

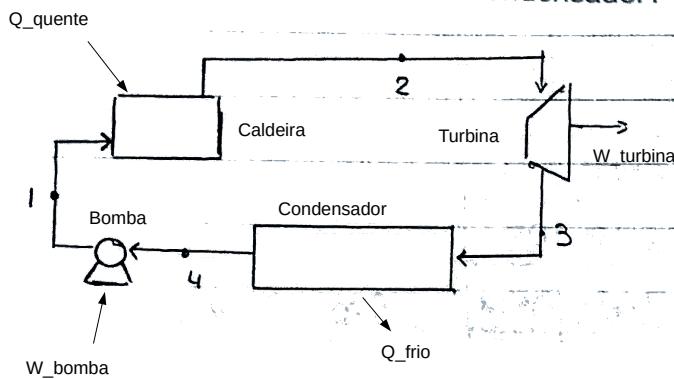
Resolução do Exemplo 8.1 do livro Smith, van Ness & Abbott, 7a. ed.

Iuri Segtovich. Aluno de doutorado no TPQB/Escola de Química.

Exemplo 8.1

Vapor d'água gerado em uma planta de potência, na pressão de 8.600 kPa e na temperatura de 500°C, é alimentado em uma turbina. Ao sair da turbina entra em um condensador a 10 kPa, onde ele é condensado, tornando-se líquido saturado, que é então bombeado para a caldeira.

- Qual é a eficiência térmica de um ciclo de Rankine operando nessas condições?
- Qual é a eficiência térmica de um ciclo real operando nessas condições, se as eficiências da turbina e da bomba forem iguais a 0,75?
- Se a potência do ciclo da parte (b) for igual a 80.000 kW, qual é a vazão de vapor e quais são as taxas de transferência de calor na caldeira e no condensador?



Representação do processo em fluxograma.

Resolução (a)

- Dados no enunciado:
Dada temperatura da corrente [2]: T_2 ,
Dada pressão da corrente [2]: P_2 ,
Dada pressão da corrente [3]: P_3 ,
Dada condição de saturação da corrente [4]: líquido saturado: L, SAT ∴ fração de vapor: $x_4^V = 0$.
- Dados T_2 e P_2 , ler propriedades da corrente [2] na tabela de propriedades de vapor superaquecido.
- Note que $T_2 > T_2^{SAT}$ ∴ corrente em condição de vapor superaquecido: V, SUP .
- Considere processo isentrópico na turbina: $S_3^T = S_2^T$.
- Dados P_3 e S_3^T , ler propriedades da corrente [3] na tabela de propriedades de vapor superaquecido.
- Note que $S_3^{L,SAT} < S_3^T < S_3^{V,SAT}$ ∴ corrente em equilíbrio L-V ∴ $T_3 = T_3^{SAT}$.
- Determinar x^V por balanço:
 $m^T * S^T = m^L * S^{L,SAT} + m^V * S^{V,SAT}$
em que $m^T = m^L + m^V$
e x^V é definido por $x^V = m^V / m^T$
logo $m^L / m^T = 1 - x^V$
e $S^T = (1 - x^V) * S^{L,SAT} + (x^V) * S^{V,SAT}$.
Resolve-se para x^V : $x^V = (S^T - S^{L,SAT}) / (S^{V,SAT} - S^{L,SAT})$
- Determinar H^T por balanço:
 $H^T = (1 - x^V) * H^{L,SAT} + (x^V) * H^{V,SAT}$

8. Considere processo isobárico no condensador:
 $P_4 = P_3$
9. Dado $x_4^V = 0 (L, SAT)$,
Dado P_4 ler propriedades da corrente [4] na tabela de propriedades de vapor superaquecido:
 $T = T^{SAT}, H^T = H^{L,SAT}, S^T = S^{L,SAT}$
10. Considere processo isentrópico na bomba:
 $S_1^T = S_4^T$
11. Considere processo isobárico na caldeira:
 $P_1 = P_2$
12. Dados P_1 e S_1^T , ler tabela propriedades ca corrente [1] na tabela de propriedades de vapor superaquecido:
Note que $S_1^T < S^{L,SAT} \therefore$ Líquido subresfriado (L, SUB)
13. Considere processo adiabático na bomba:
 $W = \Delta H$
Supondo o L, SUB como fluido incompressível:
 $V(T, P) \approx V(T, P^{SAT})$ para uma mesmo T , para qualquer P .
Dado T_4 ler V^{SAT} na tabela de propriedades de vapor superaquecido,
#volume aproximadamente constante
#dH=TdS+VdP
#bomba processo isentropico

$$\Delta H_{[4 \rightarrow 1]} = \int_{P_4}^{P_1} V(T, P) dP \approx V(T_4) * \Delta P_{[4 \rightarrow 1]}$$

e $H_1 = H_4 + \Delta H_{[4 \rightarrow 1]}$

14. Cálculo da eficiência do ciclo:

Definição: $\eta = |W_{util}| / |Q_{quente}|$
Sendo $|W_{util}| = |W_{turbina}| - |W_{bomba}|$
e $|W_{turbina}| + |Q_{frio}| = |W_{bomba}| + |Q_{quente}|$
logo, $\eta_{ciclo} = (|Q_{quente}| - |Q_{frio}|) / |Q_{quente}|$

E do balanço de energia,
 $\Delta H = Q + W$

Aplicado a cada equipamento:

$$|Q_{quente}| = |\Delta H_{[1 \rightarrow 2]}|, (W = 0)$$

$$|W_{turbina}| = |\Delta H_{[2 \rightarrow 3]}|, (Q = 0)$$

$$|Q_{frio}| = |\Delta H_{[3 \rightarrow 4]}|, (W = 0)$$

$$|W_{bomba}| = |\Delta H_{[4 \rightarrow 1]}|, (Q = 0)$$

Representação do processo em tabela de correntes/propriedades

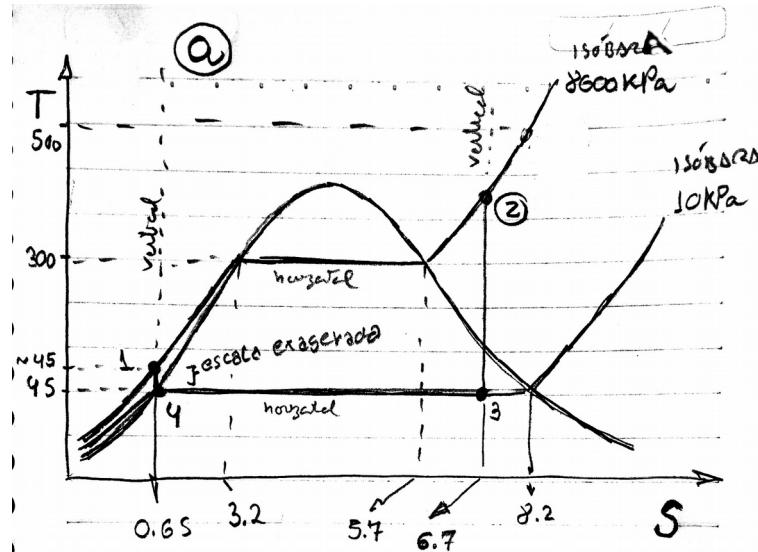
Corrente	Propriedades termodinâmicas					
[i]	$T/^\circ C$	P/kPa	H^T	S^T	x^V	
[2]	(0) 500.00	(0) 8600.00	(1) 3391.60	(1) 6.69	(2) V_sup	
[3]	(5) 45.83	(0) 10.00	(7) 2117.39	(3) 6.69	(6) 0.8047	
[4]	(9) 45.83	(8) 10.00	(9) 191.83	(9) 0.65	(0) L_sat	
[1]	(d1) ~46.08	(11) 8600.00	(13) 200.51	(10) 0.65	(12) L_sub	

Propriedades termodinâmicas de ponto de saturação correspondente à pressão de cada corrente.

Corrente	Propriedades de ponto de saturação					
[i]	P/kPa	$T^{SAT}/^\circ C$	$H^{L,SAT}$	$H^{V,SAT}$	$S^{L,SAT}$	$S^{V,SAT}$
[2]	(0) 8600.00	(1) 300.06	(1) 1345.40	(1) 2750.90	(1) 3.26	(1) 5.71
[3]	(0) 10.00	(4) 45.83	(4) 191.83	(4) 2584.80	(4) 0.65	(4) 8.15
[4]	(8) 10.00	(9) 45.83	(9) 191.83	(9) 2584.80	(9) 0.65	(9) 8.15
[1]	(11) 8600.00	(12) 300.06	(12) 1345.40	(12) 2750.90	(12) 3.26	(12) 5.71

Cálculo de propriedades termodinâmicas intensivas

x_3^V	(6)	0.8047	[-]
H_3^T	(7)	2117.39	[kJ/kg]
$V_4^{L,SAT}$	(13)	1.01	[cm^3/g]
$\Delta H_{[4 \rightarrow 1]}$	(13)	8.68	[kJ/kg]
H_1	(13)	200.51	[kJ/kg]
$W_{[2 \rightarrow 3]}(\text{turbina})$	(14)	-1274.21	[kJ/kg]
$Q_{[3 \rightarrow 4]}(\text{condensador})$	(14)	-1925.56	[kJ/kg]
$W_{[4 \rightarrow 1]}(\text{bomba})$	(14)	8.68	[kJ/kg]
$Q_{[1 \rightarrow 2]}(\text{caldeira})$	(14)	3191.09	[kJ/kg]
η_{ciclo}	(14)	39.66	[$\%$]



Representação do processo em diagrama de propriedades termodinâmicas.

Resolução (b)

As etapas (1)-(7) consistem dos mesmos cálculos, a partir das mesmas entradas, gerando os mesmos resultados que na resolução (a).

Das quais, as etapas (3)-(7) consideram um processo isentrópico, gerando uma corrente [3'], a qual é utilizada para determinar as propriedades da corrente real [3] mediante uma dada uma eficiência do equipamento.

- Calcular as propriedades da corrente [3] real,

Levando à mesma pressão final de [3']:

(logo, fazendo uso dos mesmos valores de $T^{SAT}, H^{L,SAT}, H^{V,SAT}, S^{L,SAT}, S^{V,SAT}$)

Dada uma eficiência da turbina:

$$\eta_{\text{turbina}} = W_{\text{máximo_isentropico}} / W_{\text{gerado_real}}$$

$$\eta_{\text{turbina}} = \dot{W}_{[2 \rightarrow 3']} / \dot{W}_{[2 \rightarrow 3]}$$

$$|W| = |\Delta H|$$

$$\eta_{\text{turbina}} = (H_3' - H_2) / (H_3 - H_2).$$

$$\text{Resolvendo para } H_3 \therefore H_3 = H_2 + \eta_{\text{turbina}} * (H_3' - H_2)$$

- Note que $H_3^{L,SAT} < H_3^T < H_3^{V,SAT} \therefore \text{Equilíbrio L-V} \therefore T = T^{SAT}$

- Calcular x_V por balanço com a entalpia:

$$H^T = x^V * H^{V,SAT} + (1 - x^V) * H^{L,SAT}$$

$$x^V = (H^T - H^{L,SAT}) / (H^{V,SAT} - H^{L,SAT})$$

11. Calcular S^T por balanço com a entropia

$$S^T = x^V * S^{V,SAT} + (1 - x^V) * S^{L,SAT}$$

As etapas (12)-(17) consistem dos mesmos cálculos, no entanto a partir das mesmas entradas, logo gerando resultados diferentes dos da resolução (a).

18. Considere a bomba com a eficiencia dada (75%)

η_{bomba} é definida por: $\eta_{bomba} = W_{mínimo_isentropico} / W_{consumido_real}$

$$\Delta H = W$$

$$\eta_{bomba} = (H'_1 - H_4) / (H_1 - H_4)$$

resolvendo para H_1 , $H_1 = H_4 + (H'_1 - H_4) / \eta_{bomba}$

19. note que $H_1^T < H_1^{L,SAT} \therefore [1]$ é L,SUB, assim como [1']

20. Cálculo da eficiência do ciclo, como na resolução (a).

Representação do processo em tabela de correntes/propriedades

Corrente	Propriedades termodinâmicas						
[i]	$T/^\circ C$	P/kPa	H^T	S^T	x^V	$\eta[equip]$	
[2]	(0) 500.00	(0) 8600	(1) 3391.60	(1) 6.69	(2) V_sup	-	-
[3']	(5) 45.83	(0) 10	(7) 2117.39	(3) 6.69	(6) 0.8047	(3) 100%	
[3]	(9) 45.83	(8) 10	(8) 2435.94	(11) 7.68	(10) 0.9378	(0) 75%	
[4]	(13) 45.83	(12) 10	(13) 191.83	(13) 0.65	(0) 0	-	-
[1']	(d1) ~46.08	(15) 8600	(17) 200.51	(14) 0.65	(16) L_sub	(14) 100%	
[1]	(d2) ~46.77	(15) 8600	(18) 203.40	(d2) ~0.66	(19) L_sub	(0) 75%	

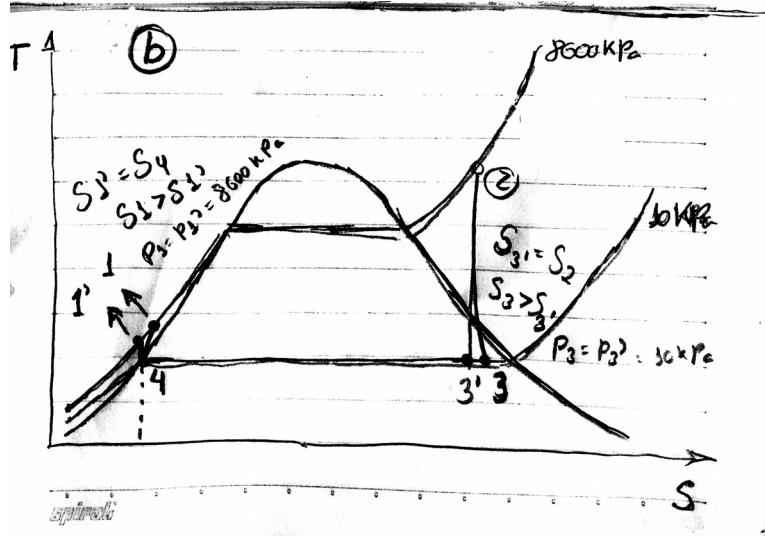
Propriedades termodinâmicas de ponto de saturação correspondente à pressão de cada corrente.

Corrente	Propriedades de ponto de saturação						
[i]	P/kPa	$T^{SAT}/^\circ C$	$H^{L,SAT}$	$H^{V,SAT}$	$S^{L,SAT}$	$S^{V,SAT}$	
[2]	(0) 8600	(1) 300.06	(1) 1345.40	(1) 2750.90	(1) 3.26	(1) 5.71	
[3']	(0) 10	(4) 45.83	(4) 191.83	(4) 2584.80	(4) 0.65	(4) 8.15	
[3]	(8) 10	(8) 45.83	(8) 191.83	(8) 2584.80	(8) 0.65	(8) 8.15	
[4]	(12) 10	(13) 45.83	(13) 191.83	(13) 2584.80	(13) 0.65	(13) 8.15	
[1']	(15) 8600	(16) 300.06	(16) 1345.40	(16) 2750.90	(16) 3.26	(16) 5.71	
[1]	(15) 8600	(16) 300.06	(16) 1345.40	(16) 2750.90	(16) 3.26	(16) 5.71	

Cálculo de propriedades termodinâmicas intensivas

Cálculos de props. Intensivas

$x_{3'}^V$	(6) 0.8047 [-]
$H_{3'}^T$	(7) 2117.39 [kJ/kg]
H_3^T	(8) 2435.94 [kJ/kg]
x_3^V	(9) 0.9378 [-]
S_3^T	(11) 7.68 [kJ/(kg.K)]
$V_4^{L,SAT}$	(17) 1.01 [cm ³ /g]
$\Delta H_{[4 \rightarrow 1']}$	(17) 8.68 [kJ/kg]
$H_{1'}$	(17) 200.51 [kJ/kg]
H_1	(18) 203.40 [kJ/kg]
$W_{[2 \rightarrow 3]}(\text{turbina})$	(20) -955.66 [kJ/kg]
$Q_{[3 \rightarrow 4]}(\text{condensador})$	(20) -2244.11 [kJ/kg]
$W_{[4 \rightarrow 1]}(\text{bomba})$	(20) 11.57 [kJ/kg]
$Q_{[1 \rightarrow 2]}(\text{caldeira})$	(20) 3188.20 [kJ/kg]
η_{ciclo}	(20) 29.61 [%]



Resolução (c)

c0. Dada potência gerada no ciclo

c1. Trabalho específico no ciclo = $|W_{específico_turbina}| - |W_{específico_bomba}|$

c2. Potência (kW) = Vazão mássica (kg/s) * Trabalho específico (kJ/kg)

Vazão mássica (kg/s) = Potência (kW) / Trabalho específico (kJ/kg)

c3. $Q_{caldeira_extensivo} = \text{Vazão mássica (kg/s)} * Q_{caldeira_intensivo} (\text{kJ/kg})$

e

$Q_{condensador_extensivo} = \text{Vazão mássica (kg/s)} * Q_{condensador_intensivo} (\text{kJ/kg})$

Cálculos de taxas de propriedades termodinâmicas extensivas

Potência	(c0)	80000 kJ/s
----------	------	------------

Trabalho específico no ciclo	(c1)	-944 kJ/s
------------------------------	------	-----------

Vazão mássica	(c2)	85 Kg/s
---------------	------	---------

$Q_{caldeira_extensivo}$	(c3)	270161 kJ/s
---------------------------	------	-------------

$Q_{condensador_extensivo}$	(c3)	-190161 kJ/s
------------------------------	------	--------------

Discussão complementar (d)

(*) Discussão complementar não essencial para a conclusão do exercício - não influencia no objetivo do exercício que é calcular a eficiência do ciclo, calor e trabalho envolvidos nos equipamentos.

Não tendo acesso a uma tabela de propriedades para líquido subresfriado, podemos estimar S_1 e T_1 escrevendo $dT(dP,dS)$, $dT(dP,dH)$ e $dS(dP,dT)$ e utilizando essas para comparar as correntes [4], [1] e [1'], por exemplo, utilizando as relações termodinâmicas a seguir juntamente com coeficientes termodinâmicos medidos.

1. Para compressão de [4] para [1']

$$dS = (C_p/T)dT - (\partial V/\partial T)|_P dP$$

$$\alpha = (1/V)(\partial V/\partial T)|_P$$

Se isentrópica

$$(Cp/T)dT = (\partial V/\partial T)|_P dP$$

$$\ln(T/T_0) = \int_{P_0}^P (V\alpha/Cp)dP$$

Líquidos em geral são fluidos com baixa compressibilidade e expansividade

$V\alpha \approx$ constante

$$T \approx T_0 \exp((V\alpha/Cp)(P - P_0))$$

E dada a expansividade da água na faixa de temperatura de $40^\circ C$ de aproximadamente $0.385 \times 10^{-3} K^{-1}$

Utilizando Cp aproximado de 4.19 kJ/(kg K)

Mostra-se que a temperatura da corrente [1'] fica apenas cerca de $0.25^\circ C$ superior à da corrente [4]

2. Calcular diferença de propriedades entre [1] e [1']

à pressão constante:

$$dH = (Cp)dT$$

Utilizando um Cp aproximado e constante:

$$\Delta T = \Delta H/Cp$$

e por fim,

$$dS = (Cp/T)dT$$

Também utilizando um Cp aproximado e constante:

$$\Delta S = Cp \ln(T/T_0)$$

Cálculos para discussão complementar

$$Cp \approx \quad (d1) \quad 4.19 \text{ [kJ/(kg.K)]}$$

$$\alpha \approx \quad (d1) \quad 3.85E-04 \text{ [K-1]}$$

$$T_{1'} \approx \quad (d1) \quad 46.08 \text{ [K]}$$

$$\Delta T_{[1' \rightarrow 1]} \approx (d2) \quad 0.69 \text{ [K]}$$

$$\Delta S_{[1' \rightarrow 1]} \approx (d2) \quad 0.01 \text{ [kJ/(kg.K)]}$$

Tabela de vapor de água superaquecido¹

Tabela F.2: Vapor d'Água Superaquecido, Unidades SI

		TEMPERATURA: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURA: T kelvins)									
P/kPa	$t^{\text{sat}} / {}^{\circ}\text{C}$	líq. sat.	vap. sat.	75 (348,15)	100 (373,15)	125 (398,15)	150 (423,15)	175 (448,15)	200 (473,15)	225 (498,15)	250 (523,15)
1 (6,98)	V	1,000	129200, 29,334	160640, 2385,2	172180, 2480,8	183720, 2516,4	195270, 2552,3	206810, 2588,5	218350, 2624,9	229890, 2661,7	241430, 2698,8
	U	29,334	2385,2	2480,8	2516,4	2688,6	2736,0	2783,7	2831,7	2880,1	2736,3
	H	29,335	2514,4	2641,5	2684,8	2640,0	2687,5	2735,2	2783,1	2831,2	2977,7
10 (45,83)	S	0,1060	8,9767	9,3828	9,5136	9,6365	9,7527	9,8629	9,9679	10,0681	10,1641
	V	1,010	14670,	16030,	17190,	18350,	19510,	20660,	21820,	22980,	24130,
	U	191,822	2438,0	2479,7	2515,6	2551,6	2588,0	2624,5	2661,4	2698,6	2736,1
20 (60,09)	H	191,832	2584,8	2640,0	2687,5	2735,2	2783,1	2831,2	2879,6	2928,4	2977,4
	S	0,6493	8,1511	8,3168	8,4486	8,5722	8,6888	8,7994	8,9045	9,0049	9,1010
	V	1,017	7649,8	8000,0	8584,7	9167,1	9748,0	10320,	10900,	11480,	12060,
30 (69,12)	U	251,432	2456,9	2478,4	2514,6	2550,9	2587,4	2624,1	2661,0	2698,3	2735,8
	H	251,453	2609,9	2638,4	2686,3	2734,2	2782,3	2830,6	2879,2	2928,0	2977,1
	S	0,8321	7,9094	7,9933	8,1261	8,2504	8,3676	8,4785	8,5839	8,6844	8,7806
40 (75,89)	V	1,022	5229,3	5322,0	5714,4	6104,6	6493,2	6880,8	7267,5	7653,8	8039,7
	U	317,609	2477,1	2512,6	2549,4	2586,2	2623,2	2660,3	2697,7	2735,4
	H	317,650	2636,9	2683,8	2732,3	2780,9	2829,5	2878,2	2927,2	2976,5
50 (81,35)	S	1,0261	7,6709	7,8009	7,9268	8,0450	8,1566	8,2624	8,3633	8,4598
	V	1,030	3240,2	3418,1	3654,5	3889,3	4123,0	4356,0	4588,5	4820,5
	U	340,513	2484,0	2511,7	2548,6	2585,6	2622,7	2659,9	2697,4	2735,1
75 (91,79)	H	340,564	2646,0	2682,6	2731,4	2780,1	2828,9	2877,7	2926,8	2976,1
	S	1,0912	7,5947	7,6953	7,8219	7,9406	8,0526	8,1587	8,2598	8,3564
	V	1,037	2216,9	2269,8	2429,4	2587,3	2744,2	2900,2	3055,8	3210,9
100 (99,63)	U	384,374	2496,7	2509,2	2546,7	2584,2	2621,6	2659,0	2696,7	2734,5
	H	384,451	2663,0	2679,4	2728,9	2778,2	2827,4	2876,6	2925,8	2975,3
	S	1,2131	7,4570	7,5014	7,6300	7,7500	7,8629	7,9697	8,0712	8,1681
100 (99,63)	V	1,043	1693,7	1695,5	1816,7	1936,3	2054,7	2172,3	2289,4	2406,1
	U	417,406	2506,1	2506,6	2544,8	2582,7	2620,4	2658,1	2695,9	2733,9
	H	417,511	2675,4	2676,2	2726,5	2776,3	2825,9	2875,4	2924,9	2974,5
	S	1,3027	7,3598	7,3618	7,4923	7,6137	7,7275	7,8349	7,9369	8,0342

Tabela F.2: Vapor d'Água Superaquecido, Unidade SI (Continuação)

		TEMPERATURA: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURA: T kelvins)									
P/kPa	$t^{\text{sat}} / {}^{\circ}\text{C}$	líq. sat.	vap. sat.	475 (748,15)	500 (773,15)	525 (798,15)	550 (823,15)	575 (848,15)	600 (873,15)	625 (898,15)	650 (923,15)
8200 (296,70)	V	1,391	22,863	38,893	40,614	42,295	43,943	45,566	47,166	48,747	50,313
	U	1315,2	2569,5	3015,6	3063,3	3110,5	3157,4	3204,3	3251,1	3298,1	3345,2
	H	1326,6	2757,0	3344,5	3396,4	3457,3	3517,8	3577,9	3637,9	3697,8	3757,7
8400 (298,39)	V	1,398	22,231	37,887	39,576	41,224	42,839	44,429	45,996	47,544	49,076
	U	1324,3	2567,2	3013,6	3061,6	3108,9	3155,9	3202,9	3249,8	3296,9	3344,1
	H	1336,1	2754,0	3331,9	3394,0	3455,2	3515,8	3576,1	3636,2	3696,2	3756,3
8600 (300,06)	S	3,2399	5,7207	6,6173	6,6990	6,7769	6,8516	6,9238	6,9936	7,0614	7,1274
	V	1,404	21,627	36,928	38,586	40,202	41,787	43,345	44,880	46,397	47,897
	U	1333,3	2564,9	3011,6	3059,8	3107,3	3154,4	3201,5	3248,5	3295,7	3342,9
8800 (301,70)	H	1345,4	2750,9	3329,2	3391,6	3453,0	3513,8	3574,3	3634,5	3694,7	3754,9
	S	3,2557	5,7076	6,6037	6,6858	6,7639	6,8390	6,9113	6,9813	7,0492	7,1153
	V	1,411	21,049	36,011	37,640	39,228	40,782	42,310	43,815	45,301	46,771
9000 (303,31)	U	1342,2	2562,6	3009,6	3058,0	3105,6	3152,9	3200,1	3247,2	3294,5	3341,8
	H	1354,6	2747,8	3326,5	3389,2	3450,8	3511,8	3572,4	3632,8	3693,1	3753,4
	S	3,2713	5,6948	6,5904	6,6728	6,7513	6,8265	6,8990	6,9692	7,0373	7,1035
9200 (304,89)	V	1,418	20,495	35,136	36,737	38,296	39,822	41,321	42,798	44,255	45,695
	U	1351,0	2560,1	3007,6	3056,1	3104,0	3151,4	3198,7	3246,0	3293,3	3340,7
	H	1363,7	2744,6	3323,8	3386,8	3448,7	3509,8	3570,6	3631,1	3691,6	3752,0
9400 (306,44)	S	3,2867	5,6820	6,5773	6,6600	6,7388	6,8143	6,8870	6,9574	7,0256	7,0919
	V	1,425	19,964	34,298	35,872	37,405	38,904	40,375	41,824	43,254	44,667
	U	1359,7	2557,7	3005,6	3054,3	3102,3	3149,9	3197,3	3244,7	3292,1	3339,6
9600 (307,97)	H	1372,8	2741,3	3321,1	3384,4	3446,5	3507,8	3568,8	3629,5	3690,0	3750,5
	S	3,3018	5,6694	6,5644	6,6475	6,7266	6,8023	6,8752	6,9457	7,0141	7,0806
	V	1,432	19,455	33,495	35,045	36,552	38,024	39,470	40,892	42,295	43,682
9800 (308,44)	U	1368,2	2555,2	3003,5	3052,5	3100,7	3148,4	3195,9	3243,4	3290,9	3338,5
	H	1381,7	2738,0	3318,4	3381,9	3444,3	3505,9	3566,9	3627,8	3688,4	3749,1
	S	3,3168	5,6568	6,5517	6,6352	6,7146	6,7906	6,8637	6,9343	7,0029	7,0695
10000 (307,97)	V	1,439	18,965	32,726	34,252	35,734	37,182	38,602	39,999	41,377	42,738
	U	1376,7	2552,6	3001,5	3050,7	3099,0	3146,9	3194,5	3242,1	3289,7	3337,4
	H	1390,6	2734,7	3315,6	3379,5	3442,1	3503,9	3565,1	3626,1	3686,9	3747,6
	S	3,3315	5,6444	6,5392	6,6231	6,7028	6,7790	6,8523	6,9231	6,9918	7,0585

Propriedades físicas da água em estado líquido (material para discussão complementar)²

Liquid water physical data changes with temperature											
Temp., °C	Dynamic Viscosity, cP	Change in viscosity with pressure, ps	Compressibility, GPa ⁻¹ ^a		Density, kg m ⁻³ ^a	Speed of sound, m s ⁻¹	Specific heat, J mol ⁻¹ K ⁻¹		Thermal expansivity, 10 ⁻³ K ⁻¹ ^a	Vapor pressure, kPa	Molar volume, cm ⁻³
			κ_T	κ_S			C_P ^a	C_V			
-38 ^e			1.1581	0.8023	968.1	1135	108	75 ^c	-2.963	0.016 ^f	18.609
-30	8.989	-30	0.8079	0.7109	983.9	1196 ^b	90	79.19 ^c	-1.400	0.051	18.311
-20	4.473	-12	0.6425	0.6175	993.6	1277 ^b	80.2	77.08 ^c	-0.661	0.126	18.132
-10	2.668	-5.4	0.5583	0.5531	998.1	1346 ^b	77.2	76.47 ^c	-0.292	0.287	18.049
0	1.792	-2.5	0.5089	0.5086	999.8	1402	76.01	75.97	-0.068	0.611	18.018
10	1.307	-1.0	0.4781	0.4776	999.7	1448	75.57	75.49	0.088	1.228	18.021
20	1.002	-0.4	0.4589	0.4559	998.2	1483	75.38	74.88	0.207	2.339	18.048
30	0.797	-0.05	0.4477	0.4410	995.7	1510	75.30	74.17	0.303	4.247	18.094
40	0.653	0.04	0.4424	0.4312	992.2	1530	75.29	73.38	0.385	7.385	18.157
50	0.547	0.08	0.4417	0.4253	988.0	1543	75.33	72.53	0.458	12.353	18.234
60	0.467	0.11	0.4450	0.4229	983.2	1551	75.39	71.64	0.523	19.947	18.323
70	0.400	0.14	0.4516	0.4230	977.8	1555	75.49	70.71	0.584	31.202	18.425
80	0.355	0.17	0.4614	0.4258	971.8	1554	75.61	69.77	0.641	47.415	18.538
90	0.310	0.19	0.4743	0.4309	965.4	1550	75.76	68.82	0.696	70.181	18.663
100	0.283	0.20	0.4902	0.4382	958.4	1543	75.95	67.89	0.750	101.325	18.798

Referências

1. Smith, van Ness & Abbott – Introdução à Termodinâmica de Engenharia Química, LTC, 7^a edição.
2. Martin Chaplin – Water Structure and Science, London South Bank University
[<http://www1.lsbu.ac.uk/water/data1.html>](http://www1.lsbu.ac.uk/water/data1.html)