



Universidade de São Paulo
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos

ZEA0361 - FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
1º semestre - 2023

INTRODUÇÃO AOS BALANÇOS DE ENERGIA

ANÁLISE DE SISTEMAS FECHADOS

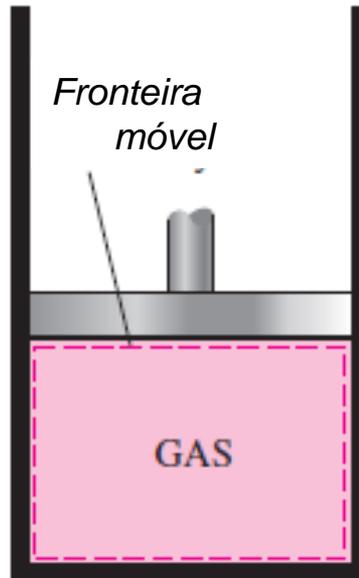
Aula 13

Prof^ª Ivana M. G. de Andrade

Vamos falar um pouco sobre o trabalho de fronteira (W_f):

É uma forma de trabalho mecânico muito comum que está relacionada com a expansão e compressão de um gás num dispositivo de cilindro-êmbolo.

Durante este processo, parte da fronteira se move, então o trabalho de expansão e compressão se chama **TRABALHO DE FRONTEIRA MÓVEL.**



Trabalho de fronteira

O pistão se move à uma distância ds , então, a *quantidade diferencial de trabalho feito pelo sistema será:*

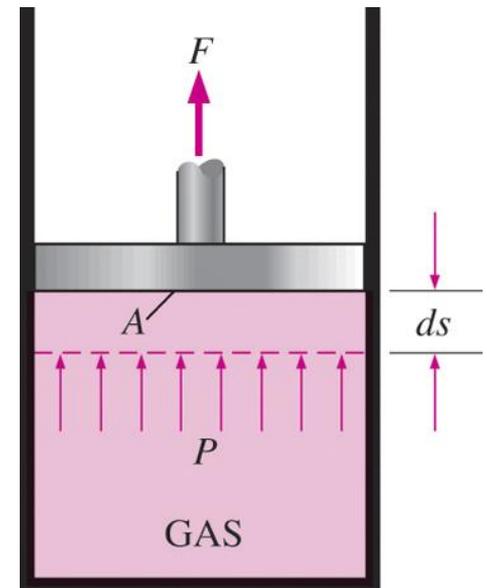
$$dW = Fds$$

Mas $P = F/A$

$$dW = PAds = PdV$$

Se o deslocamento se dá de 1 para 2:

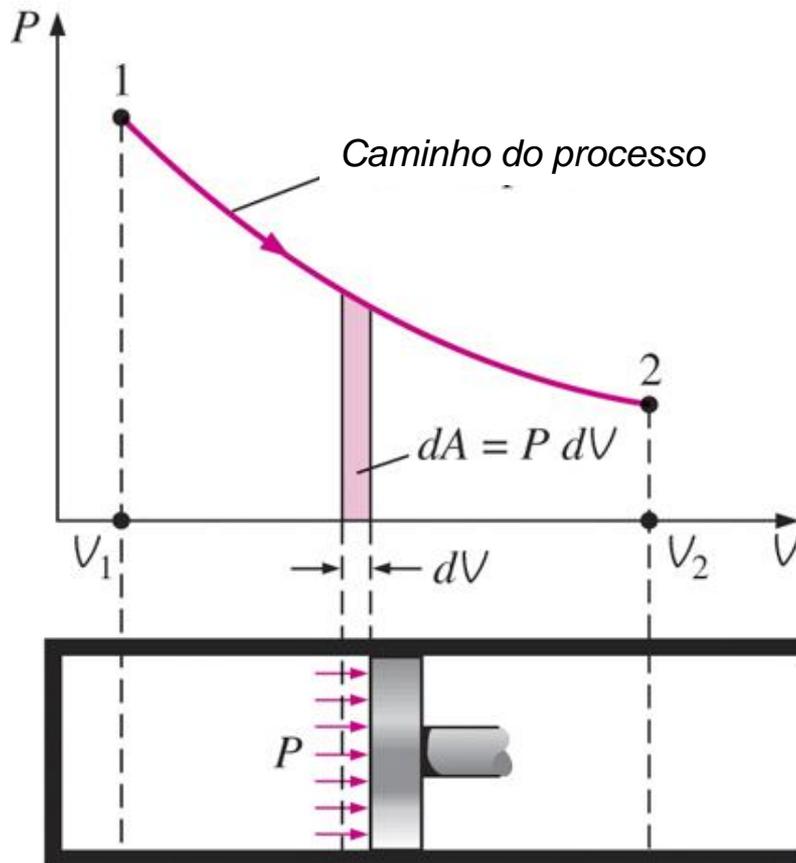
$$W_{1-2} = \int_1^2 PdV$$



Trabalho de fronteira

O processo de expansão descrito apresentado em um diagrama P - V mostra que a área diferencial dA é igual à PdV , que é o trabalho diferencial.

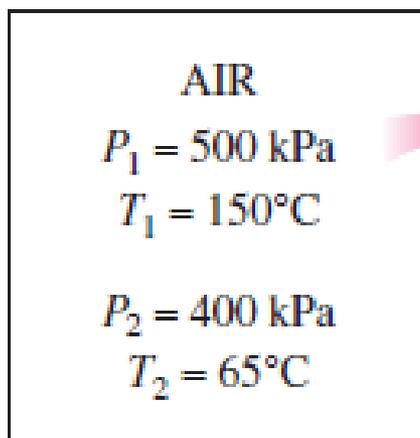
A área total é a soma das áreas diferenciais.



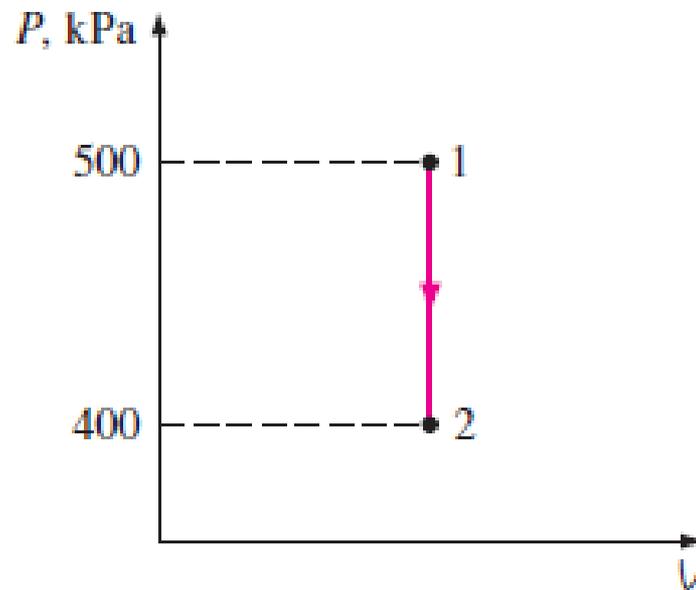
$$\text{Área} = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 P dV$$

Exemplo 1:

Um tanque rígido contém ar a 500 kPa e 150° c. como resultado da transferência de calor para as vizinhanças, a temperatura e a pressão interna do tanque caem para 65° c e 400 kPa. qual o trabalho realizado durante esse processo?

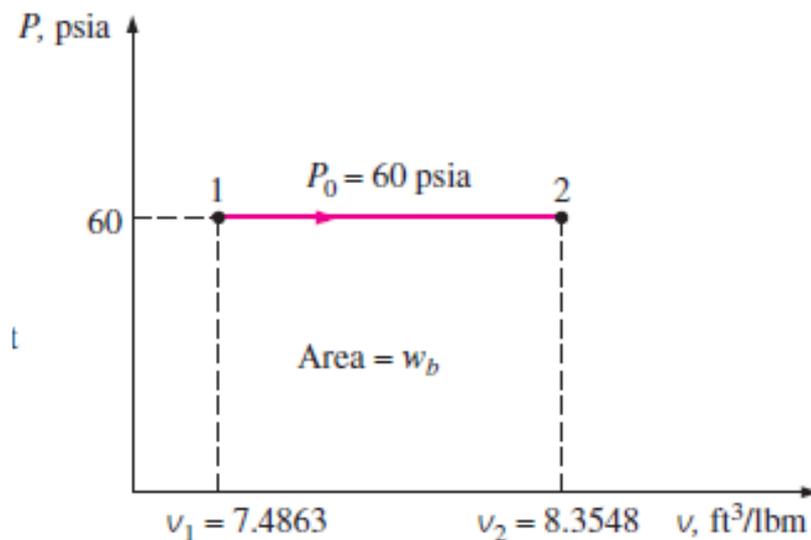
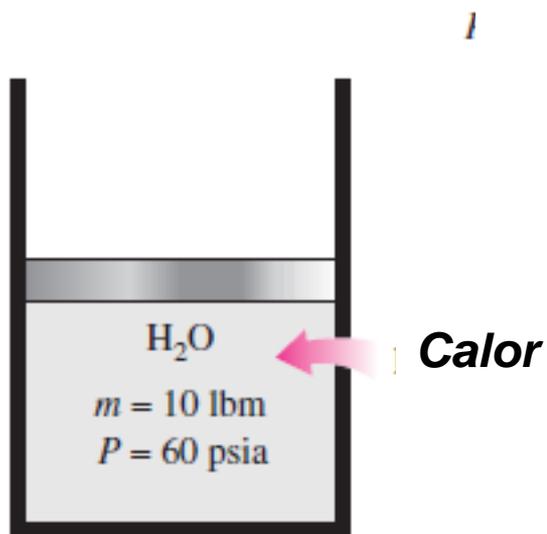


Calor



Exemplo 2:

Um arranjo cilindro-pistão sem atrito contém 10 lbm de vapor d'água a 60 psia e 320° F. Calor é transferido para o vapor até que a sua temperatura atinja 400° F. Considerando que o pistão não esteja preso a um eixo e sua massa seja constante, determine o trabalho realizado pelo vapor durante o processo.



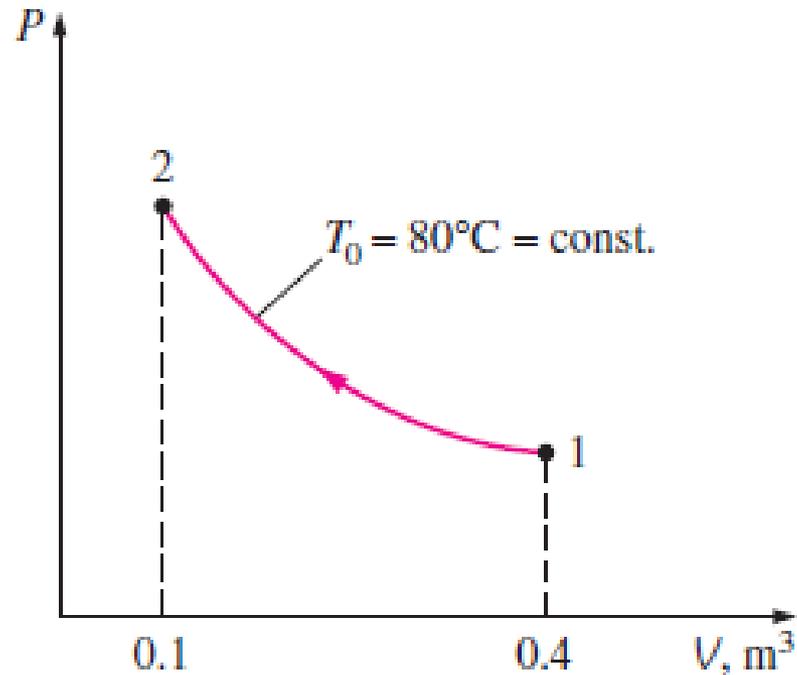
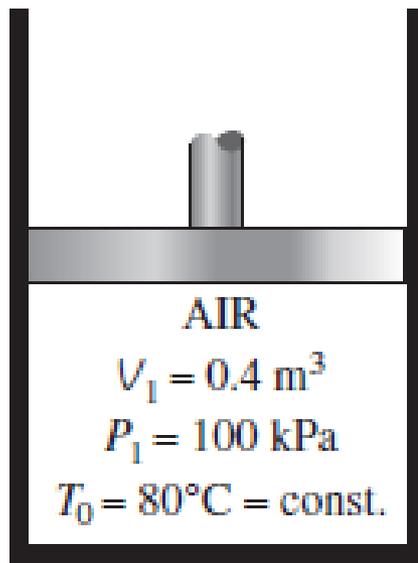
Vapor de agua sobrecalentado

T °F	v ft ³ /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/ lbm · R	v ft ³ /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/ lbm · R	v ft ³ /lbm	u Btu/lbm	h Btu/lbm	s Btu/ lbm · R
Sat.	7.1766	1098.1	1177.8	1.6442	5.4733	1102.3	1183.4	1.6212	4.4327	1105.5	1187.5	1.6032
320	7.4863	1109.6	1192.7	1.6636	5.5440	1105.9	1187.9	1.6271				
360	7.9259	1125.5	1213.5	1.6897	5.8876	1122.7	1209.9	1.6545	4.6628	1119.8	1206.1	1.6263
400	8.3548	1140.9	1233.7	1.7138	6.2187	1138.7	1230.8	1.6794	4.9359	1136.4	1227.8	1.6521
440	8.7766	1156.1	1253.6	1.7364	6.5420	1154.3	1251.2	1.7026	5.2006	1152.4	1248.7	1.6759
500	9.4005	1178.8	1283.1	1.7682	7.0177	1177.3	1281.2	1.7350	5.5876	1175.9	1279.3	1.7088
600	10.4256	1216.5	1332.2	1.8168	7.7951	1215.4	1330.8	1.7841	6.2167	1214.4	1329.4	1.7586
700	11.4401	1254.5	1381.6	1.8613	8.5616	1253.8	1380.5	1.8289	6.8344	1253.0	1379.5	1.8037
800	12.4484	1293.3	1431.5	1.9026	9.3218	1292.6	1430.6	1.8704	7.4457	1292.0	1429.8	1.8453
1000	14.4543	1373.0	1533.5	1.9777	10.8313	1372.6	1532.9	1.9457	8.6575	1372.2	1532.4	1.9208
1200	16.4525	1456.2	1638.9	2.0454	12.3331	1455.9	1638.5	2.0135	9.8615	1455.6	1638.1	1.9887
1400	18.4464	1543.0	1747.8	2.1073	13.8306	1542.8	1747.5	2.0755	11.0612	1542.6	1747.2	2.0508
1600	20.438	1633.5	1860.5	2.1648	15.3257	1633.3	1860.2	2.1330	12.2584	1633.2	1860.0	2.1083
1800	22.428	1727.6	1976.6	2.2187	16.8192	1727.5	1976.5	2.1869	13.4541	1727.3	1976.3	2.1622
2000	24.417	1825.2	2096.3	2.2694	18.3117	1825.0	2096.1	2.2376	14.6487	1824.9	2096.0	2.2130

* La temperatura entre paréntesis es la temperatura de saturación a la presión especificada.

Exemplo 3:

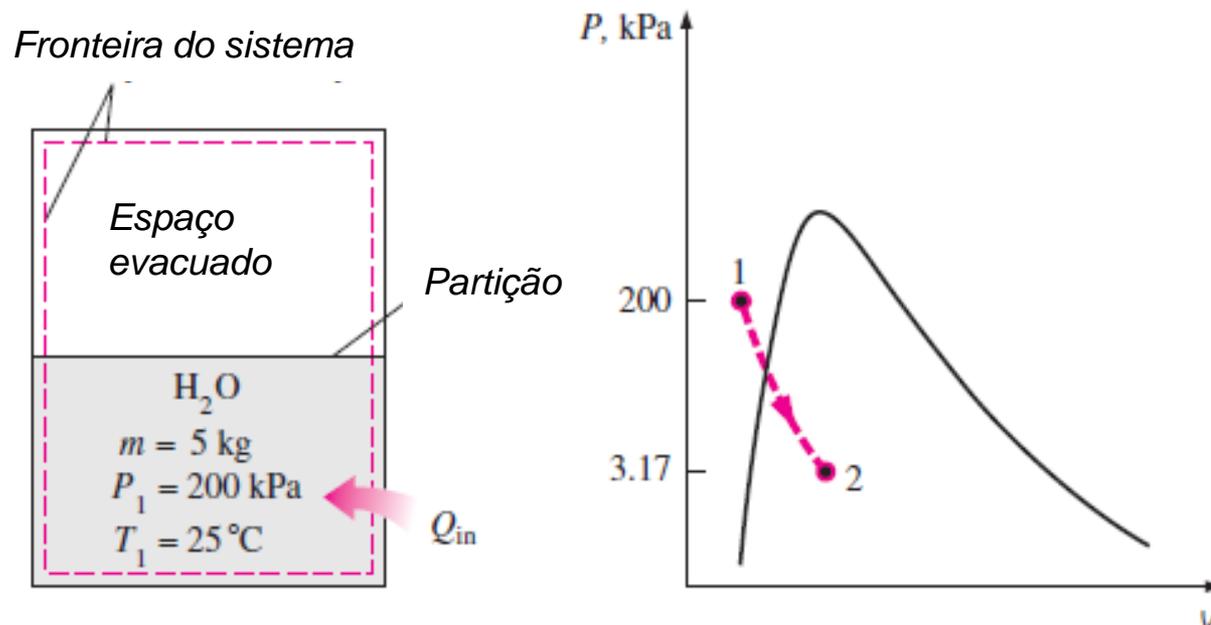
Um arranjo cilindro-pistão contém $0,4 \text{ m}^3$ de ar a 100 kPa e 80°C . O ar é então comprimido para $0,1 \text{ m}^3$ de tal maneira que a temperatura do cilindro permaneça constante. Qual o trabalho realizado durante o processo?



Exemplo 4:

Um tanque rígido está dividido em 2 partes iguais por uma partição. Inicialmente, um lado do tanque contém 5 kg de água a 200 kPa e 25° C, e o outro lado está vazio. A partição é removida, e a água se expande ocupando todo o tanque. Suponha que a água troque calor com as vizinhanças até que a temperatura no tanque retorne ao valor inicial de 25° C. Determine:

- O volume do tanque
- A pressão final do tanque
- A transferência de calor no processo



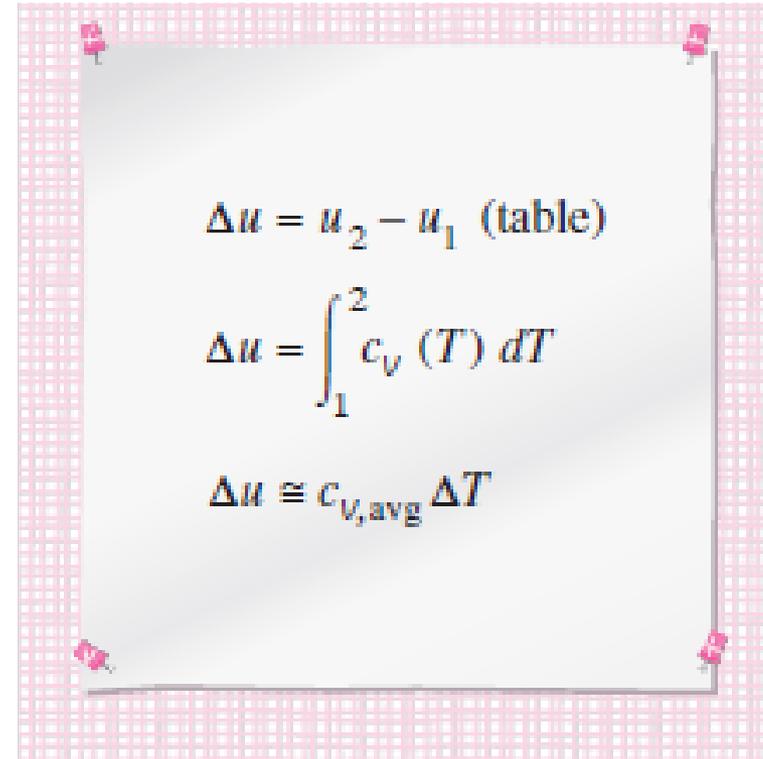
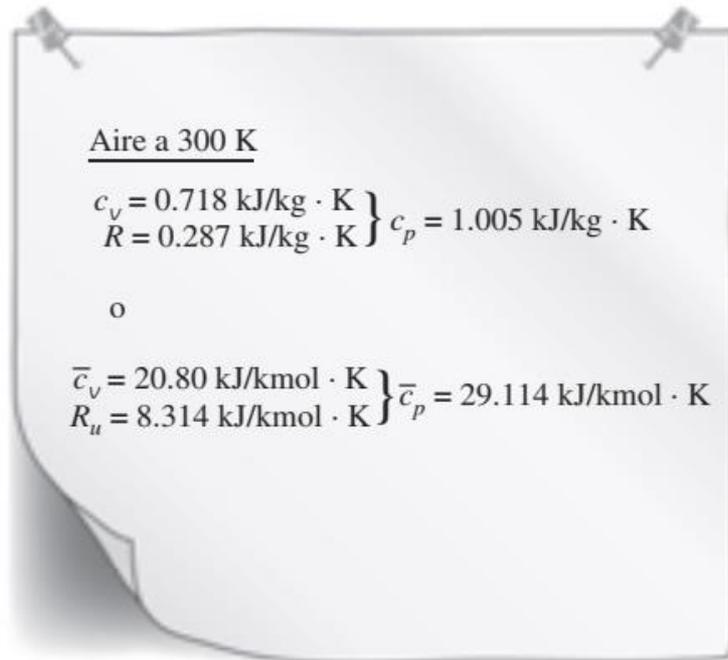
Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633

Exemplo 5:

Ar a 300 K e 200 kPa é aquecido a pressão constante até 600 K. Determine a variação de energia interna do gás por unidade de massa, usando:

- Dados tabelados
- Forma funcional do calor específico
- Valor médio do calor específico.



Exemplo 5:

a) *Dados tabelados*

*Considerando o gás como um gás ideal
(temperatura alta e baixa pressão)*

*Pela tabela de propriedades de gás ideal do ar
(próximo slide):*

$$u_1 = u_{a\ 300\text{ K}} = 214.07\text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = u_{a\ 600\text{ K}} = 434.78\text{ kJ/kg}$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (434.78 - 214.07)\text{ kJ/kg} = 220.71\text{ kJ/kg}$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 \text{ (table)}$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$\Delta u \cong c_{v,\text{avg}} \Delta T$$

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280

Exemplo 5:

b) Forma funcional do calor específico

Para o ar, temos como calcular o valor de c_p , mas não de c_v .

Porém, as duas propriedades se relacionam da seguinte maneira:

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p - R_u$$

O valor de c_p é calculado pela equação abaixo (base molar):

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 \text{ (table)}$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$\Delta u \cong c_{v,avg} \Delta T$$

Aire a 300 K

$$\left. \begin{array}{l} c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right\} c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

o

$$\left. \begin{array}{l} \bar{c}_v = 20.80 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \end{array} \right\} \bar{c}_p = 29.114 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

Exemplo 5:

b) Forma funcional do calor específico

Os valores de a , b , c e d são:

$$a = 28.11, \quad b = 0.1967 \times 10^{-2}, \quad c = 0.4802 \times 10^{-5},$$

$$d = -1.966 \times 10^{-9}$$

Logo:

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p - R_u = (a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3$$

Pela expressão acima:

$$\Delta \bar{u} = \int_1^2 \bar{c}_v(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} [(a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3] dT$$

Em que $T_1 = 300 \text{ K}$ e $T_2 = 600 \text{ K}$ e $R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$

$$\Delta u = u_2 - u_1 \text{ (table)}$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$\Delta u \cong c_{v,\text{avg}} \Delta T$$

Exemplo 5:

b) Forma funcional do calor específico

Resolvendo a integral e substituindo os valores de a , b , c , d e Ru , teremos:

$$\Delta \bar{u} = 6\,447 \text{ kJ/kmol}$$

O resultado acima está em base molar (kmol). Para transformar para base mássica, devemos dividir pela massa molar do ar:

$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{u}}{M} = \frac{6\,447 \text{ kJ/kmol}}{28.97 \text{ kg/kmol}} = 222.5 \text{ kJ/kg}$$

Este resultado é bem próximo ao do item a!

$$\Delta u = u_2 - u_1 \text{ (table)}$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$\Delta u \cong c_{v,\text{avg}} \Delta T$$

Exemplo 5:

c) Valor médio do calor específico.

O valor médio do calor específico ($c_{v,médio}$), é aquele que corresponde à Temperatura média, entre 300 e 600 K.

A temperatura média é calculada da seguinte forma:

$$(T_1 + T_2)/2 = 450 \text{ K}$$

Pela tabela com os valores de c_v do ar (próximo slide), temos:

$$c_{v \text{ a } 450 \text{ K}} = 0.733 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Logo:

$$\begin{aligned} \Delta u &= c_{v,médio} \cdot (T_2 - T_1) \\ &= (0.733 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(600 - 300)\text{K}] = 220 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Que difere um pouco mais do valor tabelado (item a).

$$\Delta u = u_2 - u_1 \text{ (table)}$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$\Delta u \cong c_{v,avg} \Delta T$$

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases (*Continued*)

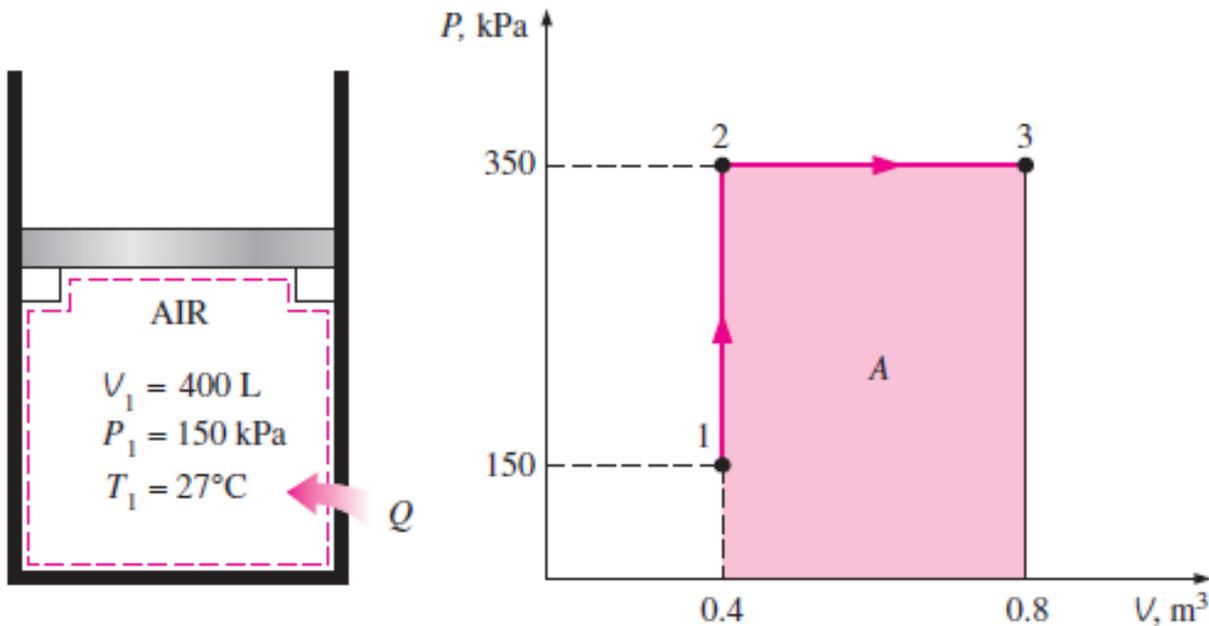
(b) At various temperatures

Temperature, K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
	<i>Air</i>			<i>Carbon dioxide, CO₂</i>			<i>Carbon monoxide, CO</i>		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335

Exemplo 6:

Um arranjo cilindro-pistão inicialmente a 150 kPa e 27° C contém 400 L de ar. A massa do pistão é tal que é necessário 350 kPa para movê-lo. O ar é então aquecido até que seu volume dobre. Determine:

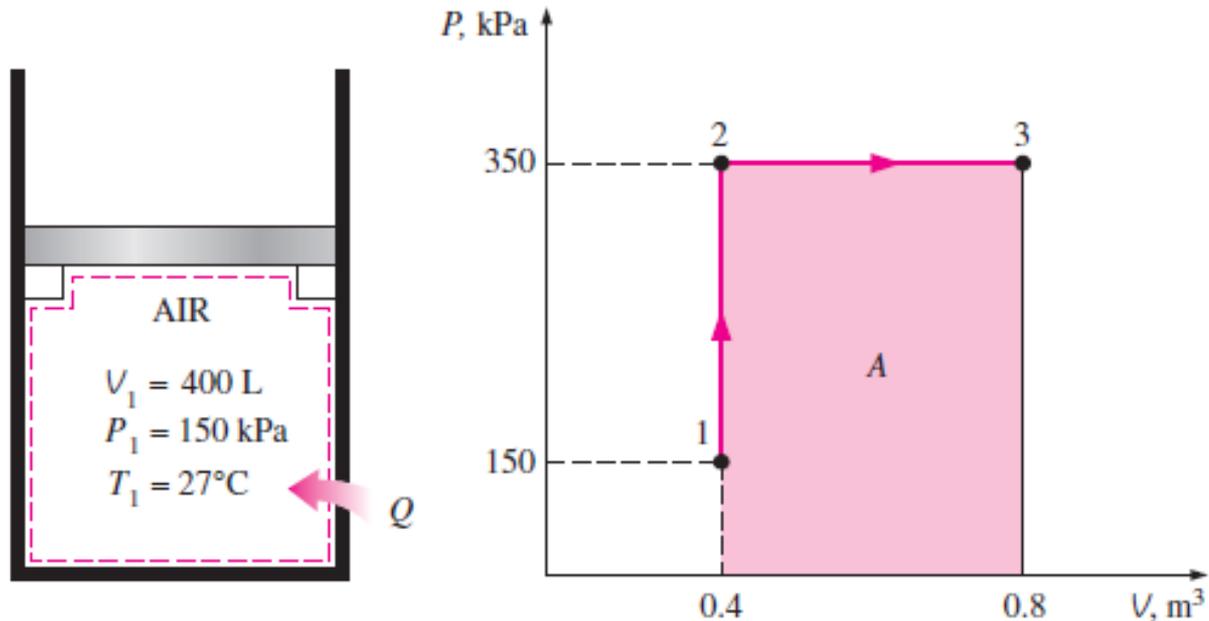
- Temperatura final
- Trabalho realizado pelo ar
- Calor transferido para o ar



Exemplo 6:

Suposições:

- 1 O ar é um gás ideal porque está em alta temperatura e baixa pressão em relação aos seus valores de ponto crítico.
- 2 O sistema é estacionário; portanto, as mudanças na energia cinética e potencial são zero.
- 3 O volume permanece constante até que o pistão comece a se mover, então a pressão permanece constante durante o processo.



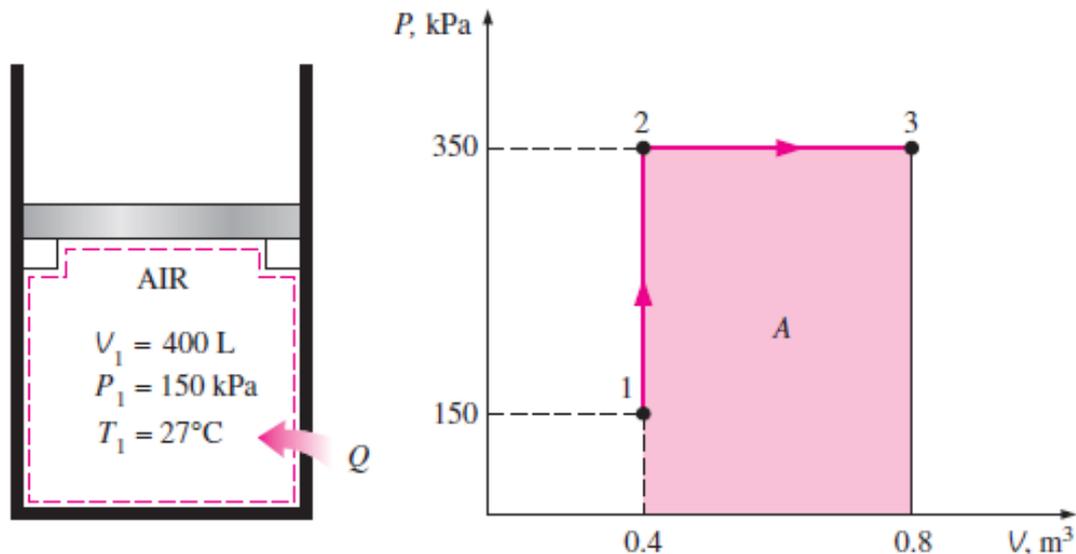
Exemplo 6:

a) Temperatura final

A temperatura final é facilmente determinada por meio da relação de gás ideal entre os estados 1 e 3 da seguinte maneira:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \longrightarrow \frac{(150 \text{ kPa})(V_1)}{300 \text{ K}} = \frac{(350 \text{ kPa})(2V_1)}{T_3}$$

$$\mathbf{T_3 = 1400 \text{ K}}$$



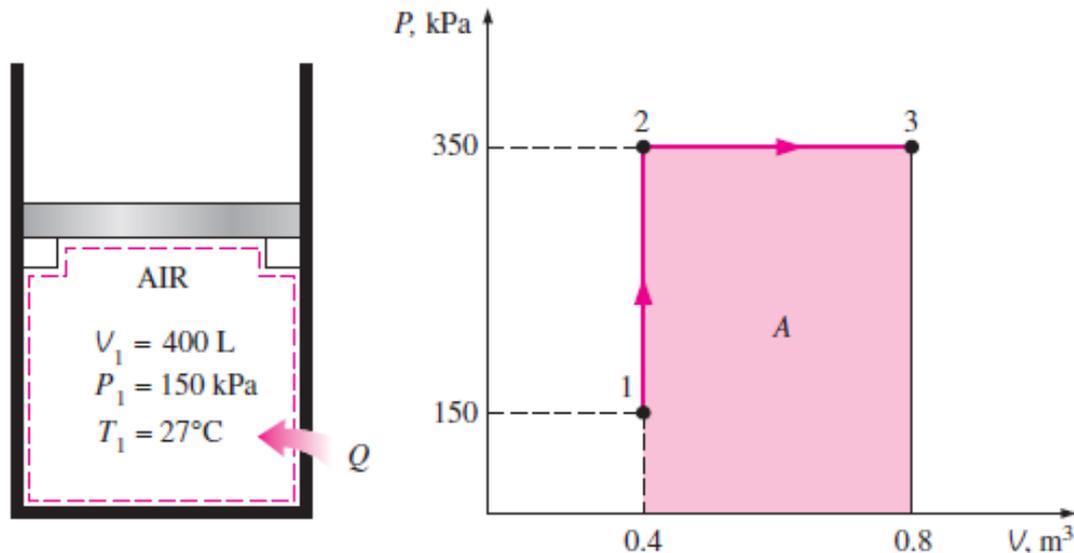
Exemplo 6:

b) O trabalho realizado pelo ar:

O trabalho realizado poderia ser determinado pela integração, mas neste caso é muito mais fácil fazê-lo a partir da área sob a curva do processo, em um diagrama P - V , que é mostrado na Figura:

$$A = (V_2 - V_1)P_2 = (0.4 \text{ m}^3)(350 \text{ kPa}) = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa}$$

$$W_{13} = 140 \text{ kJ}$$



Exemplo 6:

c) O calor transferido para o ar:

Sob as hipóteses e observações consideradas, o balanço de energia no sistema entre os estados inicial e final (processo 1-3) pode ser expresso como:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

$$Q_{\text{entrada}} - W_{b,\text{salida}} = \Delta U = m(u_3 - u_1)$$

A massa é determinada pela relação do gás ideal (a massa é constante):

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(150 \text{ kPa}) (0.4 \text{ m}^3)}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}) (300 \text{ K})} = 0.697 \text{ kg}$$

Exemplo 6:

c) O calor transferido para o ar:

As energias internas são determinadas pelas tabelas termodinâmicas para o ar (próximo slide):

$$u_1 = u_{a\ 300\text{ K}} = 214.07\text{ kJ/kg}$$

$$u_3 = u_{a\ 1\ 400\text{ K}} = 1\ 113.52\text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{entrada}} - 140\text{ kJ} = (0.697\text{ kg})[(1\ 113.52 - 214.07)\text{ kJ/kg}]$$

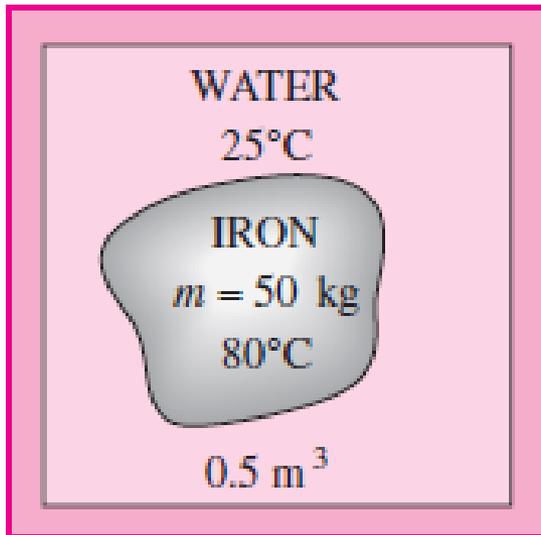
$$Q_{\text{entrada}} = 767\text{ kJ}$$

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829

Exemplo 7:

Um bloco de ferro de 50 kg é mergulhado em um tanque termicamente isolado contendo 0,5 m³ de água líquida a 25° C. Determine a temperatura quando o equilíbrio térmico é atingido.



Exemplo 7:

Hipóteses:

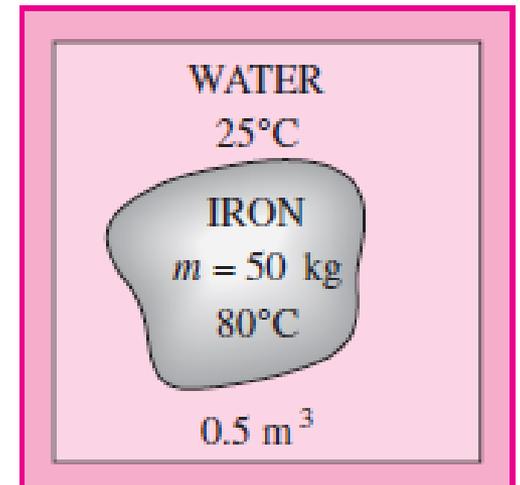
- 1 Tanto a água quanto o bloco de ferro são substâncias incompressíveis.
- 2 Para água e ferro, calores específicos constantes à temperatura ambiente podem ser usados.
- 3 O sistema é estacionário, portanto as mudanças na energia cinética e potencial são zero.
- 4 O sistema está bem isolado; conseqüentemente, não há transferência de calor.

A análise do sistema permite concluir que:

- O sistema é fechado, pois não há fluxo de massa.
- O tanque é rígido, portanto, não ocorre trabalho de fronteira ($W=0$).

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

$$0 = \Delta U$$



Exemplo 7:

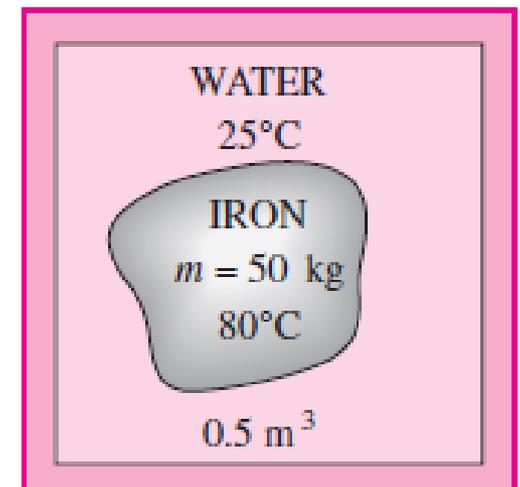
A energia interna total U é uma propriedade extensiva, portanto pode ser expressa como a soma das energias internas das partes do sistema. Então a variação total da energia interna do sistema é:

$$\Delta U_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{Ferro}} + \Delta U_{\text{agua}} = 0$$
$$[mc(T_2 - T_1)]_{\text{Ferro}} + [mc(T_2 - T_1)]_{\text{agua}} = 0$$

O volume específico da água saturada para $T = 25^\circ\text{C}$ é $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ (tabela de água saturada)

$$m_{\text{agua}} = \frac{V}{v} = \frac{0.5 \text{ m}^3}{0.001 \text{ m}^3/\text{kg}} = 500 \text{ kg}$$

V = volume total e v = volume específico



Exemplo 7:

Os valores de calor específico para a água e para o ferro são determinados através de tabelas:

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

a) Líquidos

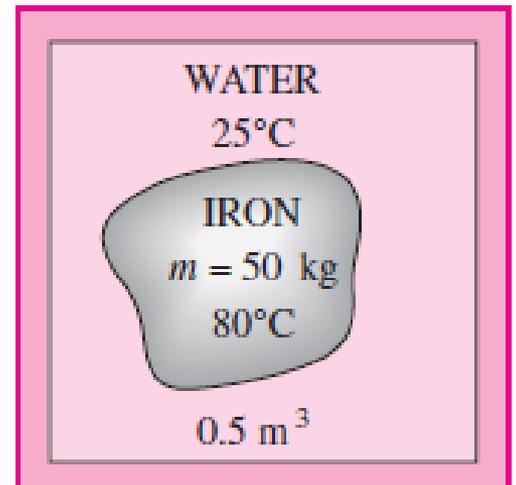
Sustancia	<u>Datos de ebullición a 1 atm</u>		<u>Datos de congelación</u>		<u>Propiedades de líquidos</u>		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1000	4.22
					25		4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22

Sustancia	Densidad, ρ kg/m ³	Calor específico, c_p kJ/kg · K
Metales		
Ferro	7,840	0.45

Exemplo 7:

Logo, a temperatura final será dada por:

$$(50 \text{ kg})(0.45 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(T_2 - 80 ^\circ\text{C}) + (500 \text{ kg})(4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(T_2 - 25 ^\circ\text{C}) = 0$$
$$T_2 = \mathbf{25.6 ^\circ\text{C}}$$



1. Cálculo do calor específico (Cp), kJ/(kg°C):

Modelo matemático 1 (Siebel, 1892): $C_p = 0,837 + 3,349A$

Modelo matemático 2 (Heldman e Singh, 1981): $C_p = 1,424G + 1,549P + 1,675L + 0,837C + 4,187A$

Modelo matemático 3 (Choi e Okos, 1986): $C_p = \sum C_{pi} * X_i$

Cálculo do c_p por componente (apenas para o modelo matemático 3):

c_p (kJ/kg°C)	Protein	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
	Fat	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
	Carbohydrate	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
	Fiber	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$
	Ash	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$
	Water ^a	$c_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$
	Water ^b	$c_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$
	Ice	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$

^a For the temperature range of -40 to 0°C.

^b For the temperature range of 0 to 150°C.