



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

(LEGM, MEC)

2013-2014

Problemas – Aula 5

Carlos Augusto Santos Silva  
[carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt](mailto:carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt)

Versão 1.0  
29-3-2014

## Princípio de máxima entropia

### Problema 1

Um sistema cilindro-pistão contém vapor saturado de água à pressão atmosférica. Durante um processo a pressão constante, o sistema liberta 600kJ de calor para o exterior, que está à temperatura de 25°C. Como resultado, parte do vapor de água é condensado.

- Determine a variação de entropia da água
- Determine a variação de entropia do ar no exterior
- Indique se o processo é reversível ou irreversível

### Problema 2

Um reservatório térmico A a 800K perde 2000 kJ de calor para um reservatório térmico B a uma temperatura inferior.

- Calcule a variação de entropia total no caso do reservatório B estar a 500 K.
- Calcule a variação de entropia total no caso do reservatório B estar a 750 K.
- Qual dos processos é mais irreversível?

## Variações de entropia em substâncias puras

### Problema 3

Um tanque rígido contém 5kg de líquido refrigerante R134a que está a 40°C e a 2,4 bar. O refrigerante é arrefecido a volume constante, até ficar em vapor saturado. Calcule a variação de entropia no sistema.

### Problema 4

Em regime estacionário, o vapor de água entra numa turbina à pressão de 30 bar, com uma temperatura de 400°C e uma velocidade de 160m/s. À saída, temos vapor saturado a 100°C, a uma velocidade de 100m/s, produzindo 540 kJ/kg de trabalho. Considere que existe troca de calor entre a turbina e o exterior, com uma temperatura à superfície de 350 K e o exterior a 293 K. Calcule a taxa de geração de entropia da turbina, desprezando a variação de energia potencial do vapor na turbina.

**Soluções****Problema 1**

Solução:

- a) Para calcular a variação de entropia no sistema, temos de calcular um processo equivalente que seja internamente reversível. Assumindo que o processo é um processo isotérmico internamente reversível (por ocorrer na mudança de fase do vapor de água), podemos assumir que

$$\Delta S = \oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{int\ rever} \Leftrightarrow \Delta S = \frac{Q}{T}$$

Nesse caso:

$$\Delta S_{sistema} = \frac{Q_{sistema}}{T_{sistema}} = \frac{-600 \text{ kJ}}{(373,15)K} = -1,61 \text{ kJ/K}$$

$$b) \Delta S_{exterior} = \frac{Q_{ar}}{T_{ar}} = \frac{600 \text{ kJ}}{(298,15)K} = 2,01 \text{ kJ/K}$$

- c)  $\Delta S_{total} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{exterior} = 0,40 \text{ kJ/K}$ , logo o processo é irreversível ( $\Delta S_{total} > 0$ )

**Problema 2**

Solução:

- a) Assumindo que o processo para cada reservatório térmico é um processo isotérmico internamente reversível pois não envolve irreversibilidades com o exterior, podemos assumir que  $\Delta S = \frac{Q}{T}$

Nesse caso:

$$\Delta S_A = \frac{Q_A}{T_A} = \frac{-2000 \text{ kJ}}{800K} = -2,5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_B = \frac{Q_B}{T_B} = \frac{+2000 \text{ kJ}}{500K} = 4,0 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_A + \Delta S_B = -2,5 + 4 = 1,5 \text{ kJ/K}$$

b)

$$\Delta S_A = \frac{Q_A}{T_A} = \frac{-2000 \text{ kJ}}{800K} = -2,5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_B = \frac{Q_B}{T_B} = \frac{+2000 \text{ kJ}}{750K} = 2,7 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_A + \Delta S_B = -2,5 + 2,7 = 0,2 \text{ kJ/K}$$

- c) Como a variação de entropia total na alínea b) é mais pequena, é menos irreversível, pois envolve variações de temperatura menor.

**Problema 3**

Solução:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1)$$

Da tabela de vapor sobreaquecido de R134a, podemos ver que para 40° e 2,4bar temos que  $s_1=1,0637$  kJ/kgK, e o volume específico de  $v_1=0.1$  m<sup>3</sup>/kg

Da tabela de vapor saturado, podemos ver que para o volume aproximado de  $v_2=0.1$  m<sup>3</sup>/kg ( $P=1,8$  bar), temos que  $s_{vs} = 0.9273$ .

$$\text{Finalmente, } \Delta S = m(s_2 - s_1) = 5 \times (0,9273 - 1,0637) = -0,6820 \text{ kJ/K}$$

**Problema 4**

Solução:

Em regime estacionário temos que

$$0 = \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{out} s_{out} + \dot{s}_{gen}$$

Assumindo que a temperatura na parede da turbina é constante (350K), então temos que

$$0 = \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{s}_{gen}$$

$$\frac{\dot{s}_{gen}}{\dot{m}} = -\frac{\dot{Q}_k/\dot{m}}{T_k} + (s_2 - s_1)$$

Da primeira lei da termodinâmica para sistemas abertos, temos que

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left( h_{out} - h_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) \right)$$

$$\frac{\dot{Q} - \dot{W}}{\dot{m}} = h_{out} - h_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2}$$

Da tabela de vapor saturado a 100°C (que está à pressão atmosférica) temos  $h_2=2675.6$  kJ/kg, e da tabela de vapor sobreaquecido a 400°C e 30 bar temos que  $h_1=3230.9$  kJ/kg, então

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + h_{out} - h_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} = 540 + (2675,6 - 3230,9) + \left( \frac{100^2 - 160^2}{2} \right) \times 10^{-3}$$

$$= 540 - 555,3 - 7,8 = -23,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Da tabela de vapor sobreaquecido  $s_1= 6.9212$  kJ/kg K, e da tabela de vapor saturado temos que  $s_2= 7.3549$  kJ/kgK, então

$$\frac{\dot{s}_{gen}}{\dot{m}} = \frac{-23,1}{350} + (7,3542 - 6,9212) = 0.499 \text{ kJ/kg K}$$

## Anexo

Tabela vapor de água saturado

Saturated water—Temperature table

Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P</i> <sub>sat</sub> kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> <sub>f</sub>	Sat. vapor, <i>v</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>u</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>u</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>u</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>h</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>h</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>h</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>s</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>s</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>s</i> <sub>g</sub>
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
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 20.0 \text{ bar} = 2.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 212.42^\circ\text{C}$ )				$p = 30.0 \text{ bar} = 3.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 233.90^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0850	2788.4	3043.4	6.6245
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

Tabela de R134a vapor saturado

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
0.6	-37.07	0.7097	0.3100	3.41	206.12	3.46	221.27	224.72	0.0147	0.9520	0.6
0.8	-31.21	0.7184	0.2366	10.41	209.46	10.47	217.92	228.39	0.0440	0.9447	0.8
1.0	-26.43	0.7258	0.1917	16.22	212.18	16.29	215.06	231.35	0.0678	0.9395	1.0
1.2	-22.36	0.7323	0.1614	21.23	214.50	21.32	212.54	233.86	0.0879	0.9354	1.2
1.4	-18.80	0.7381	0.1395	25.66	216.52	25.77	210.27	236.04	0.1055	0.9322	1.4
1.6	-15.62	0.7435	0.1229	29.66	218.32	29.78	208.19	237.97	0.1211	0.9295	1.6
1.8	-12.73	0.7485	0.1098	33.31	219.94	33.45	206.26	239.71	0.1352	0.9273	1.8
2.0	-10.09	0.7532	0.0993	36.69	221.43	36.84	204.46	241.30	0.1481	0.9253	2.0
2.4	-5.37	0.7618	0.0834	42.77	224.07	42.95	201.14	244.09	0.1710	0.9222	2.4
2.8	-1.23	0.7697	0.0719	48.18	226.38	48.39	198.13	246.52	0.1911	0.9197	2.8
3.2	2.48	0.7770	0.0632	53.06	228.43	53.31	195.35	248.66	0.2089	0.9177	3.2
3.6	5.84	0.7839	0.0564	57.54	230.28	57.82	192.76	250.58	0.2251	0.9160	3.6
4.0	8.93	0.7904	0.0509	61.69	231.97	62.00	190.32	252.32	0.2399	0.9145	4.0
5.0	15.74	0.8056	0.0409	70.93	235.64	71.33	184.74	256.07	0.2723	0.9117	5.0
6.0	21.58	0.8196	0.0341	78.99	238.74	79.48	179.71	259.19	0.2999	0.9097	6.0
7.0	26.72	0.8328	0.0292	86.19	241.42	86.78	175.07	261.85	0.3242	0.9080	7.0
8.0	31.33	0.8454	0.0255	92.75	243.78	93.42	170.73	264.15	0.3459	0.9066	8.0
9.0	35.53	0.8576	0.0226	98.79	245.88	99.56	166.62	266.18	0.3656	0.9054	9.0
10.0	39.39	0.8695	0.0202	104.42	247.77	105.29	162.68	267.97	0.3838	0.9043	10.0
12.0	46.32	0.8928	0.0166	114.69	251.03	115.76	155.23	270.99	0.4164	0.9023	12.0
14.0	52.43	0.9159	0.0140	123.98	253.74	125.26	148.14	273.40	0.4453	0.9003	14.0
16.0	57.92	0.9392	0.0121	132.52	256.00	134.02	141.31	275.33	0.4714	0.8982	16.0
18.0	62.91	0.9631	0.0105	140.49	257.88	142.22	134.60	276.83	0.4954	0.8959	18.0
20.0	67.49	0.9878	0.0093	148.02	259.41	149.99	127.95	277.94	0.5178	0.8934	20.0
25.0	77.59	1.0562	0.0069	165.48	261.84	168.12	111.06	279.17	0.5687	0.8854	25.0
30.0	86.22	1.1416	0.0053	181.88	262.16	185.30	92.71	278.01	0.6156	0.8735	30.0

Tabela de R134a vapor sobreaquecido

	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 2.4 \text{ bar} = 0.24 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = -5.37^\circ\text{C})$				
Sat.	0.08343	224.07	244.09	0.9222
-10				
0	0.08574	228.31	248.89	0.9399
10	0.08993	236.26	257.84	0.9721
20	0.09399	244.30	266.85	1.0034
30	0.09794	252.45	275.95	1.0339
40	0.10181	260.72	285.16	1.0637
50	0.10562	269.12	294.47	1.0930
60	0.10937	277.67	303.91	1.1218
70	0.11307	286.35	313.49	1.1501
80	0.11674	295.18	323.19	1.1780
90	0.12037	304.15	333.04	1.2055
100	0.12398	313.27	343.03	1.2326