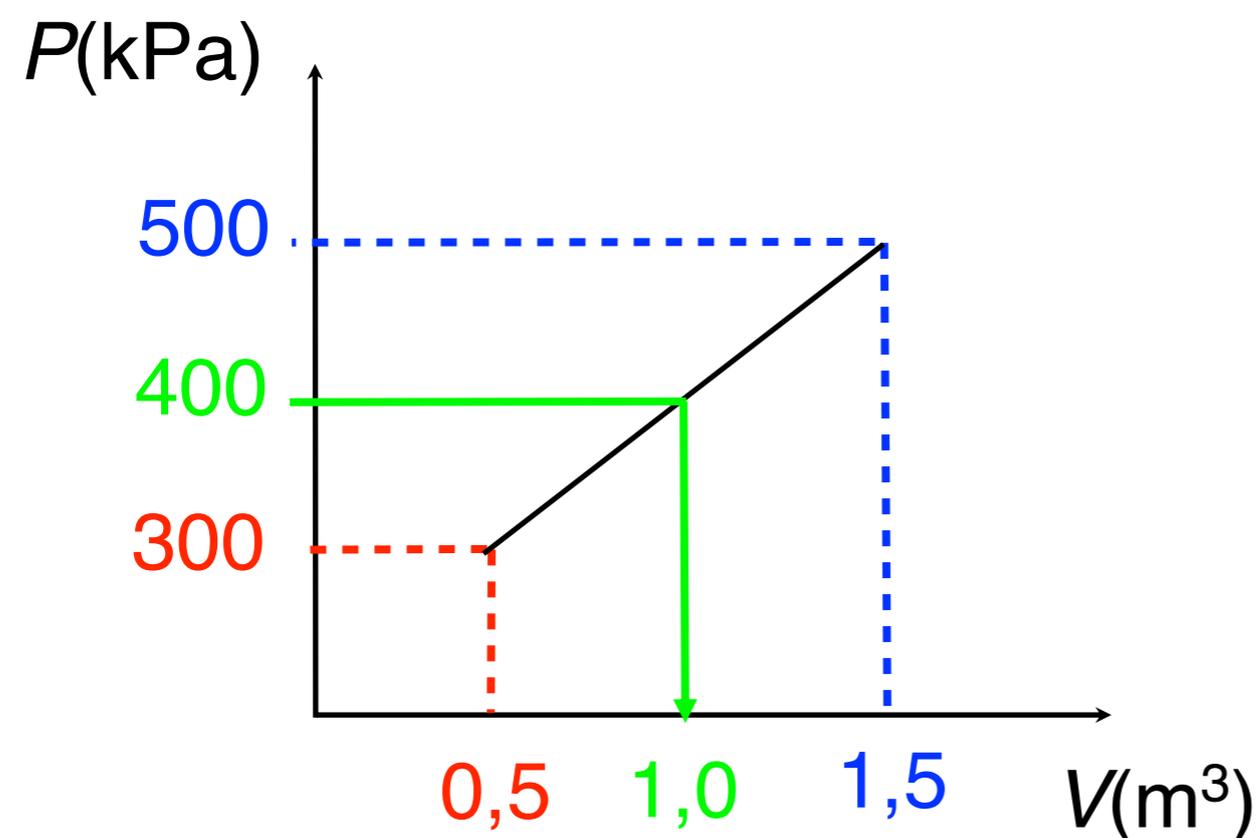
E a energia interna da mistura é $u_2=(1-x_2)u_f+x_2u_g= 2196,7 \text{ kJ/kg}$



Exercício 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos v e $P_3 = 400\text{kPa}$. **Como?**

Analizando a mola!



$$v_3 = 1/1 = 1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Exercício 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_3 = 1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para identificar o estado 3 devemos consultar a tabela de saturação com $P_3 = 400\text{kPa}$ ($T_{sat} = 143,69^\circ\text{C}$) e comparar o valor de v_3 com v_l e $v_v = 0,46246 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Pressão kPa	Temp. °C	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.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
375	141,32	0,001081	0,48137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,44288	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565

Como $v_3 > v_v$, temos **vapor superaquecido**.



Exercício 1: Solução

◆ **Estado 3:** Definido, pois conhecemos v e P .

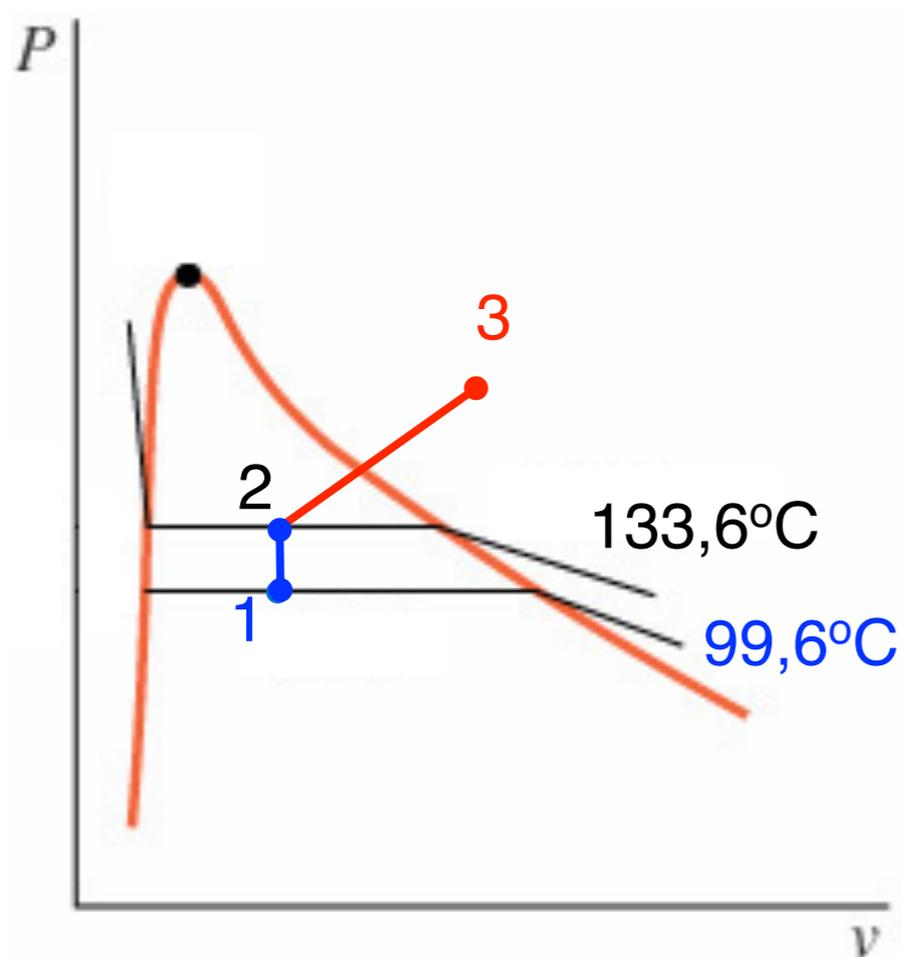
Da tabela de vapor superaquecido com $P_3 = 400\text{kPa}$ e $v_3 \approx 1,0056\text{m}^3/\text{kg}$, temos $T_3 = 600^\circ\text{C}$ e $u_3 = 3300,2\text{kJ/kg}$.

Tabela B.1.3
Vapor d'água superaquecido

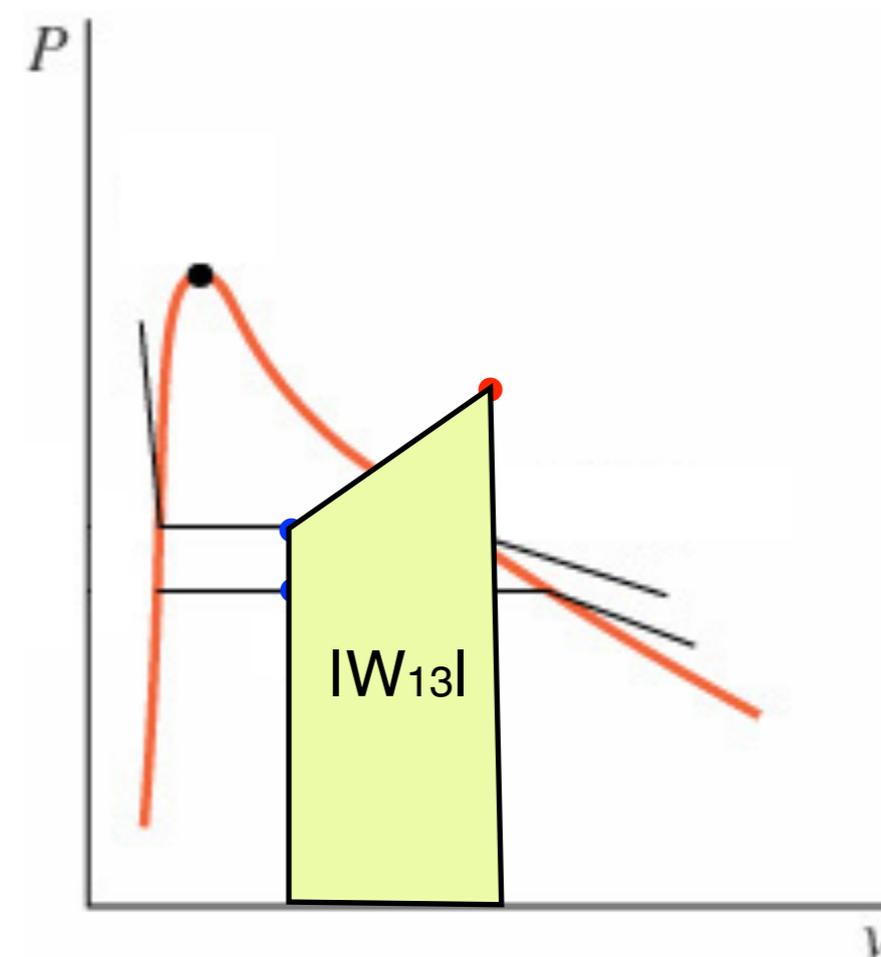
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m^3/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m^3/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m^3/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
	$P = 200 \text{ kPa (120,23)}$				$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				$P = 400 \text{ kPa (143,63)}$			
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	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	8,5832	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
1300	3,63018	4683,23	5409,26	10,1982	2,42013	4682,99	5409,03	10,0109	1,81511	4682,75	5408,80	9,8780

Exercício 1: Solução

◆ Diagrama P - v e trabalho.



Processo a v constante



$$W_{1-3} = (P_3 + P_2)(v_3 - v_2) / 2 = 175 \text{ kJ}$$

Exercício 1: Solução

◆ Cálculo do calor

Aplicando a 1ª Lei para o sistema, considerando sistema estacionário a variação da energia potencial desprezível em face da variação da energia interna:

$$U_3 - U_1 = Q_{1-3} - W_{1-3}$$

$$Q_{1-3} = m(u_3 - u_1) + W_{1-3}$$

$$Q_{1-3} = 1(3300,2 - 1033,5) + 175$$

$$Q_{1-3} = 2442\text{kJ}$$



Exercício 1: Observações

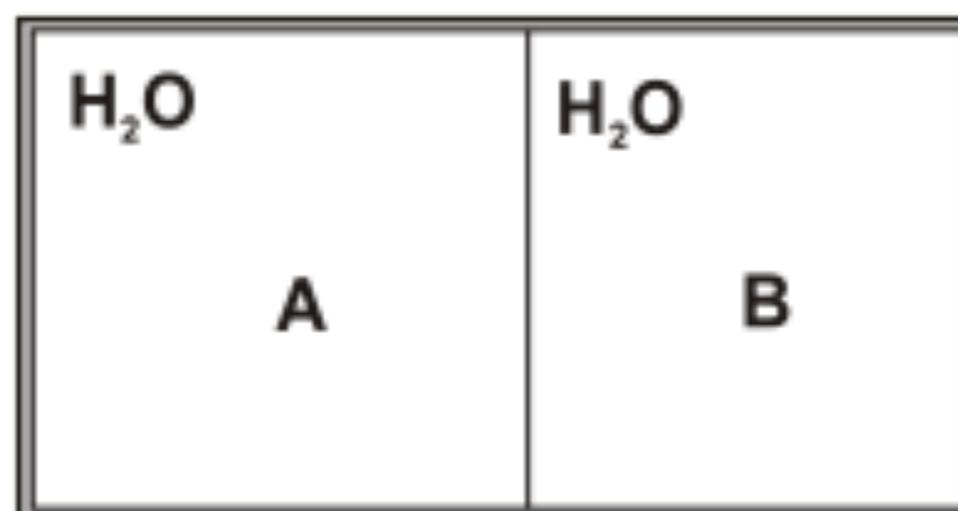
- ◆ O sinal do trabalho é positivo pois temos o sistema realizando trabalho sobre a vizinhança;
- ◆ O sinal do calor é positivo pois transferimos para o sistema.

Dúvidas?



Exercício 2:

Um tanque rígido está dividido em dois compartimentos por uma membrana. Ambos os lados contêm água. O compartimento A, com volume de 1 m^3 , está a 400 kPa e o fluido nele contido tem volume específico de $1 \text{ m}^3/\text{kg}$. O compartimento B contém $0,5 \text{ kg}$ de água a 100 kPa e $150 \text{ }^\circ\text{C}$. A membrana rompe, ocorrendo transferência de calor com o ambiente até que a água contida no tanque atinja uma temperatura uniforme de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Pede-se para determinar o calor transferido entre o fluido no tanque e o ambiente.





Exercício 2: Solução

Hipóteses:

1. O sistema é a água contida no conjunto;
2. O trabalho de rompimento da membrana é nulo;
3. Os estados 1 e 2 são estados de equilíbrio;
4. Variação desprezível da energia potencial;
5. Sistema estacionário.



Exercício 2: Solução

◆ **Estado 1 / Volume A:** Definido, pois conhecemos v e P .

$$v_{A1} = 1 \text{ m}^3/\text{kg} \quad P_{A1} = 400 \text{ kPa}$$

Da tabela de saturação $T_{sat} = 143,63^\circ\text{C}$ e $v_v = 0,4265 \text{ m}^3/\text{kg}$. Como $v_{A1} > v_v$, temos **vapor superaquecido**.

Da tabela de vapor superaquecido com $P = 400 \text{ kPa}$ e $v = 1,0056 \text{ m}^3/\text{kg}$, temos $T_{A1} = 600^\circ\text{C}$ e $u_{A1} = 3300,2 \text{ kJ/kg}$.

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)
$P = 200 \text{ kPa (120,23)}$				$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				$P = 400 \text{ kPa (143,63)}$				
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	8,5882	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



Exercício 2: Solução

◆ **Estado 1 / Volume B:** Definido, pois conhecemos T e P .

$$T_{B1} = 150^\circ\text{C} \quad P_{B1} = 100 \text{ kPa}$$

Da tabela de saturação: $T_{B1} > T_{sat}$ a 100 kPa \Rightarrow temos **vapor superaquecido**.

Da tabela de vapor superaquecido:

$$v_{B1} = 1,9364 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ e } u_{B1} = 2582,7 \text{ kJ/kg}.$$

Calculamos então $m_{A1} = 1 \text{ kg}$ e $V_{B1} = 0,9682 \text{ m}^3$.



Exercício 2: Solução

◆ **Estado 2:** Definido, pois conhecemos T e v .

$$T_2 = 100^\circ\text{C} \quad v_2 = 1,9682 / 1,5 = 1,31 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Da tabela de saturação:

$$T_2 = 100^\circ\text{C} (P_{sat} = 101,35 \text{ kPa}) \Rightarrow v_l = 0,001044 \text{ e } v_v = 1,6729 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Como $v_l < v_2 < v_v$, temos **líquido + vapor**. Logo $P_2 = P_{sat}$.

Aproveitamos a oportunidade para buscar na tabela $u_l = 418,91$ e $u_v = 2506,5 \text{ kJ/kg}$.

O título pode ser prontamente calculado: $x_2 = (v_2 - v_l) / (v_v - v_l) = 0,784$

E a energia interna da mistura é por $u_2 = (1 - x_2)u_l + x_2u_v = 2055,6 \text{ kJ/kg}$



Exercício 2: Solução

◆ Cálculo do calor

Aplicando a 1ª Lei para o sistema A + B:

$$U_2 - (U_{A1} + U_{B1}) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$Q_{1-2} = m_2 u_2 - m_{A1} u_{A1} - m_{B1} u_{B1}$$

$$Q_{1-2} = -1508 \text{ kJ}$$



Exercício 2

Dúvidas?



Exercícios

Exercício 3:

Um sistema composto por um gás opera segundo um ciclo motor composto por três processos:

Processo 1-2: processo a volume constante ($V = 0,028 \text{ m}^3$) e

$$U_2 - U_1 = 26,4 \text{ kJ}$$

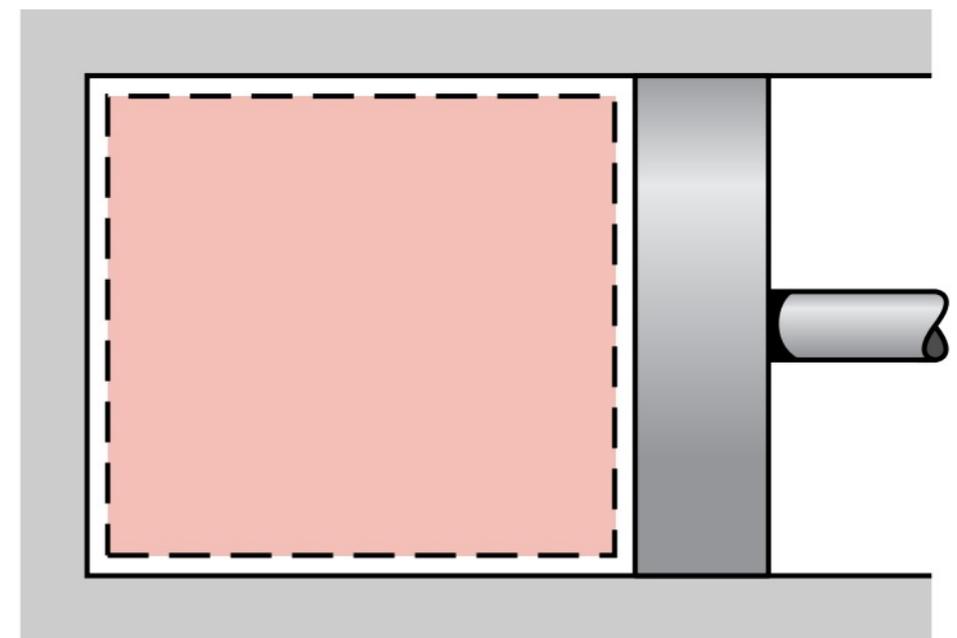
Processo 2-3: expansão a $PV = \text{constante}$ e $U_3 = U_2$

Processo 3-1: compressão a pressão constante ($P = 1,4 \text{ bar}$) e

$$W_{3-1} = -10,5 \text{ kJ}$$

Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial (a) esboce o ciclo em um diagrama $P-v$, (b) determine o trabalho líquido do ciclo, e (c) a troca de calor nos processos

2-3 e 3-1.





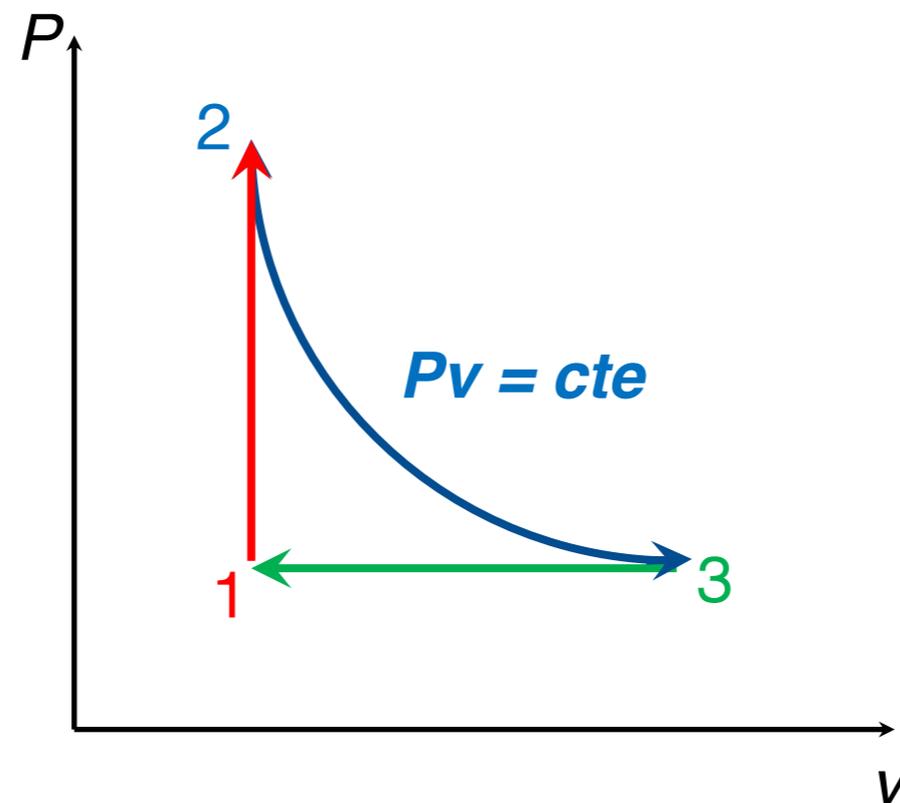
Exercício 3: Solução

Hipóteses:

1. O sistema é o gás;
2. variação desprezível das energias cinética e potencial;
3. A variação de volume é devida apenas ao trabalho.

Exercício 3: Solução

(a) A partir das informações sobre os processos que compõem o ciclo, temos:





Exercício 3: Solução

(b) O trabalho líquido do ciclo é dado por:

$$W_{ciclo} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-1}$$

O trabalho no processo 3-1 é conhecido, e no processo 1-2 o trabalho é nulo pois $V = \text{constante}$. Assim basta determinar o trabalho no processo 2-3 para determinar o trabalho líquido:

$$W_{2-3} = \int_2^3 p dV = \int_2^3 \frac{C}{V} dV = \frac{C}{V} \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right) = p_3 V_3 \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)$$

Exercício 3: Solução

Para o processo 1-2, como o volume é constante temos que $V_2 = V_1 = 0,028\text{m}_3$. Assim, para calcular o trabalho no processo 2-3 é preciso determinar V_3 . A partir do processo 3-1 sabemos que:

$$W_{3-1} = \int_3^1 P dV = P_3 (V_1 - V_3) \Rightarrow V_3 = V_1 - \frac{W_{3-1}}{P}$$

$$V_3 = 0,028 - \frac{-10,5 \times 10^3}{1,4 \times 10^5} = 0,103\text{m}^3$$

$$\therefore W_{2-3} = 1,4 \times 10^5 \cdot 0,0103 \cdot \ln(0,0103/0,028) = 18,78\text{kJ}$$



Exercício 3: Solução

Conhecido V_3 temos:

$$W_{2-3} = 1,4 \times 10^5 \cdot 0,0103 \cdot \ln(0,0103/0,028) = 18,78 \text{kJ}$$

E assim:

$$W_{ciclo} = 0 + 18,78 + (-10,5) = 8,28 \text{kJ}$$

Observação: como o trabalho líquido é positivo o sistema está fornecendo trabalho para o meio externo, e portanto o ciclo é um ciclo motor.



Exercício 3: Solução

c) A troca de calor no processo 2-3 pode ser determinada a partir da 1ª Lei:

$$Q_{2-3} - W_{2-3} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

$$Q_{2-3} = W_{2-3} = 18,78\text{kJ}$$

Da mesma forma para o processo 3-1, assumindo $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$:

$$Q_{3-1} - W_{3-1} = U_1 - U_3$$



Exercício 3: Solução

Como ainda não sabemos o valor de $(U_1 - U_3)$ precisamos lembrar que, para um ciclo temos que:

$$\Sigma \Delta U = (U_2 - U_1) + (U_3 - U_2) + (U_1 - U_3) = 0$$

$$(U_1 - U_3) = -26,4 - 0 = -26,4 \text{kJ}$$

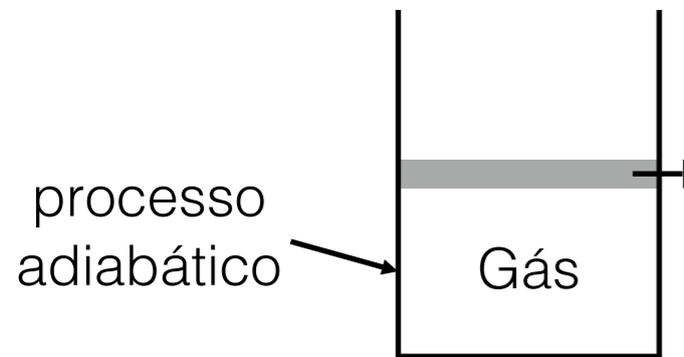
Substituindo o valor de W_{3-1} e $(U_1 - U_3)$:

$$Q_{3-1} = -26,4 + (-10,5) = -36,9 \text{kJ}$$

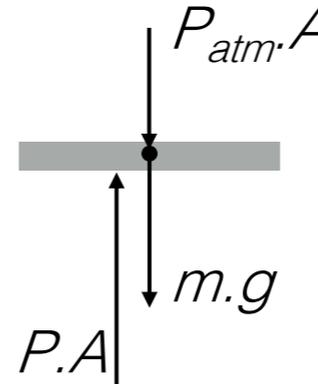
Extra: demonstração $PV^k = cte$



Considere um gás contido em um conjunto cilindro-pistão:



pistão:



$$ma = (P - P_{atm})A - mg$$

1ª lei para gás na forma diferencial (calores específicos constantes):

$$dU = \delta Q - \delta W$$

$$\Rightarrow dU = -\delta W$$

$$\Rightarrow mc_v dT = -PdV$$

Processo
Adiabático

Processo
Quase-estático



Extra: demonstração $PV^k = \text{cte}$

1ª lei para gás na forma diferencial:

$$mc_v d\left(\frac{PV}{mR}\right) = -PdV \Rightarrow \frac{mc_v}{mR} d(PV) = -PdV$$

$$\frac{c_v}{R} d(PV) = -PdV \Rightarrow d(PV) = -\left(\frac{c_p - c_v}{c_v}\right) PdV \Rightarrow d(PV) = (1 - k)PdV$$

$$VdP + PdV = (1 - k)PdV \Rightarrow VdP = -kPdV \Rightarrow \frac{dP}{P} = -k \frac{dV}{V}$$

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = -k \int_1^2 \frac{dV}{V} \Rightarrow P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

Portanto, a partir da 1ª lei verificamos que um processo adiabático e quase-estático de um gás perfeito com calores específicos constantes é um caso particular de processo politrópico com

$$\mathbf{n = k = c_p / c_v}$$