

NOTAS DE AULA



Indústria Klabin - Fabricadora de Papel e Celulose S.A. – Unidade de Negócio Paraná, Monte Alegre.
Fonte: Velázquez (2006)

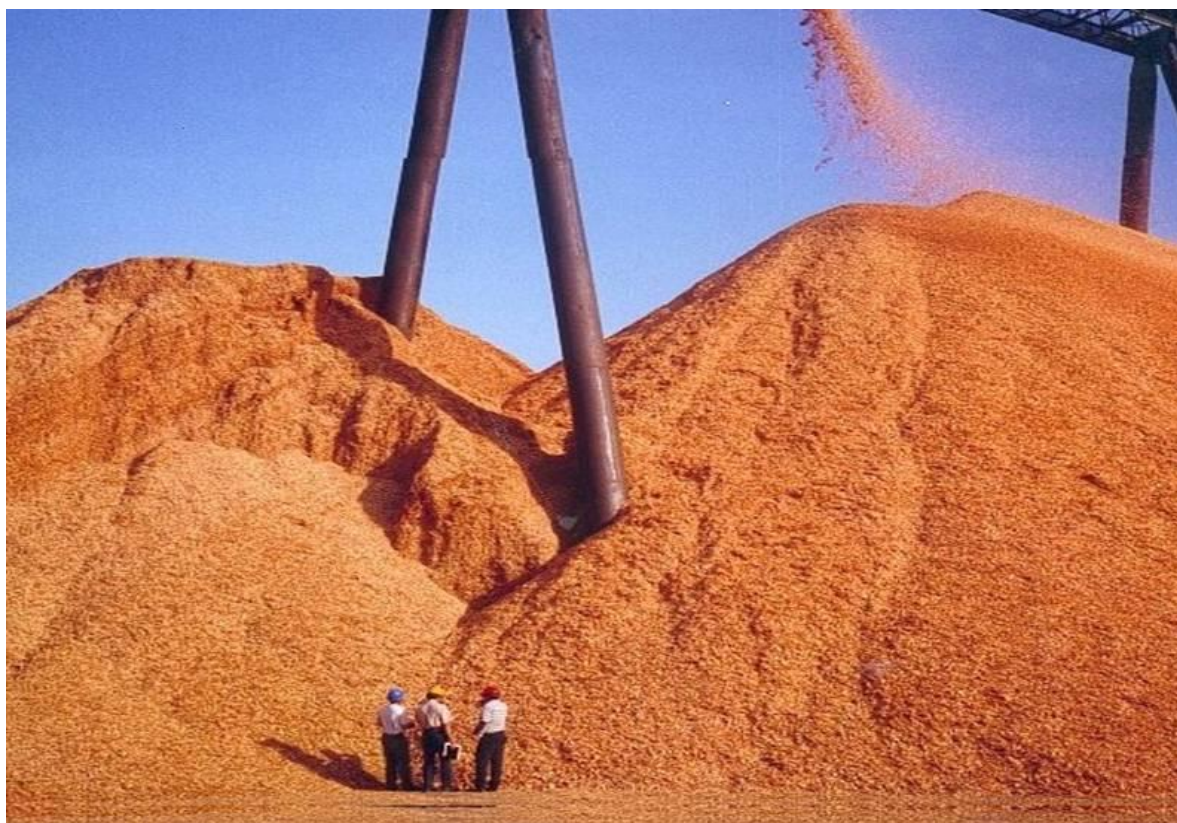
INTRODUÇÃO À TERMODINÂMICA

CAPÍTULO 1

AULA INAUGURAL

- Apresentação da disciplina.
- Relação da disciplina com as outras disciplinas do curso.
- Aplicações na engenharia.
- Situação Atual do Setor Elétrico Brasileiro. Sistema Isolado e Sistema Interligado.

Sistema Interligado



Fonte: Velázquez (2006)

Sistema Isolado



Assentamento Aquidabam, Amazonas.
Fonte: CENBIO (2005)



Sistema de Gaseificação de Biomassa.
Fonte: CENBIO (2005)

- A Situação dos Sistemas de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica no Brasil.
- Situação do Setor Industrial Brasileiro em relação à energia elétrica.
- Necessidades de vapor de processo e energia elétrica nos diversos segmentos do setor industrial.
- Os segmentos do setor industrial mais eletrointensivos e maiores consumidores de biomassa.
- A necessidade de garantia do fornecimento de energia elétrica.
- A Cogeração de Energia.
- Energia e o Meio Ambiente.
- Fontes Renováveis de Energia.
- Geração de Energia por meio de gaseificação de biomassa, da utilização de resíduos de madeira em micro centrais termelétricas, da utilização de óleos vegetais “in natura” em motores diesel adaptados.
- A Região Amazônica.
- O Programa “Luz para Todos”.
- Biocombustíveis Líquidos.



Fonte: CENBIO (2009)

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

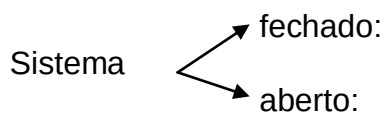
CAPÍTULO 2

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

2.1 Termodinâmica:

2.2 Sistema e Volume de Controle:



2.2.1 Sistema fechado

2.2.2 Sistema aberto

2.3 Estado e Propriedades:

2.3.1 Propriedades

2.3.2 Estado

2.4 Processos e Ciclos:

2.5 Sistemas de Unidades:

PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

CAPÍTULO 3

3 PROPRIEDADES DE UMA SUBSTÂNCIA PURA

(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

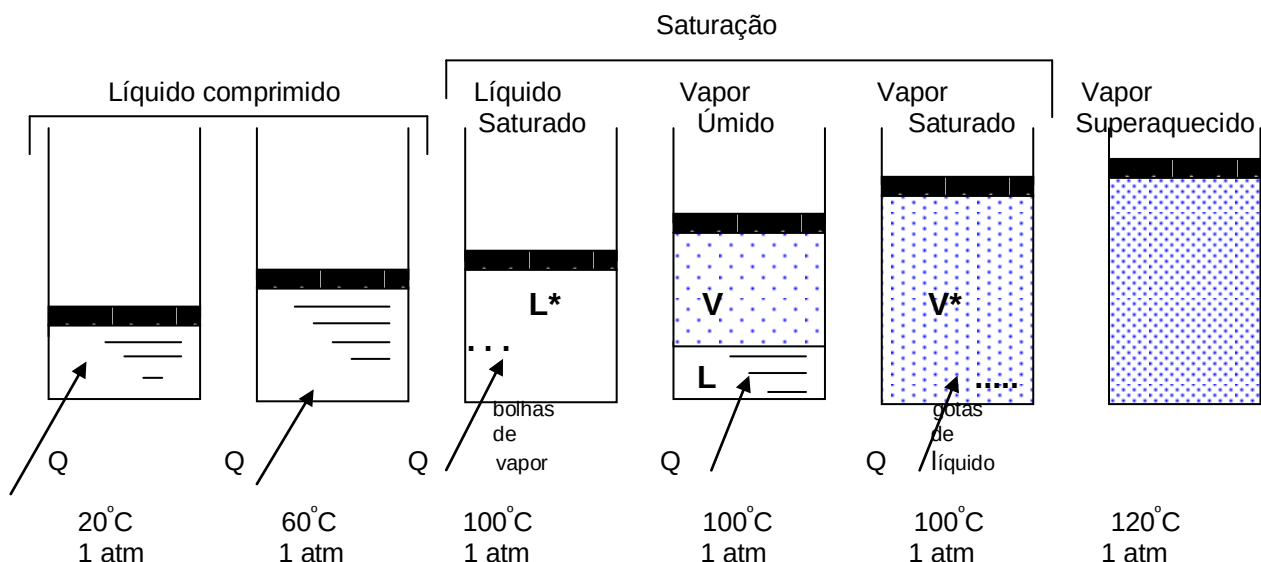
3.1 Substância Pura: é uma composição química homogênea e invariável. Pode existir em mais de uma fase, mas sua composição química é a mesma em todas as fases: líquido/vapor, sólido/líquido, sólido/vapor.

3.2 Equilíbrio: ausência total de evolução do sistema. Existem três tipos:

- Equilíbrio de pressão ($P_1=P_2$)
- Equilíbrio de temperatura ($T_1=T_2$)
- Equilíbrio químico

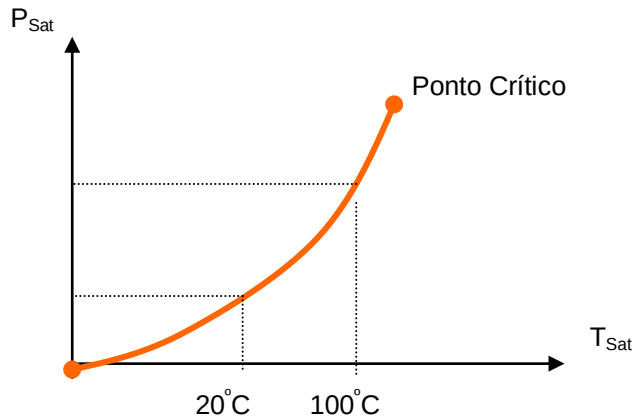
O conjunto dos três equilíbrios é chamado de Equilíbrio Termodinâmico.

3.2.1 Equilíbrio de Fase Líquido-Vapor de uma Substância Pura:



3.3 **Saturação:** $T_{\text{saturação}}$ é a temperatura em que ocorre a vaporização numa dada P , que é a $P_{\text{saturação}}$ na dada temperatura.

Curva de Pressão de Vapor



3.4 Título ou Qualidade

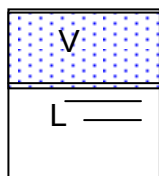
É uma propriedade exclusiva da saturação: $x = \frac{m_v}{m}$, onde $m = m_v + m_l$

$$L^* \rightarrow x =$$

$$L + V \rightarrow < x <$$

$$V^* \rightarrow x =$$

3.5 Volume Específico



$$(:m) \quad V = V_v + V_l \quad (:m)$$

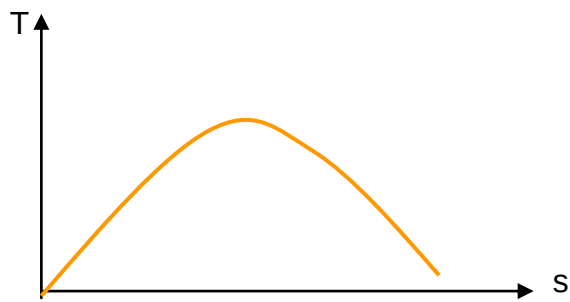
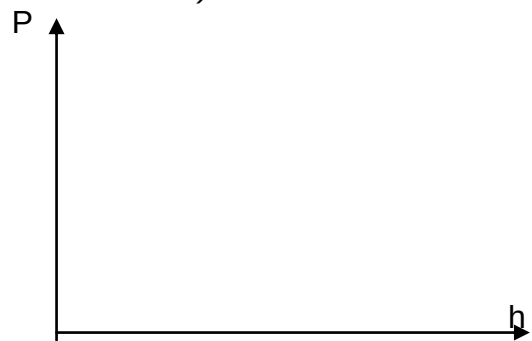
$$\left(\frac{V}{m}\right) = \frac{V_v}{m} + \frac{V_l}{m} \quad \text{como: } V = v \cdot m$$

$$v = v_v \cdot \left(\frac{m_v}{m}\right) + v_l \cdot \left(\frac{m_l}{m}\right)$$

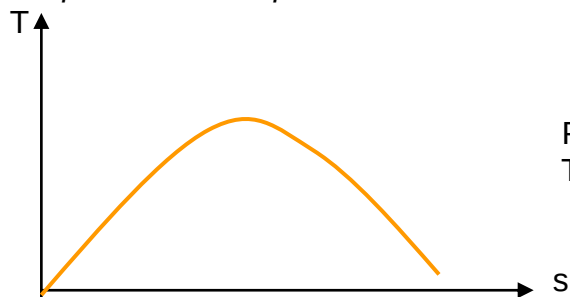


3.6 Diagrama $T \times s$ do vapor d'água

(a serem construídos em sala de aula)

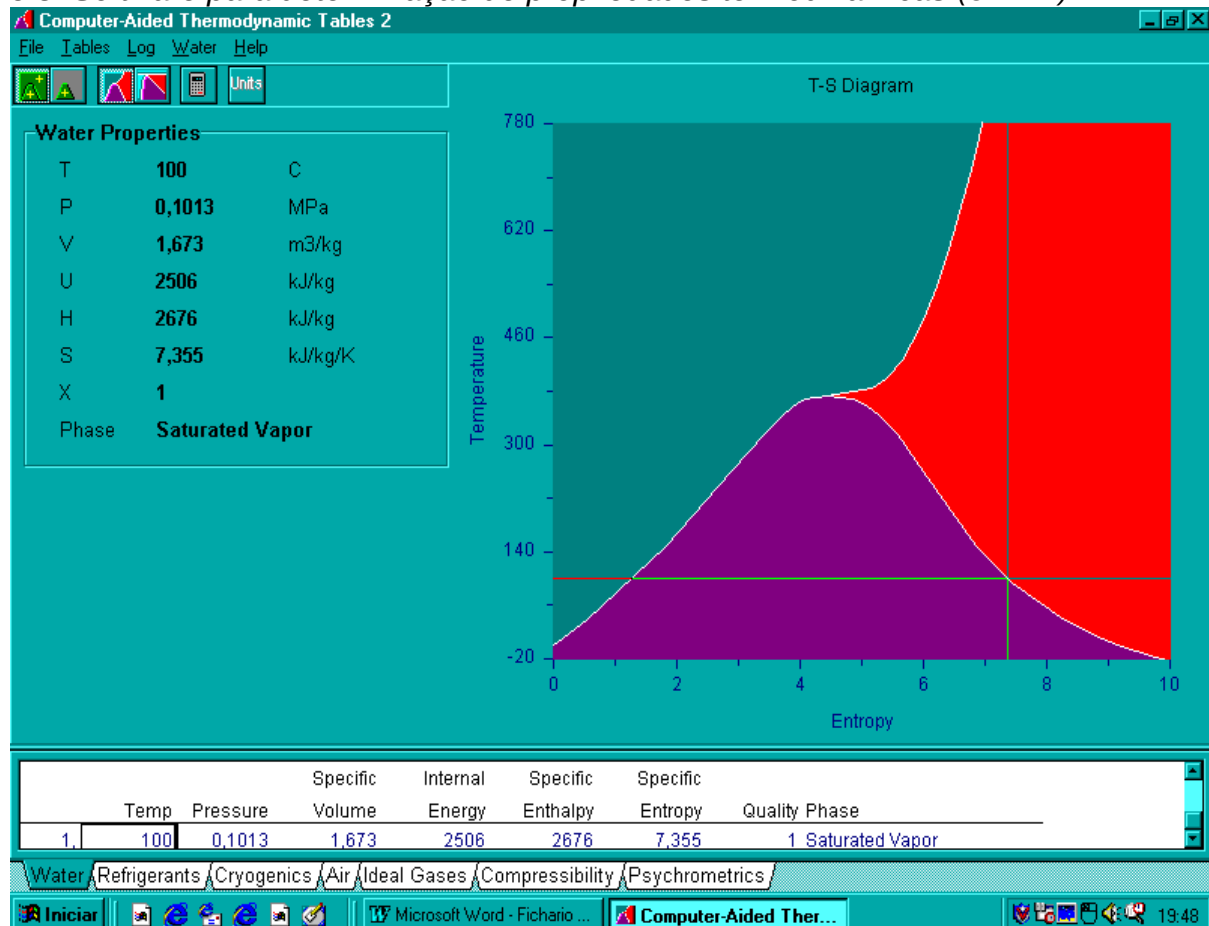
3.7 Diagrama $P \times h$ do Freon-12

3.8 Propriedades Independentes de uma Substância Pura



$P = 100 \text{ kPa}$
 $T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.8 Software para determinação de propriedades termodinâmicas (CATT 2)



Fonte: Van Wylen et al. (2003)

3.9 Tabelas de vapor

3.9.1 Tabela da água saturada (entrada pela temperatura)

Apêndice B

Tabelas Termodinâmicas

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1 — Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C <i>T</i>	Pressão kPa <i>p</i>	Volume específico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat. <i>v_f</i>	Vapor sat. <i>v_g</i>	Líquido sat. <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Vapor sat. <i>u_g</i>	Líquido sat. <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Vapor sat. <i>h_g</i>	Líquido sat. <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Vapor sat. <i>s_g</i>
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,3	2382,2	20,98	2489,6	2510,5	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,2	2389,2	41,99	2477,7	2519,7	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,7051	0,001001	77,925	62,98	2333,1	2396,0	62,98	2465,9	2528,9	0,2245	9,5569	8,7813
20	2,3385	0,001002	57,790	83,94	2319,0	2402,9	83,94	2454,1	2538,1	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,1691	0,001003	43,359	104,86	2304,9	2409,8	104,87	2442,3	2547,2	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,2461	0,001004	32,893	125,77	2290,8	2416,6	125,77	2430,5	2556,2	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,6280	0,001006	25,216	146,65	2276,7	2423,4	146,66	2418,6	2565,3	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,3837	0,001008	19,523	167,53	2262,6	2430,1	167,54	2406,7	2574,3	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,5934	0,001010	15,258	188,41	2248,4	2436,8	188,42	2394,8	2583,2	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,032	209,30	2234,2	2443,5	209,31	2382,7	2592,1	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,568	230,19	2219,9	2450,1	230,20	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,671	251,09	2205,5	2456,6	251,11	2358,5	2609,6	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,033	0,001020	6,197	272,00	2191,1	2463,1	272,03	2346,2	2618,2	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,188	0,001023	5,042	292,93	2176,6	2469,5	292,96	2333,8	2626,8	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,578	0,001026	4,131	313,87	2162,0	2475,9	313,91	2321,4	2635,3	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,390	0,001029	3,407	334,84	2147,4	2482,2	334,88	2308,8	2643,7	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,834	0,001032	2,828	355,82	2132,6	2488,4	355,88	2296,0	2651,9	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,139	0,001036	2,361	376,82	2117,7	2494,5	376,90	2283,2	2660,1	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,554	0,001040	1,982	397,86	2102,7	2500,6	397,94	2270,2	2668,1	1,2500	6,1659	7,4158
MPa												
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,91	2087,6	2506,5	419,02	2257,0	2676,0	1,3068	6,0480	7,3548
105	0,12082	0,001047	1,4194	440,00	2072,3	2512,3	440,13	2243,7	2683,8	1,3629	5,9328	7,2958
110	0,14328	0,001052	1,2102	461,12	2057,0	2518,1	461,27	2230,2	2691,5	1,4184	5,8202	7,2386
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,28	2041,4	2523,7	482,46	2216,5	2699,0	1,4733	5,7100	7,1832
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,48	2025,8	2529,2	503,69	2202,6	2706,3	1,5275	5,6020	7,1295
125	0,2321	0,001065	0,77059	524,72	2009,9	2534,6	524,96	2188,5	2713,5	1,5812	5,4962	7,0774
130	0,2701	0,001070	0,66850	546,00	1993,9	2539,9	546,29	2174,2	2720,5	1,6343	5,3925	7,0269
135	0,3130	0,001075	0,58217	567,34	1977,7	2545,0	567,67	2159,6	2727,3	1,6869	5,2907	6,9777
140	0,3613	0,001080	0,50885	588,72	1961,3	2550,0	589,11	2144,8	2733,9	1,7390	5,1908	6,9298
145	0,4154	0,001085	0,44632	610,16	1944,7	2554,9	610,61	2129,6	2740,3	1,7906	5,0926	6,8832
150	0,4759	0,001090	0,39278	631,66	1927,9	2559,5	632,18	2114,3	2746,4	1,8417	4,9960	6,8378
155	0,5431	0,001096	0,34676	653,23	1910,8	2564,0	653,82	2098,6	2752,4	1,8924	4,9010	6,7934

Fonte: Van Wylen et al. (2003)

3.9.2 Tabela da água saturada (entrada pela pressão)

Apêndice B 537

Tabela B.1.2 — Água saturada; tabela em função da pressão

Pressão kPa p	Temp. °C T	Volume específico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat. v_f	Vapor sat. v_g	Líquido sat. u_f	Evap. u_{fg}	Vapor sat. u_g	Líquido sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor sat. h_g	Líquido sat. s_f	Evap. s_{fg}	Vapor sat. s_g
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	6,98	0,001000	129,208	29,29	2355,7	2385,0	29,29	2484,9	2514,2	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,980	54,70	2338,6	2393,3	54,70	2470,6	2525,3	0,1956	8,6322	8,8278
2,0	17,50	0,001001	67,004	73,41	2326,0	2399,5	73,47	2460,0	2533,5	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,254	88,47	2315,9	2404,4	88,47	2451,6	2540,0	0,3120	8,3311	8,6431
3,0	24,08	0,001003	45,665	101,03	2307,5	2408,5	101,03	2444,5	2545,5	0,3545	8,2231	8,5775
4,0	28,96	0,001004	34,800	121,44	2293,7	2415,2	121,44	2432,9	2554,4	0,4226	8,0520	8,4746
5,0	32,88	0,001005	28,193	137,79	2282,7	2420,5	137,79	2423,7	2561,4	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,238	168,76	2261,7	2430,5	168,77	2406,0	2574,8	0,5763	7,6751	8,2514
10,0	45,81	0,001010	14,674	191,79	2246,1	2437,9	191,81	2392,8	2584,6	0,6492	7,5010	8,1501
15,0	53,97	0,001014	10,022	225,90	2222,8	2448,7	225,91	2373,1	2599,1	0,7548	7,2536	8,0084
20,0	60,06	0,001017	7,649	251,35	2205,4	2456,7	251,38	2358,3	2609,7	0,8319	7,0766	7,9085
25,0	64,97	0,001020	6,204	271,88	2191,2	2463,1	271,90	2346,3	2618,2	0,8930	6,9383	7,8313
30,0	69,10	0,001022	5,229	289,18	2179,2	2468,4	289,21	2336,1	2625,3	0,9439	6,8247	7,7686
40,0	75,87	0,001026	3,993	317,51	2159,5	2477,0	317,55	2319,2	2636,7	1,0258	6,6441	7,6700
50,0	81,33	0,001030	3,240	340,42	2143,4	2483,8	340,47	2305,4	2645,9	1,0910	6,5029	7,5939
75,0	91,77	0,001037	2,217	384,29	2112,4	2496,7	384,36	2278,6	2663,0	1,2129	6,2434	7,4563
MPa												
0,100	99,62	0,001043	1,6940	417,33	2088,7	2506,1	417,44	2258,0	2675,5	1,3025	6,0568	7,3593
0,125	105,99	0,001048	1,3749	444,16	2069,3	2513,5	444,30	2241,1	2685,3	1,3739	5,9104	7,2843
0,150	111,37	0,001053	1,1593	466,92	2052,7	2519,6	467,08	2226,5	2693,5	1,4335	5,7897	7,2232
0,175	116,06	0,001057	1,0036	486,78	2038,1	2524,9	486,97	2213,6	2700,5	1,4848	5,6868	7,1717
0,200	120,23	0,001061	0,8857	504,47	2025,0	2529,5	504,68	2202,0	2706,6	1,5300	5,5970	7,1271
0,225	124,00	0,001064	0,7933	520,45	2013,1	2533,6	520,69	2191,3	2712,0	1,5705	5,5173	7,0878
0,250	127,43	0,001067	0,7187	535,08	2002,1	2537,2	535,34	2181,5	2716,9	1,6072	5,4455	7,0526
0,275	130,60	0,001070	0,6573	548,57	1992,0	2540,5	548,87	2172,4	2721,3	1,6407	5,3801	7,0208
0,300	133,55	0,001073	0,6058	561,13	1982,4	2543,6	561,45	2163,9	2725,3	1,6717	5,3201	6,9918
0,325	136,30	0,001076	0,5620	572,88	1973,5	2546,3	573,23	2155,8	2729,0	1,7005	5,2646	6,9651
0,350	138,88	0,001079	0,5243	583,93	1965,0	2548,9	584,31	2148,1	2732,4	1,7274	5,2130	6,9404
0,375	141,32	0,001081	0,4914	594,38	1956,9	2551,3	594,79	2140,8	2735,6	1,7527	5,1647	6,9174
0,40	143,63	0,001084	0,4625	604,29	1949,3	2553,6	604,73	2133,8	2738,5	1,7766	5,1193	6,8958
0,45	147,93	0,001088	0,4140	622,75	1934,9	2557,6	623,24	2120,7	2743,9	1,8206	5,0359	6,8565
0,50	151,86	0,001093	0,3749	639,66	1921,6	2561,2	640,21	2108,5	2748,7	1,8606	4,9606	6,8212
0,55	155,48	0,001097	0,3427	655,30	1909,2	2564,5	655,91	2097,0	2752,9	1,8972	4,8920	6,7892
0,60	158,85	0,001101	0,3157	669,88	1897,5	2567,4	670,54	2086,3	2756,8	1,9311	4,8289	6,7600
0,65	162,01	0,001104	0,2927	683,55	1886,5	2570,1	684,26	2076,0	2760,3	1,9627	4,7704	6,7330
0,70	164,97	0,001108	0,2729	696,43	1876,1	2572,5	697,20	2066,3	2763,5	1,9922	4,7158	6,7080
0,75	167,77	0,001111	0,2556	708,62	1866,1	2574,7	709,45	2057,0	2766,4	2,0199	4,6647	6,6846
0,80	170,43	0,001115	0,2404	720,20	1856,6	2576,8	721,10	2048,0	2769,1	2,0461	4,6166	6,6627
0,85	172,96	0,001118	0,2270	731,25	1847,4	2578,7	732,20	2039,4	2771,6	2,0709	4,5711	6,6421
0,90	175,38	0,001121	0,2150	741,81	1838,7	2580,5	742,82	2031,1	2773,9	2,0946	4,5280	6,6225
0,95	177,69	0,001124	0,2042	751,94	1830,2	2582,1	753,00	2023,1	2776,1	2,1171	4,4869	6,6040
1,00	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1822,0	2583,6	762,79	2015,3	2778,1	2,1386	4,4478	6,5864

Fonte: Van Wylen et al. (2003)

3.9.3 Tabela do vapor d'água superaquecido

Apêndice B 539

Tabela B.1.3 — Vapor d'água superaquecido (as unidades são as mesmas da Tabela anterior)

<i>T</i>	<i>p</i> = 10 kPa (45,81)				<i>p</i> = 50 kPa (81,33)				<i>p</i> = 100 kPa (99,62)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	14,674	2437,9	2584,6	8,1501	3,240	2483,8	2645,9	7,5939	1,6940	2506,1	2675,5	7,3593
50	14,869	2443,9	2592,6	8,1749	—	—	—	—	—	—	—	—
100	17,196	2515,5	2687,5	8,4479	3,418	2511,6	2682,5	7,6947	1,6958	2506,6	2676,2	7,3614
150	19,513	2587,9	2783,0	8,6881	3,889	2585,6	2780,1	7,9400	1,9364	2582,7	2776,4	7,6133
200	21,825	2661,3	2879,5	8,9037	4,356	2659,8	2877,6	8,1579	2,1723	2658,0	2875,3	7,8342
250	24,136	2736,0	2977,3	9,1002	4,821	2735,0	2976,0	8,3555	2,4060	2733,7	2974,3	8,0332
300	26,445	2812,1	3076,5	9,2812	5,284	2811,3	3075,5	8,5372	2,6388	2810,4	3074,3	8,2157
400	31,063	2968,9	3279,5	9,6076	6,209	2968,4	3278,9	8,8641	3,1026	2967,8	3278,1	8,5434
500	35,679	3132,3	3489,0	9,8977	7,134	3131,9	3488,6	9,1545	3,5655	3131,5	3488,1	8,8341
600	40,295	3302,5	3705,4	10,1608	8,058	3302,2	3705,1	9,4177	4,0278	3301,9	3704,7	9,0975
700	44,911	3479,6	3928,7	10,4028	8,981	3479,5	3928,5	9,6599	4,4899	3479,2	3928,2	9,3398
800	49,526	3663,8	4159,1	10,6281	9,904	3663,7	4158,9	9,8852	4,9517	3663,5	4158,7	9,5652
900	54,141	3855,0	4396,4	10,8395	10,828	3854,9	4396,3	10,0967	5,4135	3854,8	4396,1	9,7767
1000	58,757	4053,0	4640,6	11,0392	11,751	4052,9	4640,5	10,2964	5,8753	4052,8	4640,3	9,9764
1100	63,372	4257,5	4891,2	11,2287	12,674	4257,4	4891,1	10,4858	6,3370	4257,3	4890,9	10,1658
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4090	13,597	4467,8	5147,7	10,6662	6,7986	4467,7	5147,6	10,3462
1300	72,603	4683,7	5409,7	11,5810	14,521	4683,6	5409,6	10,8382	7,2603	4683,5	5409,5	10,5182
<i>T</i>	<i>p</i> = 200 kPa (120,23)				<i>p</i> = 300 kPa (133,55)				<i>p</i> = 400 kPa (143,63)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,88573	2529,5	2706,6	7,1271	0,60582	2543,6	2725,3	6,9918	0,46246	2553,6	2738,5	6,8958
150	0,95964	2576,9	2768,8	7,2795	0,63388	2570,8	2761,0	7,0778	0,47084	2564,5	2752,8	6,9299
200	1,08034	2654,4	2870,5	7,5066	0,71629	2650,7	2865,5	7,3115	0,53422	2646,8	2860,5	7,1706
250	1,19880	2731,2	2971,0	7,7085	0,79636	2728,7	2967,6	7,5165	0,59512	2726,1	2964,2	7,3788
300	1,31616	2808,6	3071,8	7,8926	0,87529	2806,7	3069,3	7,7022	0,65484	2804,8	3066,7	7,5661
400	1,54930	2966,7	3276,5	8,2217	1,03151	2965,5	3275,0	8,0329	0,77262	2964,4	3273,4	7,8984
500	1,78139	3130,7	3487,0	8,5132	1,18669	3130,0	3486,0	8,3250	0,88934	3129,2	3484,9	8,1912
600	2,01297	3301,4	3704,0	8,7769	1,34136	3300,8	3703,2	8,5892	1,00555	3300,2	3702,4	8,4557
700	2,24426	3478,8	3927,7	9,0194	1,49573	3478,4	3927,1	8,8319	1,12147	3477,9	3926,5	8,6987
800	2,47539	3663,2	4158,3	9,2450	1,64994	3662,9	4157,8	9,0575	1,23722	3662,5	4157,4	8,9244
900	2,70643	3854,5	4395,8	9,4565	1,80406	3854,2	4395,4	9,2691	1,35288	3853,9	4395,1	9,1361
1000	2,93740	4052,5	4640,0	9,6563	1,95812	4052,3	4639,7	9,4689	1,46847	4052,0	4639,4	9,3360
1100	3,16834	4257,0	4890,7	9,8458	2,11214	4256,8	4890,4	9,6585	1,58404	4256,5	4890,1	9,5255
1200	3,39927	4467,5	5147,3	10,0262	2,26614	4467,2	5147,1	9,8389	1,69958	4467,0	5146,8	9,7059
1300	3,63018	4683,2	5409,3	10,1982	2,42013	4683,0	5409,0	10,0109	1,81511	4682,8	5408,8	9,8780
<i>T</i>	<i>p</i> = 500 kPa (151,86)				<i>p</i> = 600 kPa (158,85)				<i>p</i> = 800 kPa (170,43)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	0,37489	2561,2	2748,7	6,8212	0,31567	2567,4	2756,8	6,7600	0,24043	2576,8	2769,1	6,6627
200	0,42492	2642,9	2855,4	7,0592	0,35202	2638,9	2850,1	6,9665	0,26080	2630,6	2839,2	6,8158
250	0,47436	2723,5	2960,7	7,2708	0,39383	2720,9	2957,2	7,1816	0,29314	2715,5	2950,0	7,0384
300	0,52256	2802,9	3064,2	7,4598	0,43437	2801,0	3061,6	7,3723	0,32411	2797,1	3056,4	7,2327
350	0,57012	2882,6	3167,6	7,6328	0,47424	2881,1	3165,7	7,5463	0,35439	2878,2	3161,7	7,4088
400	0,61728	2963,2	3271,8	7,7937	0,51372	2962,0	3270,2	7,7078	0,38426	2959,7	3267,1	7,5715
500	0,71093	3128,4	3483,8	8,0872	0,59199	3127,6	3482,7	8,0020	0,44331	3125,9	3480,6	7,8672
600	0,80406	3299,6	3701,7	8,3521	0,66974	3299,1	3700,9	8,2673	0,50184	3297,9	3699,4	8,1332
700	0,89691	3477,5	3926,0	8,5952	0,74720	3477,1	3925,4	8,5107	0,56007	3476,2	3924,3	8,3770
800	0,98959	3662,2	4157,0	8,8211	0,82450	3661,8	4156,5	8,7367	0,61813	3661,1	4155,7	8,6033
900	1,08217	3853,6	4394,7	9,0329	0,90169	3853,3	4394,4	8,9485	0,67610	3852,8	4393,6	8,8153
1000	1,17469	4051,8	4639,1	9,2328	0,97883	4051,5	4638,8	9,1484	0,73401	4051,0	4638,2	9,0153

Fonte: Van Wylen et al. (2003)

3.9.4 Tabela da água líquida comprimida

Tabela B.1.4 — Água líquida comprimida (as unidades são as mesmas da Tab. B.1.2)

<i>T</i>	<i>p</i> = 5,00 MPa (263,99)				<i>p</i> = 10,00 MPa (311,06)				<i>p</i> = 15 MPa (342,24)			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	,0012859	1147,78	1154,21	2,9201	,0014524	1393,00	1401,53	3,3595	,0016581	1585,58	1610,45	3,6847
0	,0009977	0,03	5,02	0,0001	,0009952	0,10	10,05	0,0003	,0009928	0,15	15,04	0,0004
20	,0009995	83,64	88,64	0,2955	,0009972	83,35	93,32	0,2945	,0009950	83,05	97,97	0,2934
40	,0010056	166,93	171,95	0,5705	,0010034	166,33	176,36	0,5685	,0010013	165,73	180,75	0,5665
60	,0010149	250,21	255,28	0,8284	,0010127	249,34	259,47	0,8258	,0010105	248,49	263,65	0,8231
80	,0010268	333,69	338,83	1,0719	,0010245	332,56	342,81	1,0687	,0010222	331,46	346,79	1,0655
100	,0010410	417,50	422,71	1,3030	,0010385	416,09	426,48	1,2992	,0010361	414,72	430,26	1,2954
120	,0010576	501,79	507,07	1,5232	,0010549	500,07	510,61	1,5188	,0010522	498,39	514,17	1,5144
140	,0010768	586,74	592,13	1,7342	,0010737	584,67	595,40	1,7291	,0010707	582,64	598,70	1,7241
160	,0010988	672,61	678,10	1,9374	,0010953	670,11	681,07	1,9316	,0010918	667,69	684,07	1,9259
180	,0011240	759,62	765,24	2,1341	,0011199	756,63	767,83	2,1274	,0011159	753,74	770,48	2,1209
200	,0011530	848,08	853,85	2,3254	,0011480	844,49	855,97	2,3178	,0011433	841,04	858,18	2,3103
220	,0011866	938,43	944,36	2,5128	,0011805	934,07	945,88	2,5038	,0011748	929,89	947,52	2,4952
240	,0012264	1031,34	1037,47	2,6978	,0012187	1025,94	1038,13	2,6872	,0012114	1020,82	1038,99	2,6770
260	,0012748	1127,92	1134,30	2,8829	,0012645	1121,03	1133,68	2,8698	,0012550	1114,59	1133,41	2,8575
280	—	—	—	—	,0013216	1220,90	1234,11	3,0547	,0013084	1212,47	1232,09	3,0392
300	—	—	—	—	,0013972	1328,34	1342,31	3,2468	,0013770	1316,58	1337,23	3,2259
320	—	—	—	—	—	—	—	—	,0014724	1431,05	1453,13	3,4246
340	—	—	—	—	—	—	—	—	,0016311	1567,42	1591,88	3,6545
<i>T</i>	<i>p</i> = 20 MPa (365,81)				<i>p</i> = 30 MPa				<i>p</i> = 50 MPa			
	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
Sat.	,0020353	1785,47	1826,18	4,0137	—	—	—	—	—	—	—	—
0	,0009904	0,20	20,00	0,0004	,0009856	0,25	29,82	0,0001	,0009766	0,20	49,03	-0,0014
20	,0009928	82,75	102,61	0,2922	,0009886	82,16	111,82	0,2898	,0009804	80,98	130,00	0,2847
40	,0009992	165,15	185,14	0,5646	,0009951	164,01	193,87	0,5606	,0009872	161,84	211,20	0,5526
60	,0010084	247,66	267,82	0,8205	,0010042	246,03	276,16	0,8153	,0009962	242,96	292,77	0,8051
80	,0010199	330,38	350,78	1,0623	,0010156	328,28	358,75	1,0561	,0010073	324,32	374,68	1,0439

Fonte: Van Wylen et al. (2003)

Faça as seguintes leituras, a partir das tabelas apresentadas:

1) $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $X = 0,3 \rightarrow P = ?$ e $v = ?$

2) $v = 0,001090$ e $X = 0 \rightarrow T = ?$ e $P = ?$

3) $P = 10\text{ kPa}$ e $X = 1 \rightarrow t = ?$ e $v = ?$

4) $P = 200\text{ kPa}$ e $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow v = ?$

5) $P = 5\text{ MPa}$ e $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow v = ?$

$P = 1\text{ MPa} \rightarrow T_{\text{sat}} = ?$

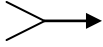
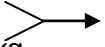
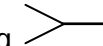
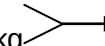
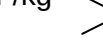
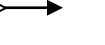
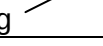
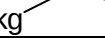
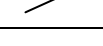
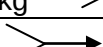
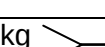
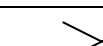
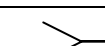
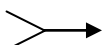
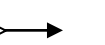
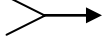
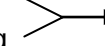
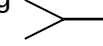
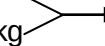
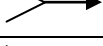
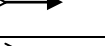
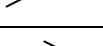
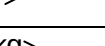
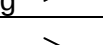
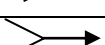
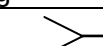
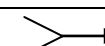
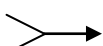
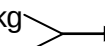
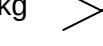
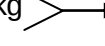
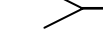
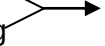
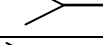
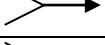
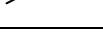
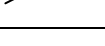
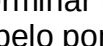
$P = 5\text{ MPa} \rightarrow T_{\text{sat}} = ?$

3.10 Exercícios

1º Faça as seguintes leituras, a partir dos diagramas:

Para H ₂ O	Para Freon – 12 (R-12)
1) $x = 0,5$ $P = 10 \text{ atm}$	1. $P = 9,5 \text{ atm}$ $v = 0,010 \text{ m}^3/\text{kg}$
2) $x = 1$ $v = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$	2. $T = 45^\circ\text{C}$ $v = 0,004 \text{ m}^3/\text{kg}$
3) $v = 0,006 \text{ m}^3/\text{kg}$ $P = 125 \text{ atm}$	3. $x = 0,6$ $P = 1,1 \text{ atm}$
4) $T = 200^\circ\text{C}$ $v = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$	4. $P = 3 \text{ atm}$ $v = 0,018 \text{ m}^3/\text{kg}$
5) $T = 320^\circ\text{C}$ $P = 50 \text{ atm}$	5. $T = 80^\circ\text{C}$ $x = 0,65$
6) $P = 100 \text{ atm}$ $v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$	6. $T = 40^\circ\text{C}$ $P = 3 \text{ atm}$
7) $P = 20 \text{ atm}$ $T = 580^\circ\text{C}$	7. $v = 0,056 \text{ m}^3/\text{kg}$ $P = 3,7 \text{ atm}$
8) $x = 0,6$ $v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$	8. $P = 0,75 \text{ atm}$ $v = 0,28 \text{ m}^3/\text{kg}$
9) $P = 5 \text{ atm}$ $x = 0,26$	9. $T = 50^\circ\text{C}$ $P = 2 \text{ atm}$
10) $P = 1 \text{ atm}$ $x = 0,6$	10. $T = -40^\circ\text{C}$ $v = 0,20 \text{ m}^3/\text{kg}$
11) $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ $P = 5 \text{ atm}$	11. $T = 0^\circ\text{C}$ $v = 0,040 \text{ m}^3/\text{kg}$
12) $P = 100 \text{ atm}$ $T = 325^\circ\text{C}$	12. $T = 60^\circ\text{C}$ $P = 10 \text{ atm}$
13) $P = 150 \text{ atm}$ $T = 470^\circ\text{C}$	13. $v = 0,020 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T = 60^\circ\text{C}$
14) $P = 2 \text{ atm}$ $V = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$	14. $v = 0,036 \text{ m}^3/\text{kg}$ $P = 6 \text{ atm}$
15) $P = 1 \text{ atm}$ $v = 1,0 \text{ m}^3/\text{kg}$	15. $T = 40^\circ\text{C}$ $P = 3 \text{ atm}$
16) $x = 0,7$ $v = 0,008 \text{ m}^3/\text{kg}$	16. $T = -30^\circ\text{C}$ $V = 0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$
17) $P = 20 \text{ atm}$ $X = 1$	17. $v = 0,012 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T = 24^\circ\text{C}$
18) $v = 0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ $P = 2 \text{ atm}$	18. $v = 0,020 \text{ m}^3/\text{kg}$ $x = 0,6$
19) $T = 500^\circ\text{C}$ $P = 50 \text{ atm}$	19. $x = 0,6$ $v = 0,09 \text{ m}^3/\text{kg}$
20) $P = 225 \text{ atm}$ $T = 430^\circ\text{C}$	20. $P = 4,2 \text{ atm}$ $X = 0,65$
21) $P = 1 \text{ atm}$ $L+V$	21. $T = 40^\circ\text{C}$ $L+V$

2º Repita as leituras, agora, a partir das tabelas e compare os resultados:

Para H ₂ O	Para Freon – 12 (R-12)
22) $x = 0,5$ $P = 10 \text{ atm}$  $v =$ $T =$	22. $P = 9,5 \text{ atm}$  $T =$ $v = 0,010 \text{ m}^3/\text{kg}$
23) $x = 1$ $v = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$  $P =$ $T =$	23. $T = 45^\circ\text{C}$  $P =$ $v = 0,004 \text{ m}^3/\text{kg}$
24) $v = 0,006 \text{ m}^3/\text{kg}$  $x =$ $P = 125 \text{ atm}$	24. $x = 0,6$  $v =$ $P = 1,1 \text{ atm}$
25) $T = 200^\circ\text{C}$  $P =$ $v = 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$	25. $P = 3 \text{ atm}$  $x =$ $v = 0,018 \text{ m}^3/\text{kg}$
26) $T = 320^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 50 \text{ atm}$	26. $T = 80^\circ\text{C}$  $v =$ $x = 0,65$
27) $P = 100 \text{ atm}$  $T =$ $v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$	27. $T = 40^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 3 \text{ atm}$
28) $P = 20 \text{ atm}$  $v =$ $T = 580^\circ\text{C}$	28. $v = 0,056 \text{ m}^3/\text{kg}$  $T =$ $P = 3,7 \text{ atm}$
29) $x = 0,6$  $P =$ $v = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T =$	29. $P = 0,75 \text{ atm}$  $T =$ $v = 0,28 \text{ m}^3/\text{kg}$
30) $P = 5 \text{ atm}$  $v =$ $x = 0,26$	30. $T = 50^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 2 \text{ atm}$
31) $P = 1 \text{ atm}$  $v =$ $x = 0,6$ $T =$	31. $T = -40^\circ\text{C}$  $P =$ $v = 0,20 \text{ m}^3/\text{kg}$
32) $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$  $T =$ $P = 5 \text{ atm}$	32. $T = 0^\circ\text{C}$  $x =$ $v = 0,040 \text{ m}^3/\text{kg}$
33) $P = 100 \text{ atm}$  $v =$ $T = 325^\circ\text{C}$	33. $T = 60^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 10 \text{ atm}$
34) $P = 150 \text{ atm}$  $v =$ $T = 470^\circ\text{C}$	34. $v = 0,020 \text{ m}^3/\text{kg}$  $P =$ $T = 60^\circ\text{C}$
35) $P = 2 \text{ atm}$  $T =$ $V = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$ $x =$	35. $v = 0,036 \text{ m}^3/\text{kg}$  $T =$ $P = 6 \text{ atm}$
36) $P = 1 \text{ atm}$  $T =$ $v = 1,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ $x =$	36. $T = 40^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 3 \text{ atm}$
37) $x = 0,7$  $P =$ $v = 0,008 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T =$	37. $T = -30^\circ\text{C}$  $P =$ $V = 0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$
38) $P = 20 \text{ atm}$  $v =$ $X = 1$	38. $v = 0,012 \text{ m}^3/\text{kg}$  $x =$ $T = 24^\circ\text{C}$
39) $v = 0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$  $T =$ $P = 2 \text{ atm}$ $x =$	39. $v = 0,020 \text{ m}^3/\text{kg}$  $P =$ $x = 0,6$ $T =$
40) $T = 500^\circ\text{C}$  $v =$ $P = 50 \text{ atm}$	40. $x = 0,6$  $P =$ $v = 0,09 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T =$
41) $P = 225 \text{ atm}$  $v =$ $T = 430^\circ\text{C}$	41. $P = 4,2 \text{ atm}$  $v =$ $X = 0,65$
42) $P = 1 \text{ atm}$  $?$ $L+V$	42. $T = 40^\circ\text{C}$  $?$ $L+V$

3º (Van Wylen - 2ª ed.) Um reservatório rígido contém água saturada a 1 kgf/cm^2 . Determinar a porcentagem em volume de líquido neste estado de modo que a água passe pelo ponto crítico ao ser aquecida.

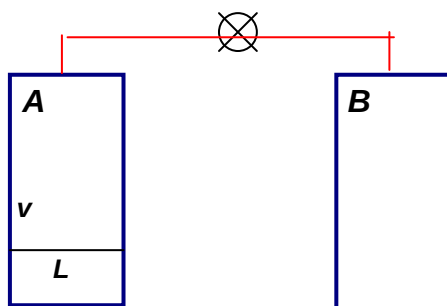
4° (Van Wylen - 2ª ed.) Um tanque contém Freon-12 a 40 °C. O volume do tanque é de 56,75 dm³, e inicialmente o volume de líquido no tanque é igual ao volume de vapor. Uma quantidade adicional de Freon-12 é forçada para dentro do tanque até que a massa de Freon-12 no mesmo atinja 45 kg. Determinar:

- a quantidade de Freon-12, em massa, que entra no tanque;
- o volume final de líquido no tanque, assumindo-se que a temperatura seja mantida em 40 °C.

5° (Van Wylen - 2ª ed.) Uma unidade de refrigeração com 23 dm³ de volume é evacuada, e então, lentamente carregada com Freon-12. Durante esse processo a temperatura do Freon-12 permanece constante na temperatura ambiente de 30 °C.

- Qual será a massa de Freon-12 no sistema quando a pressão atingir 2,4 kgf/cm²?
- Qual será a massa de Freon-12 no sistema quando este estiver cheio com vapor saturado?
- Que fração do Freon-12 estará sob a forma de líquido quando 1,35 kg de Freon-12 tiver sido colocado no sistema?
- Qual a porcentagem em volume de líquido no estado do item anterior?

6° (Van Wylen - 6ª ed.) Considere os dois tanques **A** e **B** ligados por uma válvula. Cada tanque tem um volume de 200 litros. O tanque **A** contém Freon-12 a 25 °C, sendo 10% de líquido e 90% de vapor, em volume, enquanto o tanque **B** está evacuado. A válvula que une os dois tanque é então aberta e vapor saturado sai de **A** até que a pressão em **B** atinja a de **A** neste instante, a válvula é fechada. Esse processo ocorre lentamente, de modo que todas as temperaturas permanecem constantes e iguais a 25 °C durante o processo. Qual é a variação do título no tanque A neste processo? (3.60 – 3.97 – 3.113)



Exercícios Propostos: 3.45 - 3.46 - 3.52 - 3.53 - 3.57 - 3.58 (livro texto-5ª ed.)
3.105 - 3.57 - 3.101 - 3.60 - 3.49 (livro texto - 6ª ed.)
3.119 - 3.53 - 3.54 - 3.62 - 3.57 - 3.52 (livro texto - 7ª ed.)

CALOR E TRABALHO

CAPÍTULO 4

4 CALOR E TRABALHO

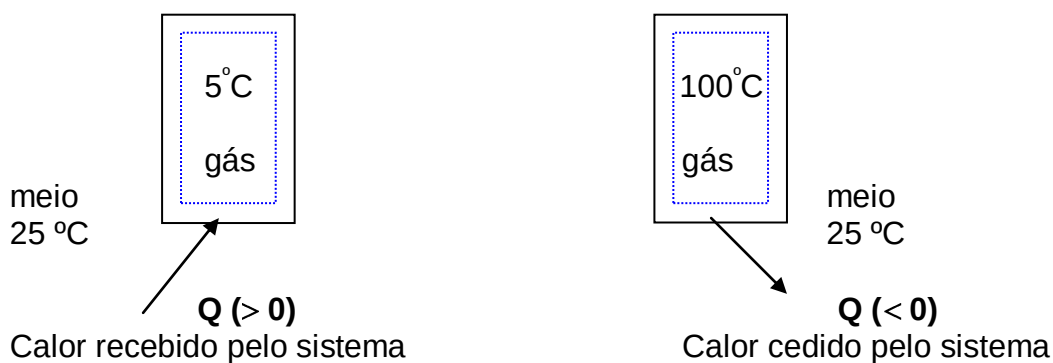
(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

São energias em trânsito através da fronteira do sistema.

4.1 **CALOR** é definido como sendo a forma de energia transferida através da fronteira de um sistema numa dada temperatura, a outro sistema ou meio numa temperatura inferior, em virtude dessa diferença de temperaturas.

Um corpo nunca contém calor, isto é, o calor só pode ser identificado quando atravessa a fronteira do sistema.

Convenção de sinais

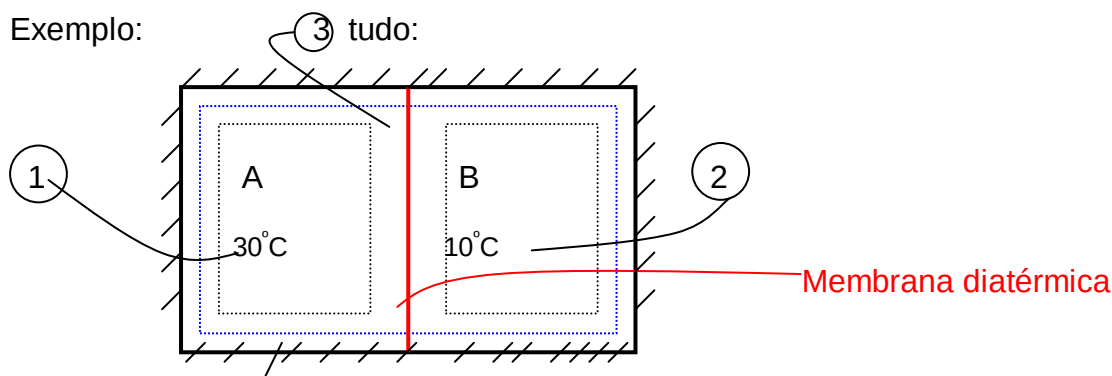


Um processo onde não há troca de calor é chamado.....

CALOR: não é propriedade ($\therefore$ não é f (ponto)) $\Rightarrow$ é função do caminho do processo. É diferencial inexata e uma quantidade elementar de calor é dada por: δQ

$$\int_1^2 \delta Q = Q \quad \text{Unidade: kcal, kJ, ...}$$

Exemplo:



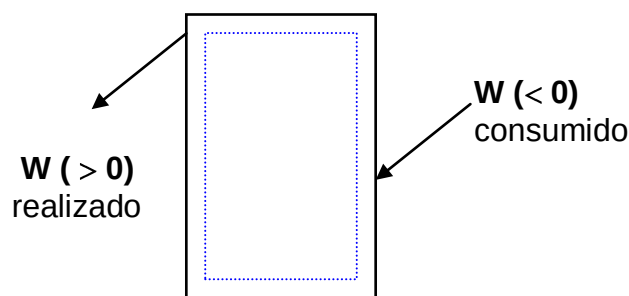
4.2 TRABALHO

Usualmente:

$$\int_1^2 W = F \cdot dz$$

Essa é uma relação que nos permite calcular o trabalho necessário para levantar um peso, esticar um fio, comprimir uma mola etc.

Para a termodinâmica é vantajoso relacionar essa definição de trabalho com os conceitos de sistema, propriedades e processos.

Convenção de sinais

TRABALHO: não é propriedade ($\therefore$ não é f (ponto)) $\Rightarrow$ é função do caminho do processo. É diferencial inexata e uma quantidade elementar de trabalho é dada por: δW

$$\int_1^2 \delta W = W \quad \text{Unidade: kgf.m, kcal, kWh, kJ,...}$$

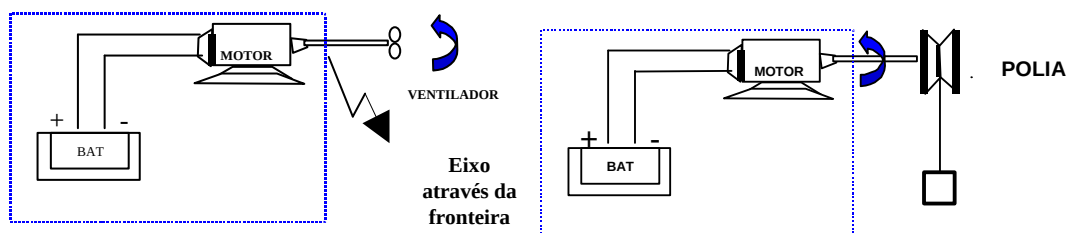
Definição: “*Um sistema realiza trabalho se o único efeito sobre o meio puder ser o levantamento de um peso.*”

Notar que:

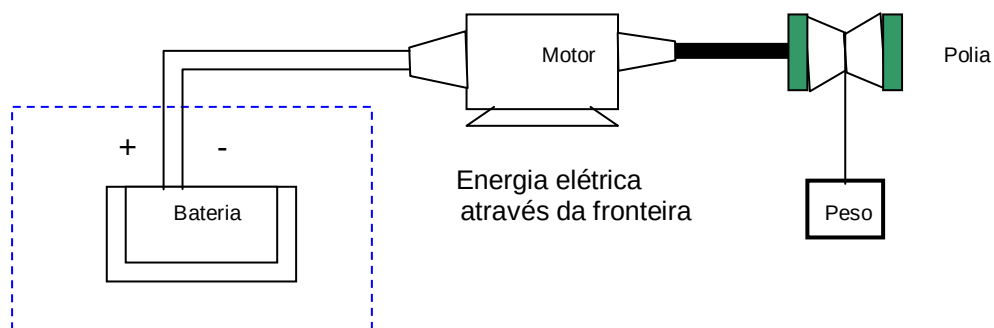
- o levantamento de um peso é, realmente, uma força que age através de uma distância;
- a definição não afirma que um peso foi realmente levantado ou que uma força agiu através de uma distância, mas que, o único efeito externo ao sistema poderia ser o levantamento de um peso.

4.2.1 Exemplos

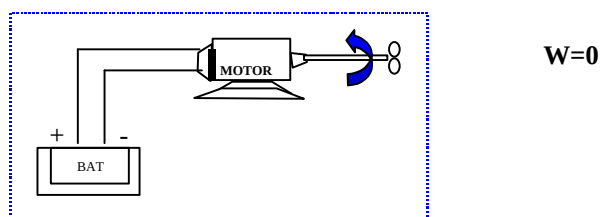
1 Sistema: Bateria + Motor



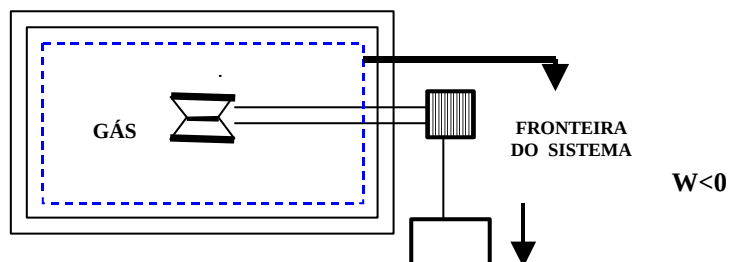
2 Sistema: Só a Bateria



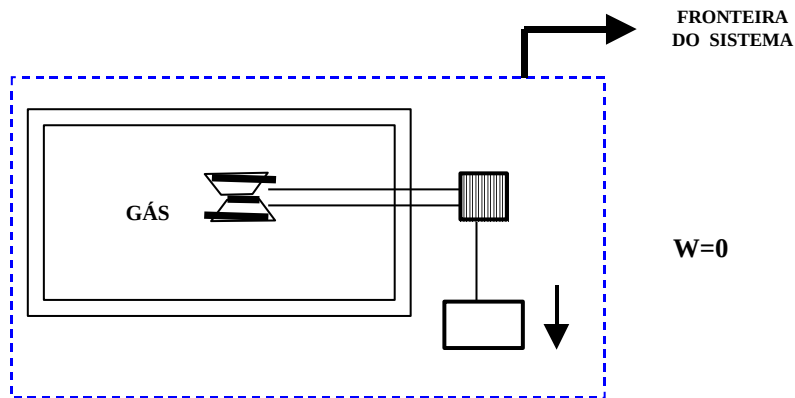
3 Sistema: Bateria + Motor + Ventilador



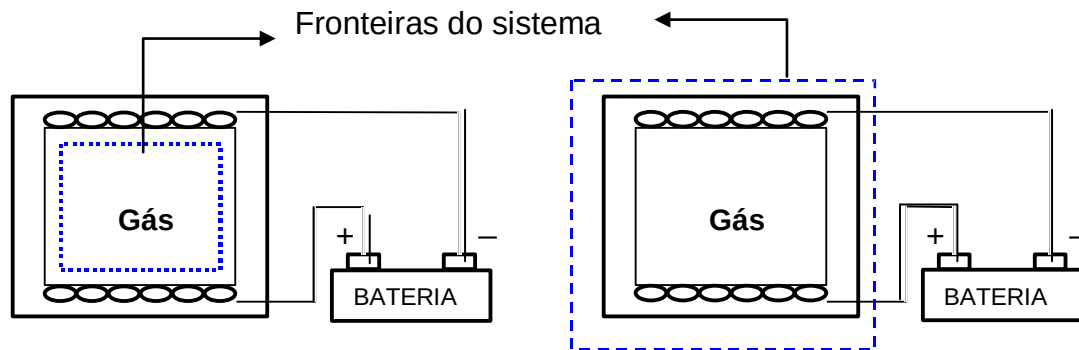
4 Sistema: O recipiente



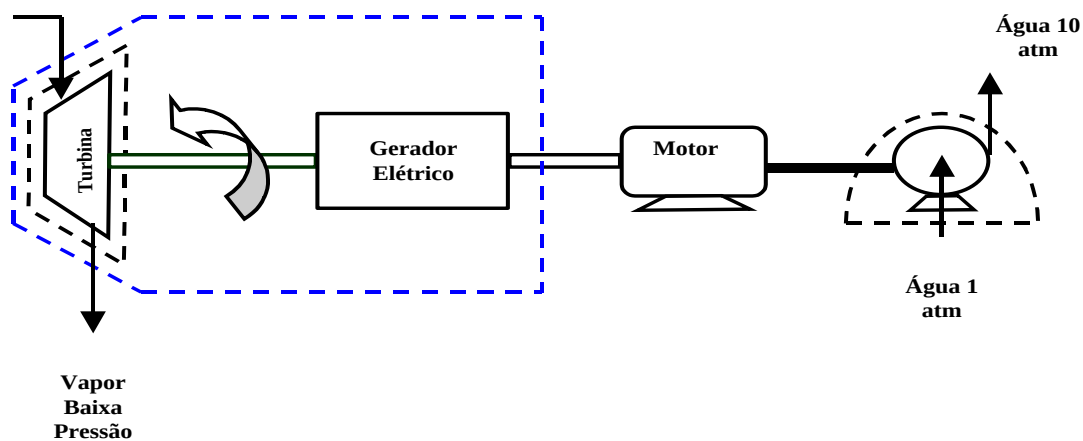
5 Sistema: O conjunto todo



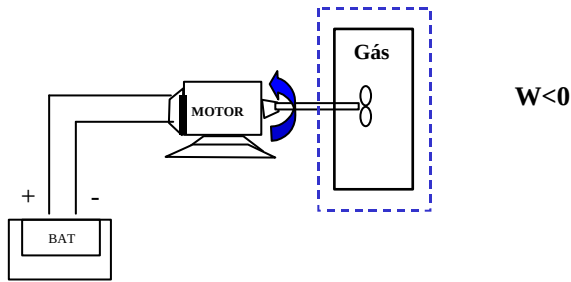
- 6 Sistema: O Gás $\Rightarrow Q$
 Sistema: Gás + Resistência $\Rightarrow W$



- 7 Sistema: Turbina $\Rightarrow W > 0$ (realizado pelo sistema)
 Sistema: Turbina + Gerador $\Rightarrow W > 0$
 Sistema: Tudo $\Rightarrow W=0$
 Sistema: A bomba $\Rightarrow W < 0$ (consumido pelo sistema)

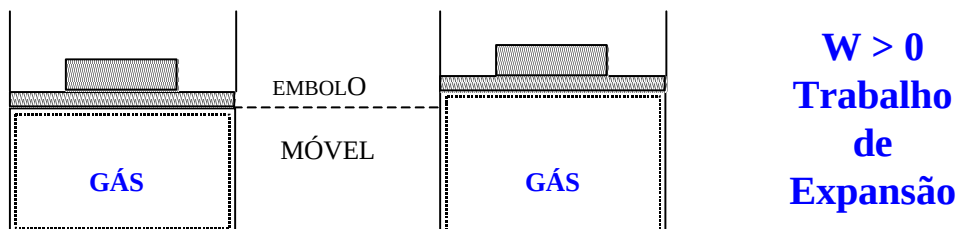


8 Sistema: O tanque (Sua temperatura aumenta de $T_1 \longrightarrow T_2$ pelo atrito com as pás)



9 Expansão de um gás

Sistema: O Gás



4.2.2 Trabalho de Expansão

$$W = \int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{z} = \int_1^2 \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{dV}{A} \Rightarrow W = \int_1^2 P \cdot dV$$

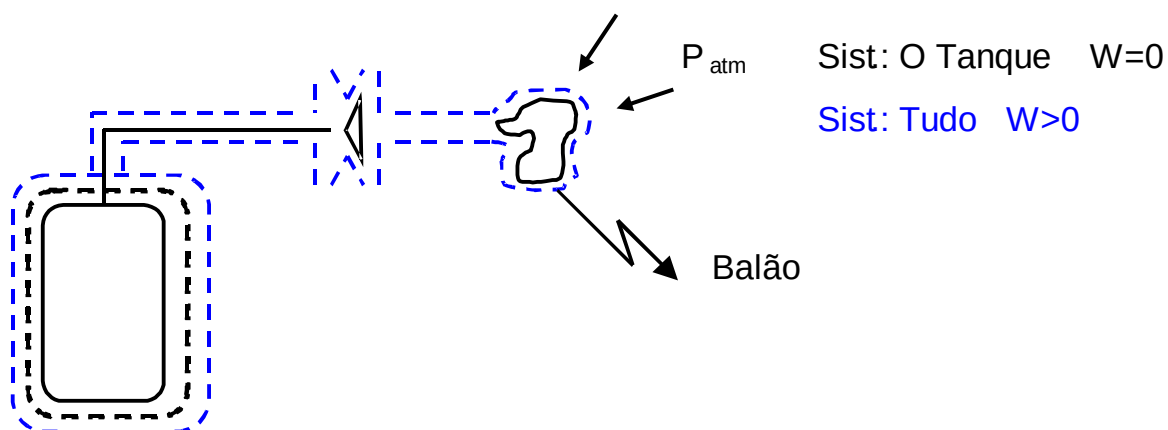
- Expansão não-resistida



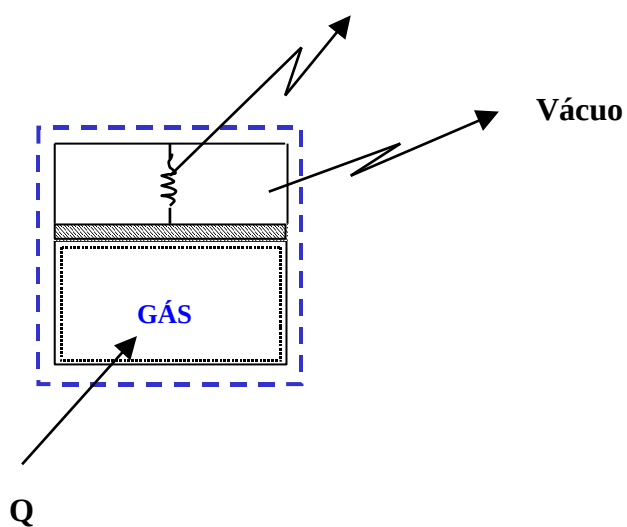
$$W = 0$$

- não vale a integral de PdV
- não é quase estática
- $dV \neq 0$, mas $P_{\text{ext}} = 0$ (sem resistência)

10 Sistema: Tanque Enchendo um Balão



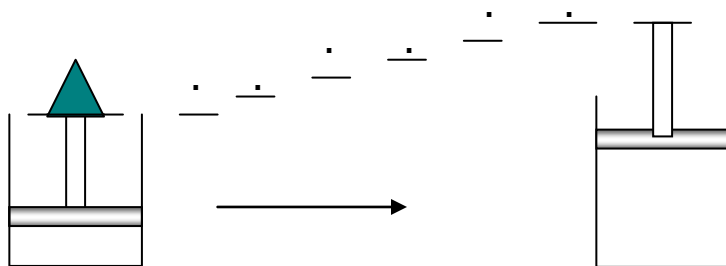
- 11 Sistema: O gás $\Rightarrow W > 0$
Sistema: O tanque $\Rightarrow W = 0$

**IMPORTANTE:**

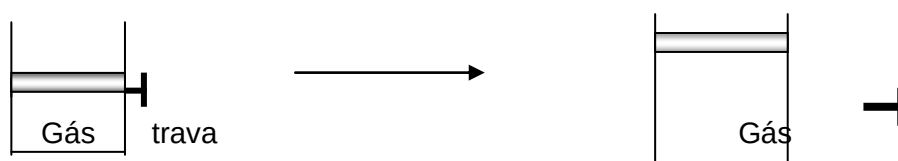
Vai existir trabalho quando houver:

- um eixo atravessando a fronteira do sistema;
- energia elétrica atravessando a fronteira do sistema;
- expansão.

- Processo quase estático



- Processo não quase estático



$$P = [\text{N/m}^2] ; [v = \text{m}^3/\text{kg}]$$

$$W = \text{N.m} = \text{Joule}$$

$$W = \text{J/s} = \text{Watt}$$

$$P = [\text{kgf/m}^2] ; v = [\text{m}^3/\text{kg}]$$

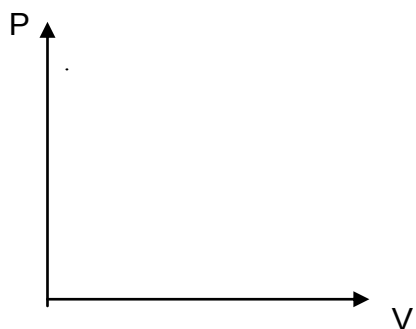
$$W = \text{kgf.m}$$

4.2.3 Cálculo do trabalho de expansão:

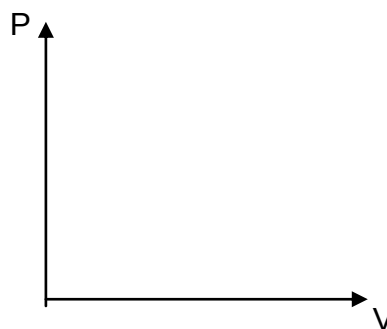
- **Analiticamente:** $W = \int_1^2 P \cdot dV$

- **Graficamente:**

Exemplo 1

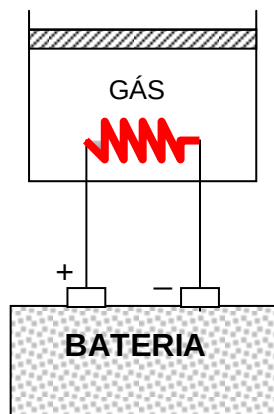


Exemplo 2



4.3 Exercícios:

1º Determine quais são as energias em trânsito através das seguintes fronteiras do sistema, da figura abaixo:

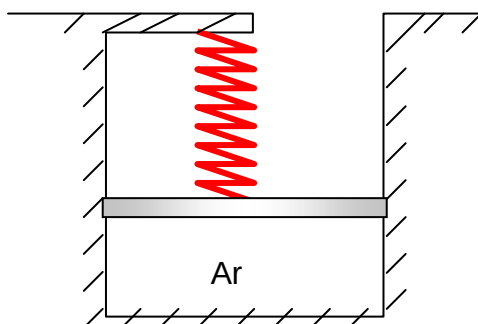


- 1) Bateria:
- 2) Gás:
- 3) Resistência:

2º (Van Wylen – 2ª ed.) Um cilindro com um êmbolo móvel contém 2,5 kg de vapor d'água saturado a pressão de 10 kgf/cm^2 . Esse sistema é aquecido a pressão constante, até que a temperatura do vapor atinja 260°C . Calcular o trabalho realizado pelo vapor durante o processo.

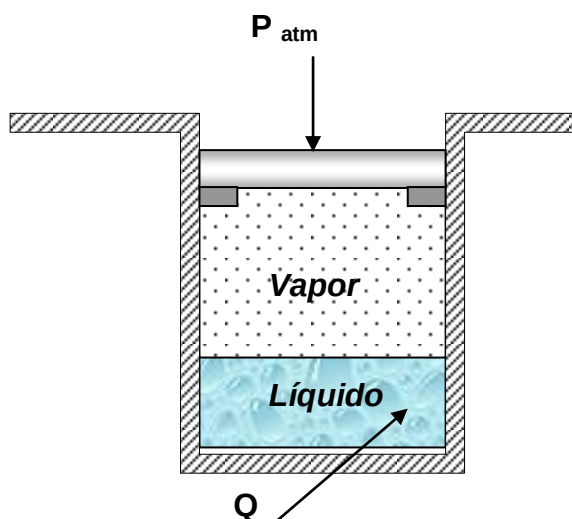
3º (Van Wylen – 2ª ed.) Considere-se o sistema mostrado na figura abaixo. O volume inicial dentro do cilindro é $0,03 \text{ m}^3$. Nesse estado, a pressão interna é de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$, suficiente para contrabalançar a pressão atmosférica externa e o peso do êmbolo; a mola toca o êmbolo, mas não exerce nenhuma força sobre o mesmo nesse estado. O gás é, então, aquecido até que o volume seja o dobro do inicial. A pressão final do gás é $3,5 \text{ kgf/cm}^2$ e, durante o processo, a força da mola é proporcional ao deslocamento do êmbolo a partir da posição inicial.

- a) Mostrar o processo num diagrama $P \times V$;
- b) Considerando o gás interno como sistema, calcular o trabalho realizado por este. Que porcentagem é realizada contra a ação da mola?



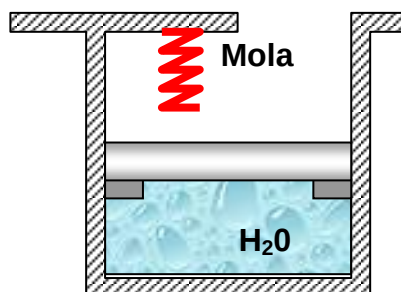
4° (Van Wylen – 2ª ed.) O cilindro mostrado na figura abaixo contém 0,1 kg de água saturada a 30 °C. O êmbolo tem uma área seccional de 400 cm², uma massa de 60 kg e repousa sobre os esbarros como mostrado. O volume nesse ponto é 0,02 m³. A pressão atmosférica externa é de 0,98 kgf/cm² e a aceleração da gravidade local é 9,75 m/s². Transfere-se calor ao sistema até que o cilindro contenha vapor saturado. Pede-se:

- Qual é a temperatura da água quando o êmbolo deixa o esbarro?
- Calcular o trabalho realizado pela água durante todo o processo?



5° (Van Wylen – 2ª ed.) Considere o arranjo cilindro-êmbolo mostrado na figura abaixo, no qual um êmbolo sem atrito, com área seccional de 650 cm², repousa sobre os esbarros nas paredes do cilindro de modo que o volume contido seja de 30 dm³. A massa do êmbolo é tal que uma pressão de 3,5 kgf/cm² é necessária para levantar o êmbolo contra a pressão atmosférica. Quando o êmbolo atinge um ponto onde o volume contido é de 75 dm³, ele encontra uma mola linear que requer 350 kgf para deflexão de 1cm. Inicialmente, o cilindro contém 5 kg de água saturada a 38 °C. Para esse processo determine:

- Determine o trabalho realizado pela água
- Determine a temperatura final (se superaquecida) ou o título (se saturada) da água.



Exercícios Propostos: 4.7 - 4.23 - 4.24 - 4.44 - 4.46 (livro texto – 5ª ed.)
 4.64 - 4.110 - 4.68 - 4.115 - 4.42 (livro texto – 6ª ed.)
 4.67 - 4.118 - 4.72 - 4.129 - 4.38 (livro texto – 7ª ed.)

1ª LEI DA TERMODINÂMICA

CAPÍTULO 5

5 1ª LEI DA TERMODINÂMICA (Lei da Conservação da Energia)

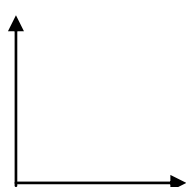
(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

Principais Aplicações na Engenharia

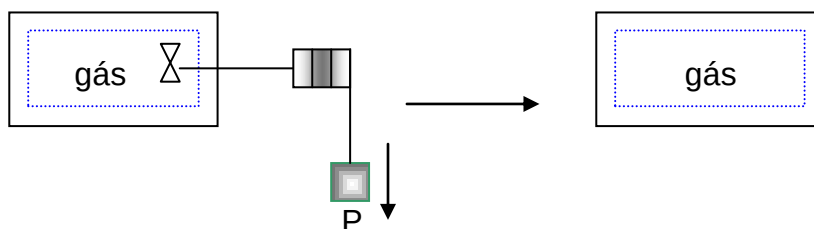
- ❑ Usinas Termelétricas
- ❑ Sistemas Industriais de Cogeração
- ❑ Sistemas de Ar Condicionado e Refrigeração
- ❑ Motores de Combustão Interna (automóveis etc.)
- ❑ Turbinas de avião

5.1 1ª Lei da Termodinâmica para um sistema percorrendo um ciclo.

A 1ª Lei estabelece que durante qualquer ciclo:

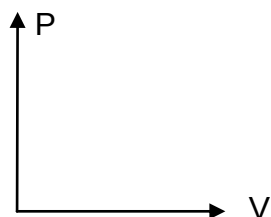

$$\int \delta Q = \int \delta W \quad \text{kcal} = \frac{\text{kgf.m}}{427}$$

Exemplo:



Esse sistema vai completar um ciclo que envolve dois processos. No 1º trabalho é fornecido ao sistema pelas pás que giram, a medida que o peso desce. A seguir o sistema volta ao seu estado inicial pela transferência de calor do sistema, até que o ciclo seja completado.

5.2 1ª Lei para processos não cíclicos de sistemas fechados



Consideremos um sistema que percorre um ciclo mudando do Estado **1** para o Estado **2** percorrendo o caminho **A** e voltando de **2** para **1**, pelo caminho **B**:

I

Considerando que ele vá, agora, de **1** para **2** por **A** e volte por **C**:

II

Subtraindo II de I:

Visto que **B** e **C** representam processos entre os estados **1** e **2**, concluímos que a diferença ($\delta Q - \delta W$) é a mesma para todos os processos entre os estados **1** e **2**. Em consequência ($\delta Q - \delta W$) depende somente dos estados inicial e final e não do caminho percorrido entre os dois estados. É $f(\text{ponto})$ e $\therefore$ diferencial de uma propriedade do sistema: energia total do sistema: **E**

$$\delta Q - \delta W = dE \quad \xrightarrow{\text{integrando}} \quad {}_1Q_2 - {}_1W_2 = E_2 - E_1$$

E: representa toda energia de um sistema num dado estado:.....

Na termodinâmica: separar E_{cin} e E_{pot} e considerar toda energia do sistema em uma única propriedade: energia interna **U**.

$$E = U + E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} \Rightarrow dE = dU + dE_{\text{cin}} + dE_{\text{pot}} \quad \text{substituindo na 1ª Lei:}$$

$$\delta Q - \delta W = dU + dE_{\text{cin}} + dE_{\text{pot}} \quad \text{integrando:}$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}} \quad \text{hipóteses:}$$

.....
.....

5.3 Energia Interna

U : propriedade extensiva [kcal] ; [kJ]

$\frac{U}{m} = u$ energia interna específica [kcal/kg] ; [kJ/kg]

5.3.1 Caso particular: - processo a P constante
- desprezando efeitos cinéticos e potenciais

1) Sistema:

2) Estados:

3) Trabalho:

$$W = \int P \cdot dV$$

4) 1ª Lei:

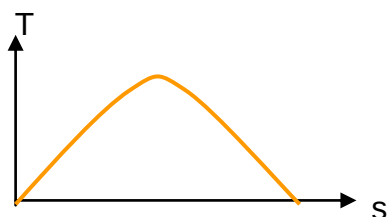
$$Q - W = \Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}}$$

5.4 Entalpia

H: propriedade extensiva [kcal] ; [kJ]

$\frac{H}{m} = h$: entalpia específica [kcal/kg] ; [kJ/kg]

(:m) $H = U + PV$ (:m) 

5.5 Diagrama $t \times s$ do vapor d'água5.6 Diagrama $P \times h$ do Freon-12

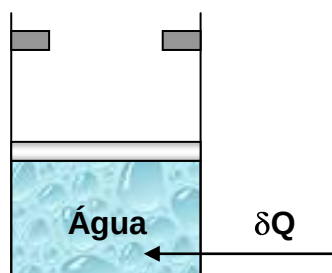
5.7 Exercícios:

1º (Van Wylen - 2ª ed.) Uma caldeira a vapor tem um volume de $2,27 \text{ m}^3$ e contém inicialmente $1,7 \text{ m}^3$ de vapor em equilíbrio a 1 kgf/cm^2 . A caldeira é acesa e é transferido calor para a água e vapor. De alguma maneira, as válvulas de admissão e descarga foram deixadas ambas fechadas. A válvula de segurança se abre quando a pressão atinge 55 kgf/cm^2 . Que quantidade de calor foi transferida para água e vapor, antes da abertura da válvula de segurança?

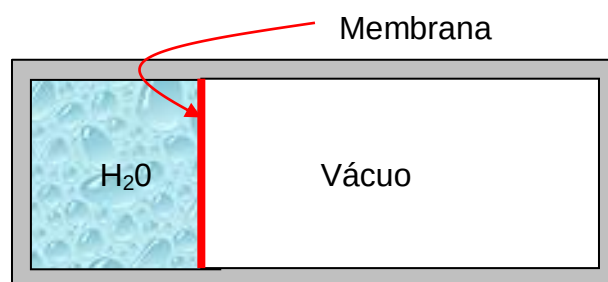
2º (Van Wylen - 2ª ed.) Um radiador de um sistema de aquecimento a vapor tem um volume de $0,020 \text{ m}^3$. Quando o radiador é cheio com vapor saturado a pressão de $1,4 \text{ kgf/cm}^2$, todas as válvulas para o mesmo são fechadas. Qual a quantidade de calor transferida do compartimento até que a pressão do vapor atinja $0,70 \text{ kgf/cm}^2$?

3º (Van Wylen - 2ª ed.) $2,3 \text{ kg}$ de água a 15°C são contidos num cilindro vertical por um êmbolo sem atrito, que tem uma massa tal que a pressão da água é $6,8 \text{ kgf/cm}^2$. Transfere-se lentamente calor para a água fazendo com que o êmbolo suba até atingir os batentes, quando então o volume interno do cilindro é de $0,425 \text{ m}^3$. Transfere-se, então, mais calor a água até que seja atingido o estado de vapor saturado.

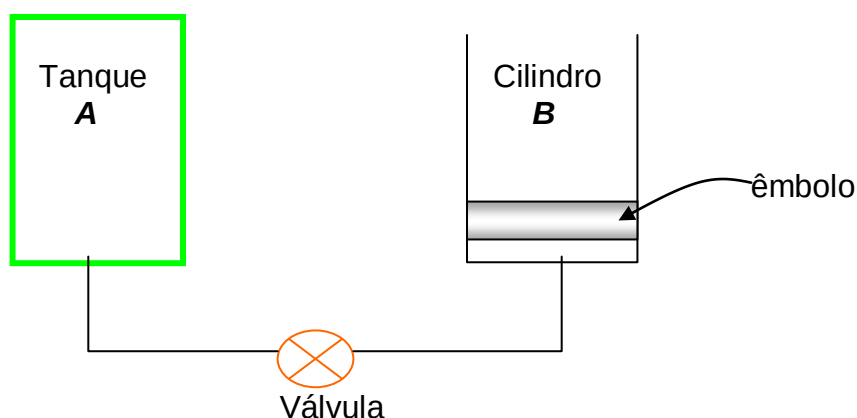
- a) Determine a pressão final no cilindro, o trabalho realizado durante o processo e o calor transferido.



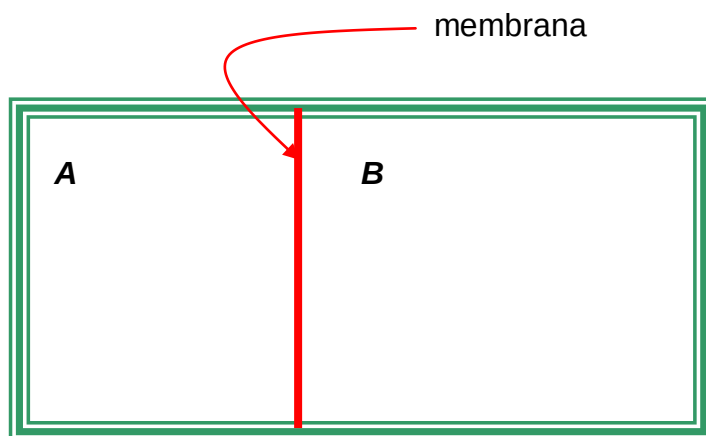
4º (Van Wylen - 2ª ed.) Considere o recipiente isolado da figura abaixo. Ele possui um compartimento em vácuo separado por uma membrana de um segundo compartimento que contém 500 g de água a 65 °C, 7 kgf/cm². A membrana se rompe e a água enche todo o volume com uma pressão resultante de 0,14 kgf/cm². Determinar a temperatura final da água e o volume do recipiente.



5º (Van Wylen - 2ª ed.) Considere o sistema mostrado na figura abaixo. O tanque **A** tem um volume de 140 litros e contém Freon-12 em vapor saturado a 27 °C. Quando a válvula é aberta o Freon escoa lentamente para o cilindro **B**. A massa do êmbolo é tal que é necessária uma pressão de 1,4 kgf/cm² para levantá-lo contra a atmosfera. Durante o processo é trocado calor com o meio de modo que a temperatura do Freon sempre permanece em 27 °C. Calcular a quantidade de calor transferida.

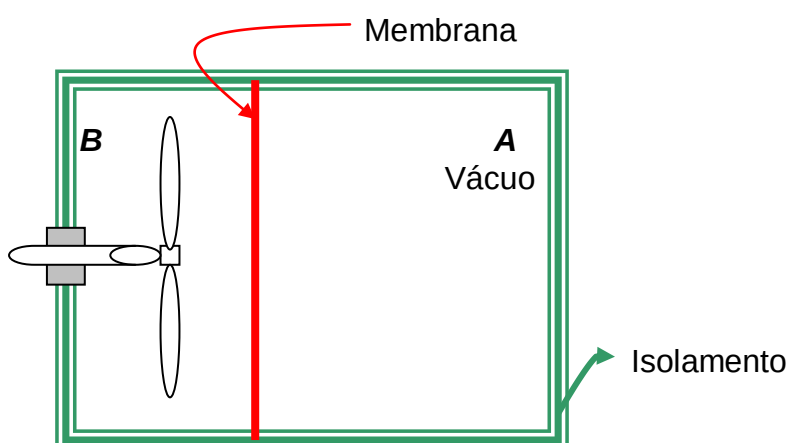


6º (Van Wylen - 6ª ed.) A figura mostra um tanque que está dividido em duas regiões por meio de uma membrana. A região A apresenta $V_A = 1 \text{ m}^3$ e contém água a 200 kPa e com $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$. A região B contém 3,5 kg de água a 400 °C e 0,5 MPa. A membrana é, então, rompida e espera-se que seja estabelecido o equilíbrio. Sabendo que a temperatura final do processo é 100 °C, determine a transferência de calor que ocorre durante o processo.



7º (Van Wylen - 2ª ed.) Considere o recipiente isolado mostrado na figura abaixo com o compartimento **A** de volume 30 litros, separado por uma membrana do compartimento **B** de volume 14 litros, o qual contém 1 kg de Freon-12 a 27 °C é agitado por um ventilador até que a membrana se rompa. A membrana é projetada de modo a romper-se a 20 kgf/cm².

- Qual a temperatura quando a membrana se rompe?
- Calcular o trabalho realizado pelo ventilador
- Determinar a pressão e a temperatura após a membrana se romper e o Freon -12 atingir o equilíbrio termodinâmico.



Exercícios Propostos: 5.18 - 5.20 - 5.29 - 5.37 - 5.38 - 5.40 - 5.45 (livro texto – 5ª ed.)
 5.134 - 5.64 - 5.127 - 5.58 - 5.62 - 5.131 - 5.132 (livro texto – 6ª ed.)
 5.171 - 5.70 - 5.161 - 5.61 - 5.165 - 5.167 - 5.166 - 5.160 - 5.72 (livro texto – 7ª ed.)

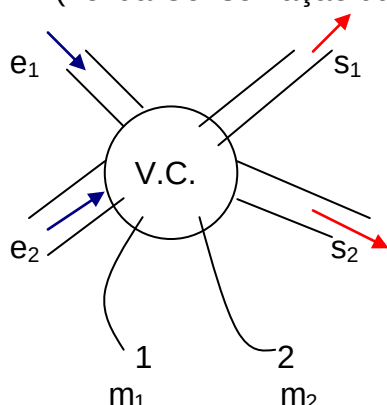
1ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA VOLUME DE CONTROLE

CAPÍTULO 6

6. 1ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA VOLUME DE CONTROLE

(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

6.1 Equação da Continuidade (Lei da Conservação da Massa)

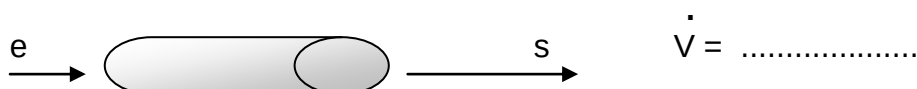


m_1 :
 $\sum m_e$:
 $\sum m_s$:
 m_2 :

.....

Equação sob a forma de velocidade:

Onde: $\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_e}{dt} = \dot{m}_e \\ \frac{dm_s}{dt} = \dot{m}_s \end{array} \right.$



como: $\dot{m} = \dots\dots\dots$

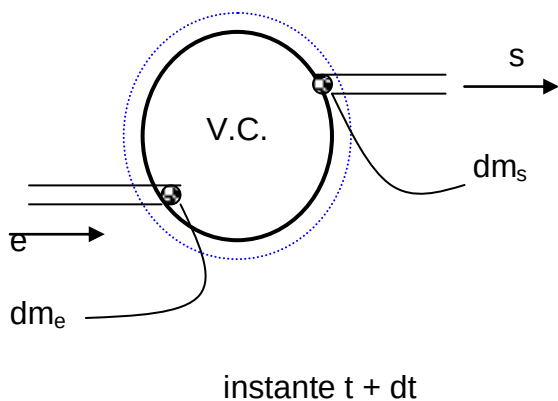
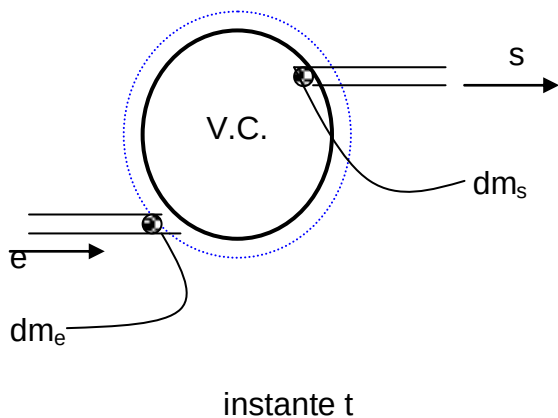
$\Rightarrow$

$\dot{m} =$

6.1.1 CASO PARTICULAR: **REGIME PERMANENTE**

$$\frac{dm_{V.C.}}{dt} = 0 \quad \therefore \quad \boxed{}$$

6.2 1ª Lei da Termodinâmica para V.C. (Sistema aberto)



Considere o sistema fechado



Aplicando a 1ª lei:.....

Sistema Fechado	Sistema Aberto
Q	
W	
d U	
d E _c	
d E _p	

[illegible]

$$Q - W = (\Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{V.C.}} + (\Delta H + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{corr}}$$

6.2.1 CASO PARTICULAR: REGIME PERMANENTE

$$Q - W = (\Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{v.c.}} + (\Delta H + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{corr}}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta H + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}}$$

hipóteses:

.....

.....

.....

6. 3 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA

TURBINAS



Fonte: Catálogo Siemens (2009)

CALDEIRA



Fonte: Steammaster (2009)

Disponível em: <http://www.steammaster.com.br/index.php?pag=whGculXdvZ2XzFmcpVGZsF2Y>

CONDENSADOR



Fonte: Thermokey (2009)

Disponível em: http://www.thermokey.com.br/braprod_evaporador.asp

RADIADOR



Fonte: Allfordmustangs (2009)

Disponível em: <http://www.allfordmustangs.comforumsattachmentsmexico-latin-america33615d1190659394-preventa-radiadores-mustang-65-93-100-aluminio-mustang-79-93.jpg>

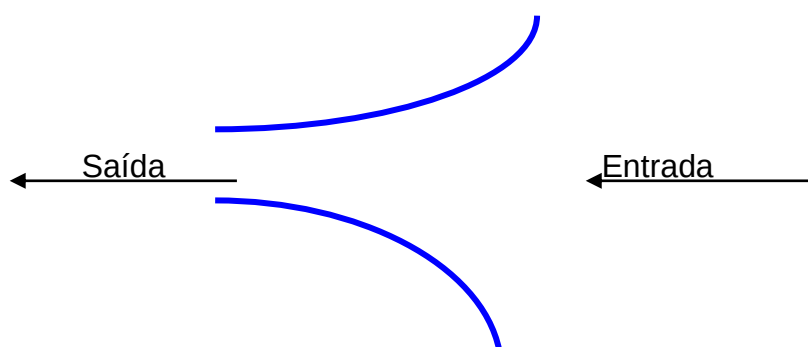
BOMBAS



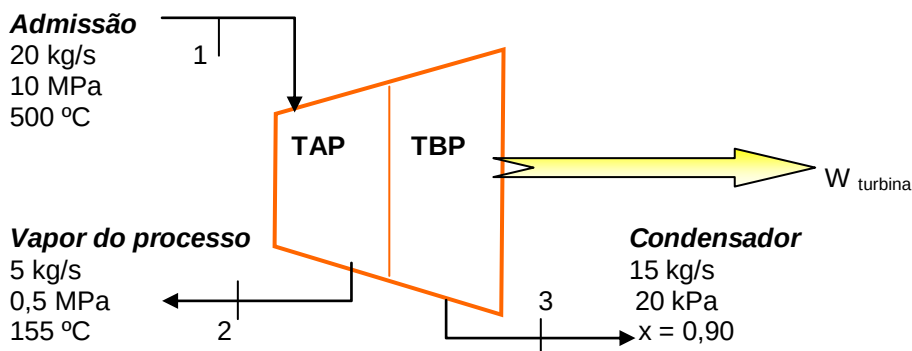
Fonte: OMEL BOMBAS (2009)

6.4 Exercícios:

1º (Van Wylen – 2ª ed.) Vapor entra no bocal de uma turbina à baixa velocidade, 27 atm, 315 °C e sai do mesmo a 17 atm com uma velocidade de 450 m/s. O fluxo de vapor é de 1500 kg/h. Calcular o título ou a temperatura do vapor ao deixar o bocal e a área de saída deste.

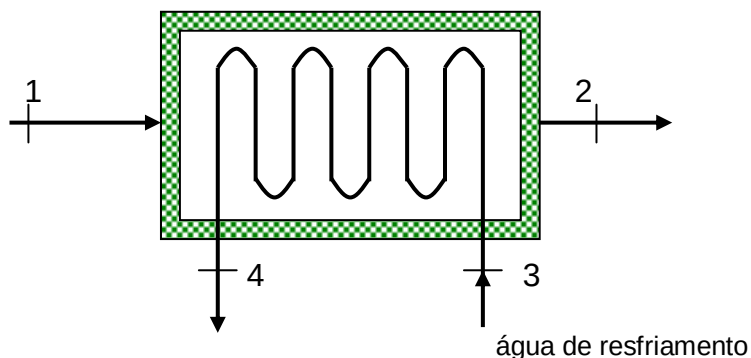


2º (Van Wylen – 4ª ed.) A cogeração é normalmente utilizada em processos industriais que apresentam consumo de vapor d' água a várias pressões. Admita que, num processo, existe a necessidade de uma vazão de 5 kg/s de vapor a 0,5 MPa. Em vez de gerar este insumo, utilizando um conjunto bomba-caldeira independente, propõe-se a utilização da turbina mostrada na figura. Determine a potência gerada nesta turbina.



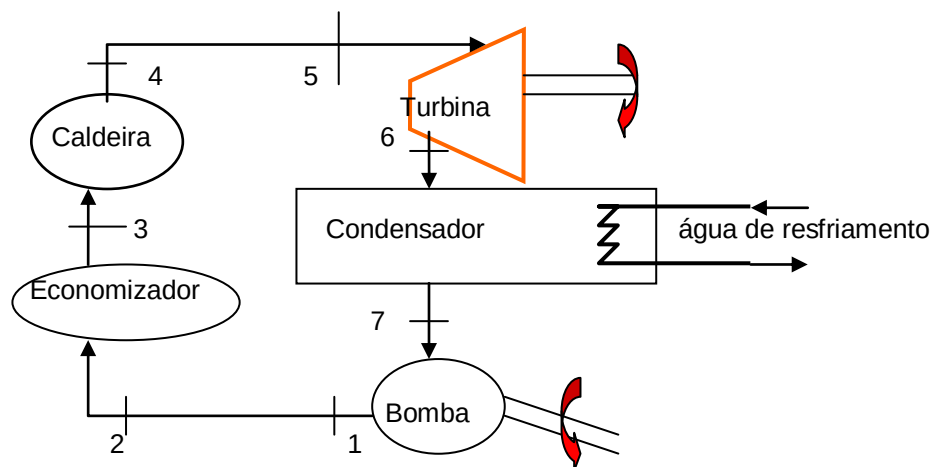
3º (Van Wylen – 4ª ed.) O dessuperaquecedor é um equipamento no qual ocorre a mistura vapor superaquecido com líquido numa relação tal que se obtém vapor saturado na seção de saída do equipamento. Um dessuperaquecedor é alimentado com uma vazão de 0,5 kg/s de vapor d' água superaquecido a 3,5 MPa e 400 °C e a alimentação de água líquida ocorre a 3,5 MPa e 40 °C. Sabendo que a transferência de calor no equipamento é desprezível e que, na seção de saída, a pressão do vapor saturado é 3 MPa, determine a vazão de água necessária na unidade de dessuperaquecimento.

4° (Van Wylen – 4ª ed.) A figura abaixo mostra o esboço de um condensador não misturado (trocador de calor) que é alimentado com 0,1 kg/s de água a 300 °C e 10 kPa e descarrega líquido saturado a 10 kPa. O fluido de resfriamento é água obtida num lago a 10 °C, que sai do condensador a 16° C. Sabendo que a superfície externa do condensador é isolada, calcule a vazão da água de resfriamento.



5° (Van Wylen – 2ª ed.) Os seguintes dados aplicam-se à instalação motora a vapor mostrada na figura abaixo, calcular:

- Potência produzida pela turbina;
- Calor transferido por hora no condensador, economizador e caldeira;
- Diâmetro do tubo que liga a turbina ao condensador;
- Litros de água de resfriamento por minuto através do condensador, sabendo-se que a temperatura da mesma cresce de 13 °C para 24 °C ao atravessar o condensador.
- O rendimento térmico do ciclo.



Potência da Bomba: 400 HP	$P_1 = 61 \text{ kgf/cm}^2$	$P_5 = 50 \text{ kgf/cm}^2$; $T_5 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$
Diâmetro dos tubos:	$P_2 = 60 \text{ kgf/cm}^2$; $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_6 = 0,10 \text{ kgf/cm}^2$ $x_6 = 0,92$; $V_6 = 200 \text{ m/s}$
Caldeira para turbina = 20 cm	$P_3 = 58 \text{ kgf/cm}^2$; $T_3 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_7 = 0,075 \text{ kgf/cm}^2$; $T_7 = 40,29 \text{ }^\circ\text{C}$
Condensador para caldeira = 7,5 cm	$P_4 = 50 \text{ kgf/cm}^2$; $T_4 = 510 \text{ }^\circ\text{C}$	Fluxo de vapor = 90.000 kg/h

6º (Van Wylen – 2ª ed.) Conhecem-se os seguintes dados para o ciclo de refrigeração a Freon-12 mostrado na figura abaixo:

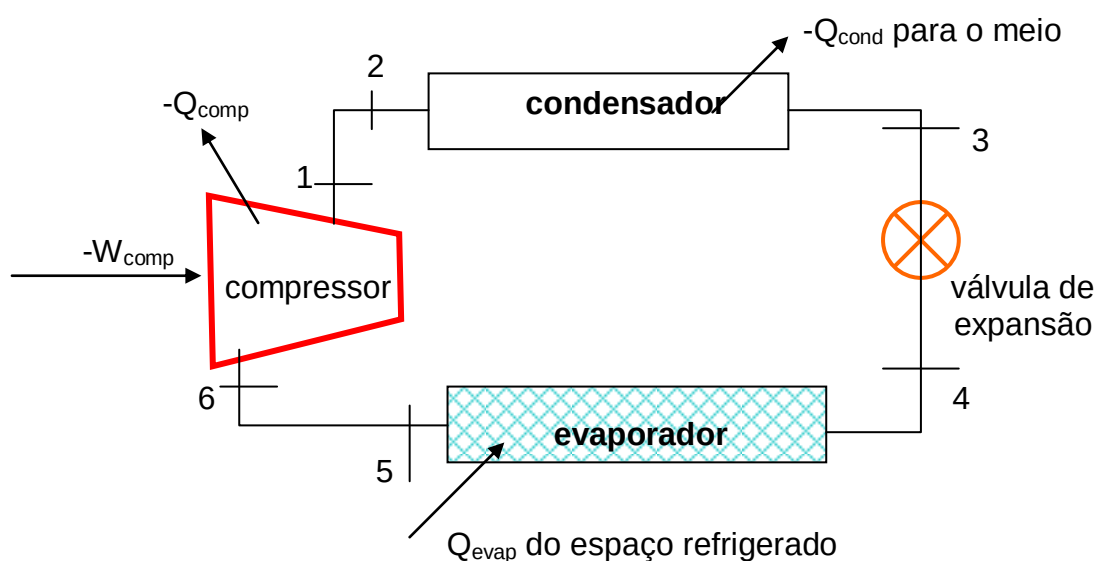
$P_1 = 12 \text{ kgf/cm}^2$	$T_1 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_2 = 11,8 \text{ kgf/cm}^2$	$T_2 = 105 \text{ }^\circ\text{C}$
$P_3 = 11,6 \text{ kgf/cm}^2$	$T_3 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_4 = 2 \text{ kgf/cm}^2$	
$P_5 = 1,8 \text{ kgf/cm}^2$	$T_5 = -7 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_6 = 1,6 \text{ kgf/cm}^2$	$T_6 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$

Fluxo de Freon = 100 kg/h

Potência do compressor = 2,5 HP

Calcular:

- O calor transferido por hora pelo compressor
- O calor transferido por hora pelo Freon no condensador
- O calor transferido por hora ao Freon no evaporador



7º (Provão MEC - Eng. Química -1997) Uma caldeira produz 1.000 kg/h de vapor saturado a uma pressão de $3,0 \text{ kgf/cm}^2$ absoluta. A caldeira é simultaneamente alimentada com água a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e com 800 kg/h de condensado a $120 \text{ }^\circ\text{C}$, que retorna do processo, como mostra a figura abaixo. Calcular a carga térmica (calor cedido à caldeira) para a produção do vapor desejado. A purga retira 20 kg/h de líquido da caldeira.

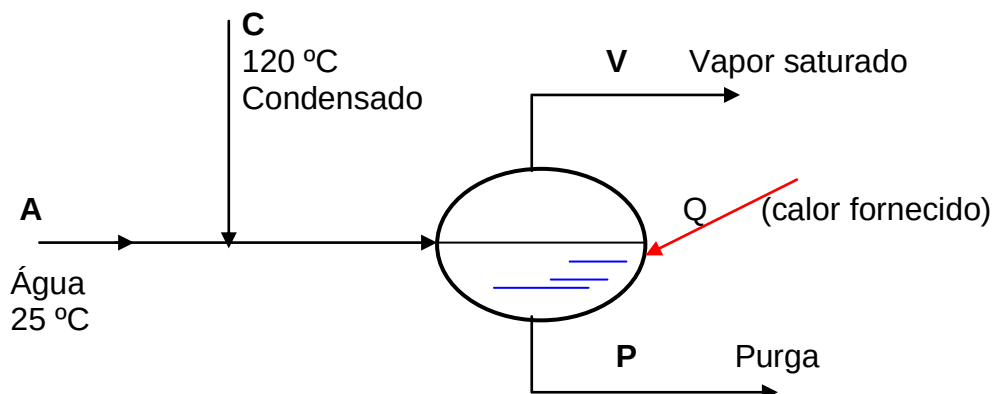
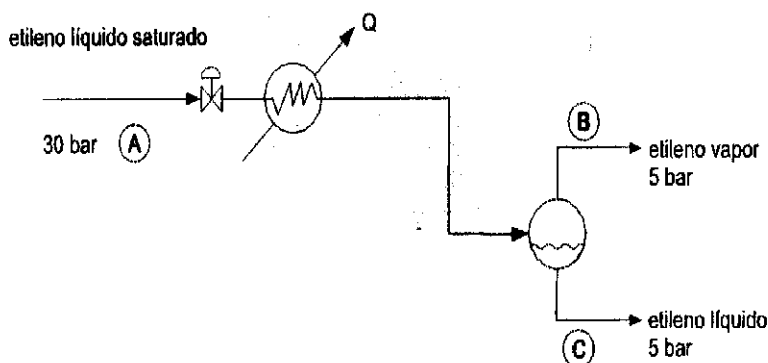


Tabela para vapor saturado de água								
Pressão (Absoluta)	Temperatura de Vaporização	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		Do líquido saturado	Do vapor saturado	Do líquido Saturado	Acréscimo na Vaporização	Do vapor saturado	Do líquido saturado	Do vapor saturado
P	T_v	V_f	V_g	h_f	h_{fg}	h_g	S_f	S_g
Kgf/cm ²	° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg °C	kcal/kg °C
0.01	6.7	0.0010	131.6	6.7	593.5	600.2	0.0243	2.1450
0.02	17.2	0.0010	68.27	17.2	587.6	604.8	0.0612	2.0848
0.03	23.8	0.0010	46.53	23.8	583.9	607.7	0.0835	2.0499
0.04	28.6	0.0010	35.46	28.7	581.1	609.8	0.0998	2.0253
0.05	32.6	0.0010	28.73	32.5	579.0	611.5	0.1126	2.0063
0.06	35.8	0.0010	24.19	35.8	577.1	612.9	0.1232	1.0908
0.07	38.7	0.0010	20.92	38.6	575.5	614.1	0.1323	1.9778
0.08	41.2	0.0010	18.45	41.1	574.1	615.2	0.1404	1.9665
0.09	43.4	0.0010	16.51	43.4	572.7	616.1	0.1474	1.9566
0.10	45.5	0.0010	14.95	45.4	571.6	617.0	0.1538	1.9478
0.15	53.6	0.0010	10.21	53.5	566.9	620.4	0.1790	1.9139
0.20	59.7	0.0010	7.794	59.6	563.4	623.0	0.1974	1.8899
0.25	64.6	0.0010	6.321	64.5	560.5	625.0	0.2119	1.8715
0.30	68.7	0.0010	5.328	68.6	558.0	626.6	0.2241	1.8564
0.40	75.4	0.0010	4.068	75.4	553.9	629.3	0.2436	1.8328
0.50	80.9	0.0010	3.301	80.8	550.7	631.5	0.2591	1.8145
0.60	85.5	0.0010	2.782	85.4	547.9	633.3	0.2720	1.7996
0.70	89.5	0.0010	2.408	89.4	545.4	634.8	0.2832	1.7871
0.80	93.0	0.0010	2.125	93.0	543.2	636.2	0.2929	1.7762
0.90	96.2	0.0010	1.904	96.2	541.2	637.4	0.3017	1.7667
0.95	97.7	0.0010	1.810	97.7	540.2	637.9	0.3057	1.7623
1.0	99.1	0.0010	1.725	99.1	539.3	638.4	0.3095	1.7582
1.1	101.8	0.0010	1.578	101.8	537.6	639.4	0.3167	1.7504
1.2	104.3	0.0010	1.454	104.3	536.0	640.3	0.3234	1.7434
1.3	106.6	0.0010	1.349	106.7	534.5	641.2	0.3296	1.7370
1.4	108.7	0.0011	1.259	108.9	533.0	641.9	0.3353	1.7310
1.5	110.8	0.0011	1.180	110.9	531.8	642.7	0.3407	1.7255
1.6	112.7	0.0011	1.111	112.9	530.5	643.4	0.3458	1.7203
1.7	114.6	0.0011	1.050	114.8	529.2	644.0	0.3506	1.7154
1.8	116.3	0.0011	0.9950	116.6	528.0	644.6	0.3552	1.7109
1.9	118.8	0.0011	0.9459	118.3	526.9	645.2	0.3596	1.7065
2.0	119.6	0.0011	0.9015	119.9	525.9	645.8	0.3637	1.7024
2.1	121.2	0.0011	0.8612	121.4	524.9	646.3	0.3677	1.6985
2.2	122.6	0.0011	0.8245	122.9	523.9	646.8	0.3715	1.6948
2.3	124.1	0.0011	0.7909	124.4	522.9	647.3	0.3752	1.6915
2.4	125.5	0.0011	0.7600	125.8	522.0	647.8	0.3787	1.6879
2.5	126.8	0.0011	0.7315	127.2	521.0	648.2	0.3821	1.6848
2.6	128.1	0.0011	0.7051	128.5	520.1	648.6	0.3854	1.6815
2.7	129.3	0.0011	0.6805	129.8	519.2	649.0	0.3885	1.6785
2.8	130.6	0.0011	0.6577	131.0	518.4	649.4	0.3916	1.6756
2.9	131.7	0.0011	0.6365	132.2	517.6	649.8	0.3946	1.6728
3.0	132.9	0.0011	0.6165	133.4	516.8	650.2	0.3975	1.6701
3.1	134.0	0.0011	0.5979	134.5	516.1	650.6	0.4002	1.6675
3.2	135.1	0.0011	0.5803	135.6	515.3	650.9	0.4030	1.6650
3.3	136.1	0.0011	0.5638	136.7	514.6	651.3	0.4056	1.6625

8º (Provão MEC - Eng. Química - 1999)

Uma unidade industrial deverá empregar etileno como refrigerante em um sistema de resfriamento. O trocador de calor de refrigeração receberá 100 kg h^{-1} de etileno líquido, saturado a uma pressão de 30 bar absoluta, conforme o esquema abaixo. Na entrada do trocador a pressão é reduzida para 5 bar, forçando a vaporização do etileno. Calcular a carga térmica do trocador, de forma que 80% do etileno alimentado passem para o estado de vapor.



Dados / Informações adicionais

Etileno Saturado

T, K	$P, \text{ bar}$	$v_f, \text{ m}^3/\text{kg}$	$v_g, \text{ m}^3/\text{kg}$	$h_f, \text{ kJ/kg}$	$h_g, \text{ kJ/kg}$	$s_f, \text{ kJ/(kg.K)}$	$s_g, \text{ kJ/(kg.K)}$	$C_{p,f}, \text{ kJ/(kg.K)}$	$\mu_f, 10^{-4} \text{ Pa.s}$	$k_f, \text{ W/(m.K)}$
104,0 ^f	0,0012	1,417...3	265	241	803			2,480	7,5	0,258
110	0,0032	1,449...3	109	251	808			2,457	5,63	0,252
120	0,0141	1,500...3	27,8	275	820			2,436	4,20	0,242
130	0,0469	1,553...3	8,72	299	832			2,418	3,28	0,232
140	0,118	1,605...3	3,611	324	844			2,405	2,65	0,222
150	0,269	1,659...3	1,676	347	856			2,397	2,20	0,212
160	0,562	1,711...3	0,8281	371,3	868,6	4,077	7,185	2,395	1,87	0,202
170	1,053	1,762...3	0,4605	395,4	875,7	4,224	7,049	2,404	1,62	0,192
180	1,822	1,811...3	0,2761	419,6	882,7	4,362	6,935	2,410	1,43	0,182
190	2,959	1,865...3	0,1752	443,8	888,9	4,494	6,837	2,425	1,28	0,172
200	4,559	1,923...3	0,1162	467,8	894,1	4,617	6,749	2,450	1,15	0,162
210	6,723	1,986...3	0,0801	492,6	899,8	4,731	6,670	2,505	1,05	0,152
220	9,560	2,056...3	0,0570	518,0	905,7	4,844	6,608	2,580	0,97	0,142
230	13,18	2,142...3	0,0415	544,2	911,1	4,956	6,551	2,706	0,90	0,132
240	17,71	2,243...3	0,0305	571,5	912,2	5,070	6,490	2,915	0,83	0,122
250	23,28	2,370...3	0,0224	600,8	908,1	5,188	6,417	3,260	0,77	0,112
260	30,03	2,539...3	0,0164	633,0	900,1	5,313	6,340	3,775	0,71	0,102
270	38,11	2,798...3	0,0118	673,2	887,7	5,459	6,253	4,990		
275	42,71	2,997...3	0,0096	700,3	874,2	5,551	6,194			
283,1 ^c	50,97	4,739...3	0,0047	799,1	799,1	5,903	5,903	∞		∞

9º (Provão MEC - Eng. Mecânica - 2000)

No projeto de um refrigerador, o ciclo proposto prevê a utilização de refrigerante R-12, que é admitido no compressor como vapor superaquecido a 0,18 MPa e -10°C , sendo descarregado a 0,7 MPa e 50°C . O refrigerante é então resfriado no condensador até 24°C e 0,65 MPa, sendo posteriormente expandido até 0,15 MPa. A carga térmica de projeto do refrigerador é de 6,0 kW. Despreze a perda de carga e a transferência de calor nas linhas de conexão entre os elementos do refrigerador.

- Esboce em um diagrama Temperatura-Entropia o ciclo proposto, indicando sua posição relativa à curva de saturação, com base no esquema apresentado na figura abaixo. (valor: 3,0 pontos)
- Calcule a vazão mássica, em kg/s, de refrigerante necessária para atender à carga térmica de projeto. (valor: 3,0 pontos)
- Calcule a potência requerida pelo compressor, em kW, e analise a necessidade de se utilizar o superaquecimento do refrigerante admitido no compressor. (valor: 2,0 pontos)
- Estuda-se o uso do refrigerante R-134 como forma de adequar o equipamento à legislação ambiental de outros países e possibilitar a sua exportação. Explique os efeitos ambientais de refrigerantes halogenados, como o R-12. (valor: 2,0 pontos)

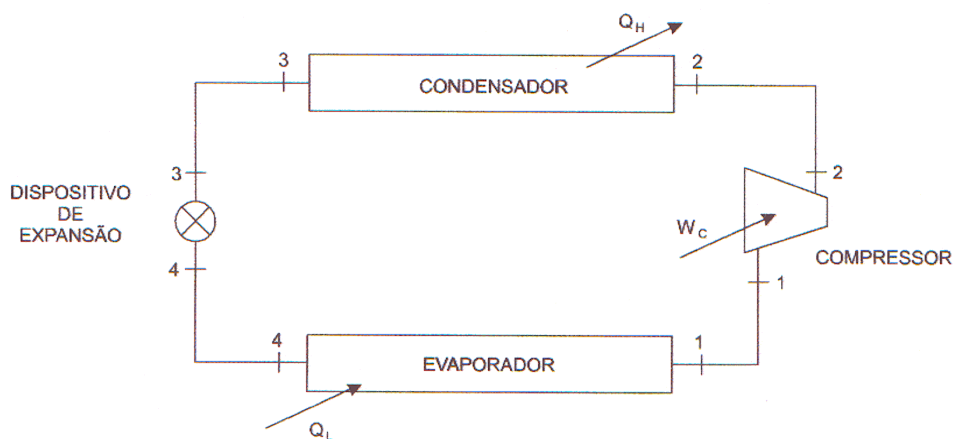


Tabela 1
TABLE A-11
Saturated refrigerant-12-Temperature table

Temp. °C T	Sat. press. MPa P _{sat}	Specific volume m ³ / kg		Internal energy kJ / kg		Enthalpy kJ / kg			Entropy kJ / (kg · K)	
		Sat. liquid v _f	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
-15	0.18260	0.0006 926	0.091 02	22.20	164.35	22.33	158.64	180.97	0.0906	0.7051
-10	0.21912	0.0007 000	0.076 65	26.72	166.39	26.87	156.31	183.19	0.1080	0.7019
-5	0.26096	0.0007 078	0.064 96	31.27	168.42	31.45	153.93	185.37	0.1251	0.6991
0	0.30861	0.0007 159	0.055 39	35.83	170.44	36.05	151.48	187.53	0.1420	0.6965
4	0.35124	0.0007 227	0.048 95	39.51	172.04	39.76	149.47	189.23	0.1553	0.6946
8	0.39815	0.0007 297	0.043 40	43.21	173.63	43.50	147.41	190.91	0.1686	0.6929
12	0.44962	0.0007 370	0.038 60	46.93	175.20	47.26	145.30	192.56	0.1817	0.6913
16	0.50591	0.0007 446	0.034 42	50.67	176.78	51.05	143.14	194.19	0.1948	0.6898
20	0.56729	0.0007 525	0.030 78	54.44	178.32	54.87	140.91	195.78	0.2078	0.6884
24	0.63405	0.0007 607	0.027 59	58.25	179.85	58.73	138.61	197.34	0.2207	0.6871
26	0.66954	0.0007 650	0.026 14	60.17	180.61	60.68	137.44	198.11	0.2271	0.6865
28	0.70648	0.0007 694	0.024 78	62.09	181.36	62.63	136.24	198.87	0.2335	0.6859
30	0.74490	0.0007 739	0.023 51	64.01	182.11	64.59	135.03	199.62	0.2400	0.6853
32	0.78485	0.0007 785	0.022 31	65.96	182.85	66.57	133.79	200.36	0.2463	0.6847
34	0.82636	0.0007 832	0.021 18	67.90	183.59	68.55	132.53	201.09	0.2527	0.6842

Source: Tables A-11 through A-13 are adapted from Kenneth Wark, Thermodynamics, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, pp 807-812. Originally published by E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc., 1969.

Tabela 2
TABLE A-13
Superheated refrigerant-12

Temp. °C	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)
0.14 MPa (T _{sat} = - 21.91°C)					0.18 MPa (T _{sat} = - 15.38°C)			
Sat.	0.116 8	161.52	177.87	0.7102	0.092 2	164.20	180.80	0.7054
-20	0.117 9	162.50	179.01	0.7147				
-10	0.123 5	167.69	184.97	0.7378	0.092 5	164.39	181.03	0.7181
0	0.128 9	172.94	190.99	0.7602	0.099 1	172.37	190.21	0.7408
10	0.134 3	178.28	197.08	0.7821	0.103 4	177.77	196.38	0.7630
20	0.139 7	183.67	203.23	0.8035	0.107 6	183.23	202.60	0.7846
30	0.144 9	189.17	209.46	0.8243	0.111 8	188.77	208.89	0.8057
40	0.150 2	194.72	215.75	0.8447	0.116 0	194.35	215.23	0.8263
50	0.155 3	200.38	222.12	0.8648	0.120 1	200.02	221.64	0.8464
60	0.160 5	206.08	228.55	0.8844	0.124 1	205.78	228.12	0.8662
80	0.170 7	217.74	241.64	0.9225	0.132 2	217.47	241.27	0.9045
100	0.180 9	229.67	255.00	0.9593	0.140 2	229.45	254.69	0.9414
0.60 MPa (T _{sat} = 22.00°C)					0.70 MPa (T _{sat} = 27.65°C)			
Sat.	0.029 13	179.09	196.57	0.6878	0.025 01	181.23	198.74	0.6860
30	0.030 42	184.01	202.26	0.7068	0.025 35	182.72	200.46	0.6917
40	0.031 97	190.13	209.31	0.7297	0.026 76	189.00	207.73	0.7153
50	0.033 45	196.23	216.30	0.7516	0.028 10	195.23	214.90	0.7378
60	0.034 89	202.34	223.27	0.7729	0.029 39	201.45	222.02	0.7595
80	0.037 65	214.61	237.20	0.8135	0.031 84	213.88	236.17	0.8008
100	0.040 32	227.01	251.20	0.8520	0.034 19	226.40	250.33	0.8398
120	0.042 91	239.57	265.32	0.8889	0.036 46	239.05	264.57	0.8769
140	0.045 45	252.31	279.58	0.9243	0.038 67	251.85	278.92	0.9125
160	0.047 94	265.25	294.01	0.9584	0.040 85	264.83	293.42	0.9468

Exercícios Propostos: 6.13 - 6.14 - 6.29 - 6.31 - 6.32 - 6.43 - 6.6 - 6.41 - 6.46
 (livro texto – 5^a ed.)
 6.84 - 6.78 - 6.79 - 6.53 - 6.28 - 6.82 - 6.105 - 6.63 - 6.74 - 6.94
 (livro texto – 6^a ed.)
 6.83 - 6.79 - 6.46 - 6.76 - 6.80 - 6.110 - 6.68 - 6.74 - 6.97
 (livro texto – 7^a ed.)

1ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA VOLUME DE CONTROLE EM REGIME TRANSIENTE

CAPÍTULO 6 (continuação)

6.5 1ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA VOLUME DE CONTROLE EM REGIME TRANSIENTE

(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

$$Q - W = (\Delta U + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{v.c.}} + (\Delta H + \Delta E_{\text{cin}} + \Delta E_{\text{pot}})_{\text{corr}}$$

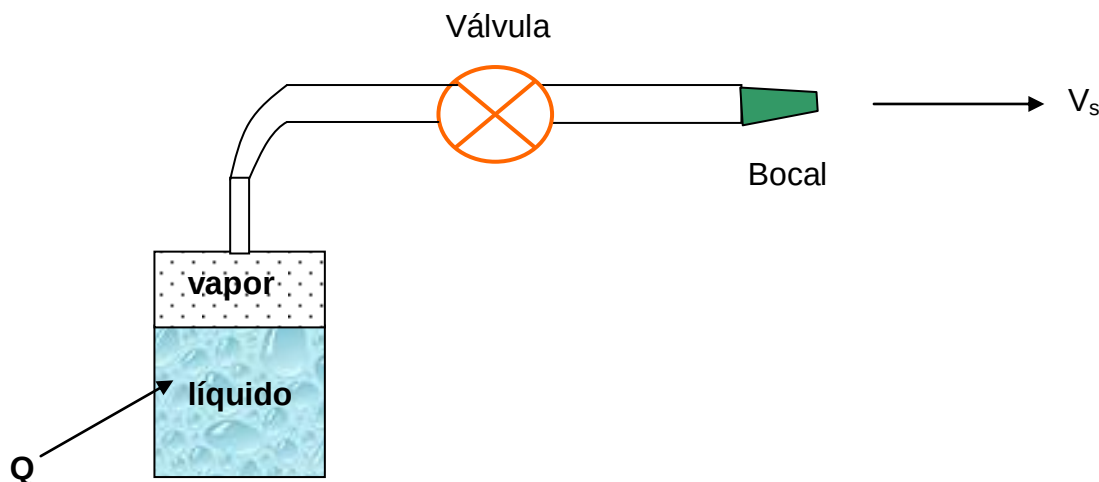
6.6 Exercícios

1º (Van Wylen – 2ª ed.) Um tanque de 10 litros contém Freon-12 a 30 °C, 1 kgf/cm². Deseja-se encher o tanque com 60% em volume de líquido nessa temperatura. O tanque é ligado a uma linha onde flui Freon-12 a 7 kgf/cm², 40 °C e a válvula é aberta ligeiramente.

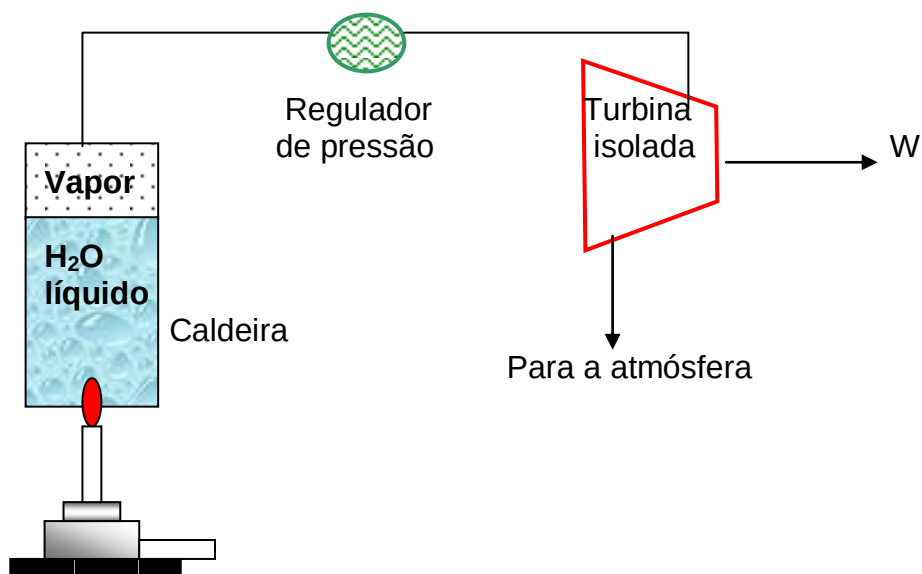
- Calcular a massa final no tanque a 30 °C;
- Determinar a transferência de calor necessária, durante o processo de enchimento, para que a temperatura permaneça em 30 °C.

2º (Van Wylen – 2ª ed.) Um tanque de 30 litros contém Freon-12, como indicado na figura abaixo. O tanque contém, inicialmente, 90% de líquido e 10% de vapor, em volume, a 30 °C. A válvula é, então, aberta e o Freon escapa, deixando o bocal a 1kgf/cm², -20 °C, com uma velocidade de 200 m/s. Durante esse processo é transferido calor de modo a manter a temperatura do Freon, no sistema, em 30 °C. Determinar:

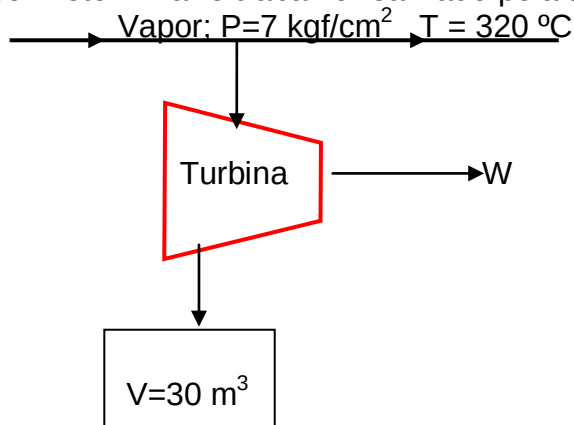
- A massa total retirada, quando o tanque contiver vapor saturado.
- O calor transferido para o tanque durante o processo.



3º (Van Wylen – 2ª ed.) Uma instalação propulsora a vapor para um veículo automotor é proposta como indicado na figura abaixo. A caldeira tem um volume de 30 litros e contém, inicialmente, 90 % de líquido e 10 % de vapor em volume, a 1 kgf/cm^2 . O queimador é ligado e quando a pressão atinge 7 kgf/cm^2 a válvula reguladora de pressão mantém a pressão na caldeira constante nesse valor; vapor saturado nessa pressão passa para a turbina. A descarga desta para a atmosfera é de vapor saturado a 1 kgf/cm^2 . Quando o líquido na caldeira se esgota o queimador desliga automaticamente. Determine o trabalho total realizado e o calor total transferido para um carregamento da caldeira.



4º (Van Wylen – 2ª ed.) Considere o dispositivo mostrado abaixo. Vapor d'água flui numa linha a 7 kgf/cm^2 , 320°C . Dessa linha o vapor sai para uma turbina a vapor, de onde é descarregado para uma grande câmara com volume de 30 m^3 . Inicialmente essa câmara está em vácuo. A turbina pode operar até a pressão na câmara atingir 7 kgf/cm^2 , quando então a temperatura do vapor é 290°C . Supor que todo o processo é adiabático. Determinar o trabalho realizado pela turbina durante o processo.



Exercícios Propostos: 6.84 - 6.78 - 6.79 - 6.53 - 6.28 - 6.82 - 6.105 - 6.63 - 6.74 - 6.94
(livro texto – 6ª ed.)
6.83 - 6.79 - 6.46 - 6.76 - 6.80 - 6.110 - 6.68 - 6.74 - 6.97
(livro texto – 7ª ed.)

2ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA CICLOS

CAPÍTULO 7

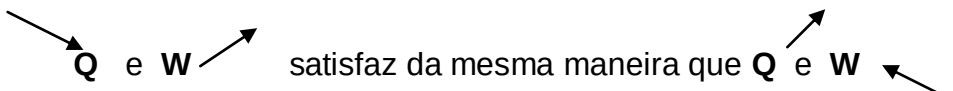
7 2ª LEI DA TERMODINÂMICA

(VAN WYLLLEN et al., 2009)

7.1 Introdução

A 1ª Lei da Termodinâmica estabelece que durante qualquer ciclo:

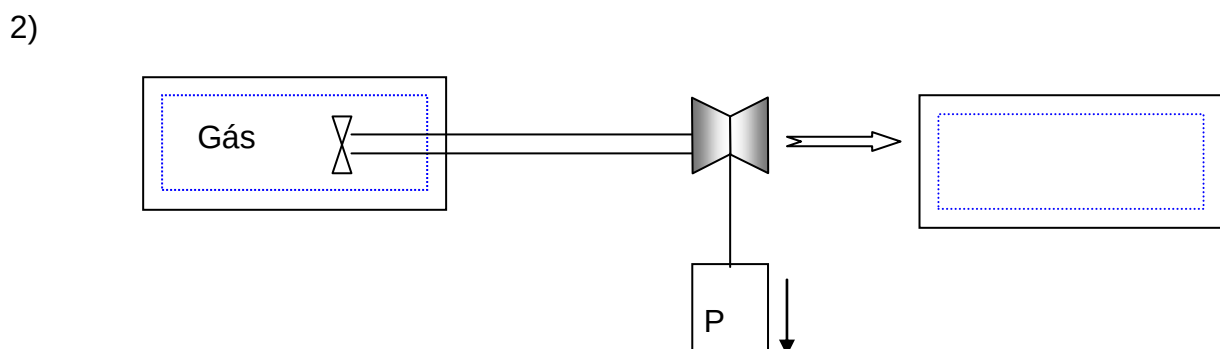
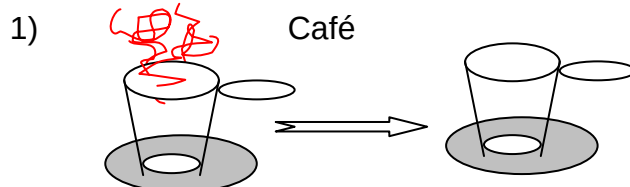
$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$


 satisfaz da mesma maneira que Q e W

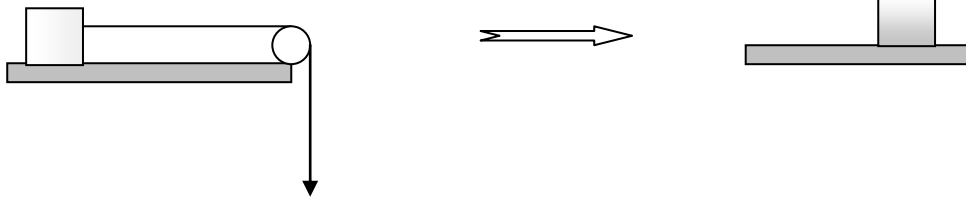
Experimentalmente, existe essa restrição de sentido entre Q e W e foi o que deu origem à 2ª Lei da Termodinâmica: que estabelece o sentido em que um processo pode ocorrer.

- ❑ **Objetivo da 2ª Lei:** análise qualitativa dos processos (quais processos podem ocorrer na natureza??)
- ❑ **Só a 1ª Lei não é suficiente**
- ❑ **Diferenças entre a 1ª e 2ª Leis**

Exemplos:



3)



Estes e outros exemplos mostram a necessidade da 2ª Lei, que não invalida a 1ª, somente orienta quanto ao sentido da troca de Q e W .

Com essa impossibilidade de completar ciclos termodinâmicos surgiram o motor térmico ou máquina térmica e o refrigerador ou bomba de calor.

7.2 Reservatório Térmico ou Fonte de Calor

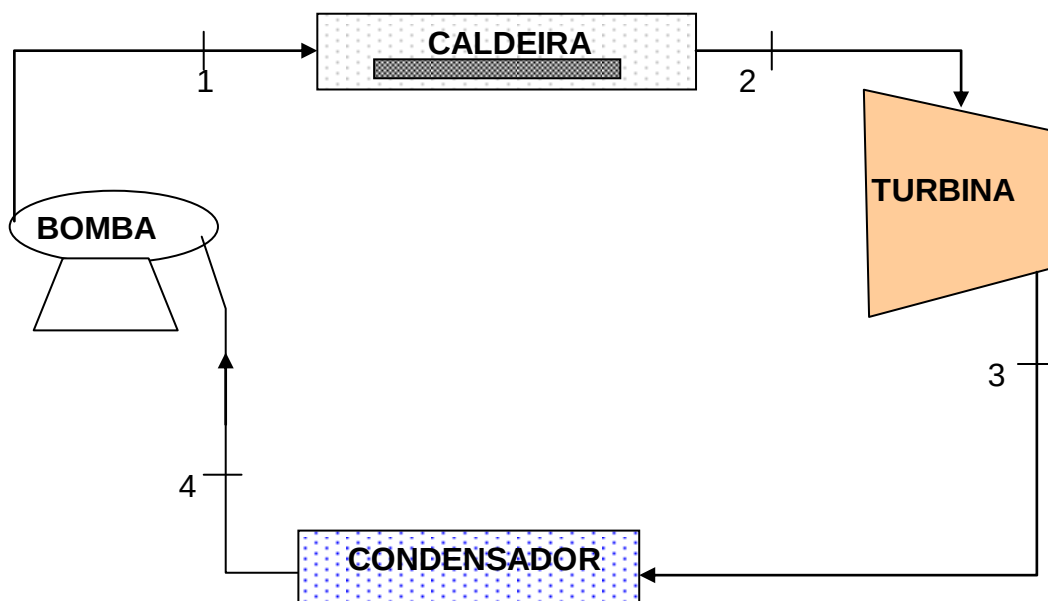
Corpo (substância ou sistema): ao qual e do qual calor é transferido sem mudança de temperatura. Exemplo: ar atmosférico, água de rios e oceanos, gases de uma fornalha.

7.3 Ciclos Motores (motores térmicos: transformam calor em trabalho)

Exemplos:

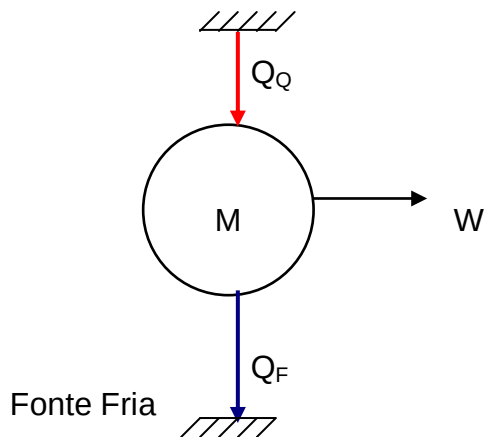
- ❑ Usinas termelétricas
- ❑ Motores de automóvel
- ❑ Turbinas de avião

7.3.1 Motor Térmico



Símbolo:**Balanco de Energia:**

Fonte Quente



7.3.1.1 Enunciado de Kelvin – Planck:

É impossível construir um dispositivo que.....

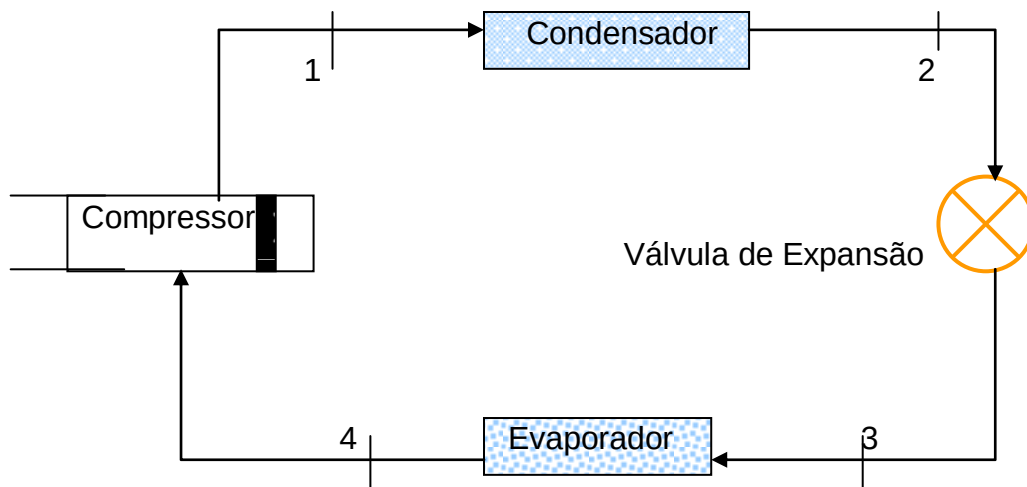
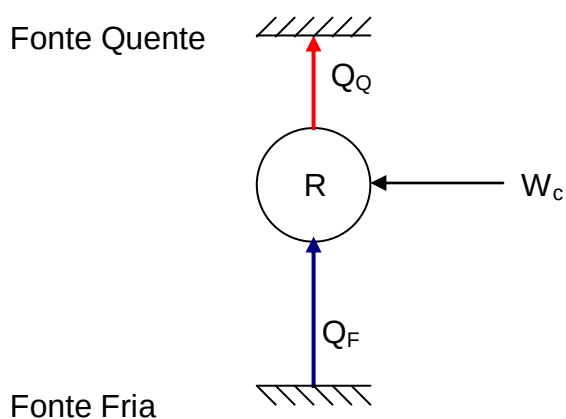
Sendo $W = Q_Q$ impossível $Q_F \neq 0 \quad \therefore$

$\eta =$

7.4 Ciclos de Refrigeração (transferem calor de uma fonte mais fria para uma fonte mais quente)

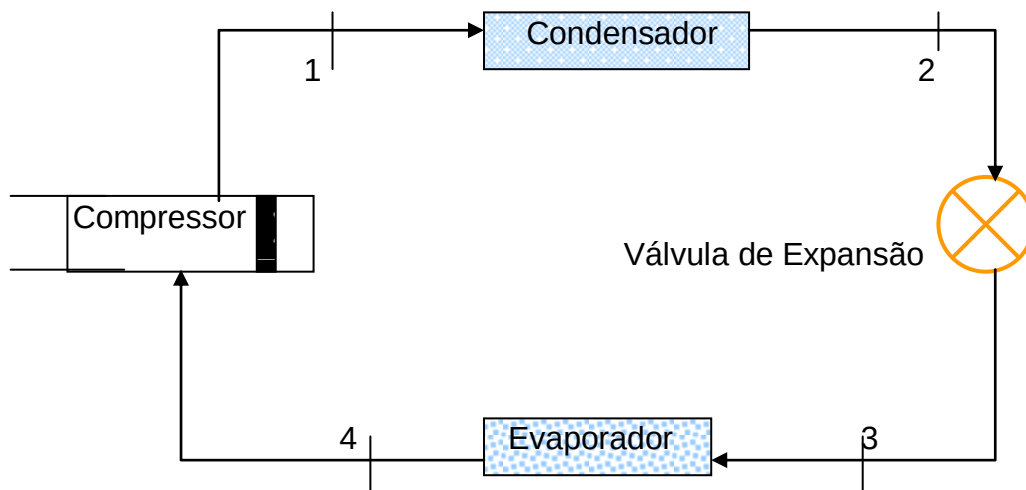
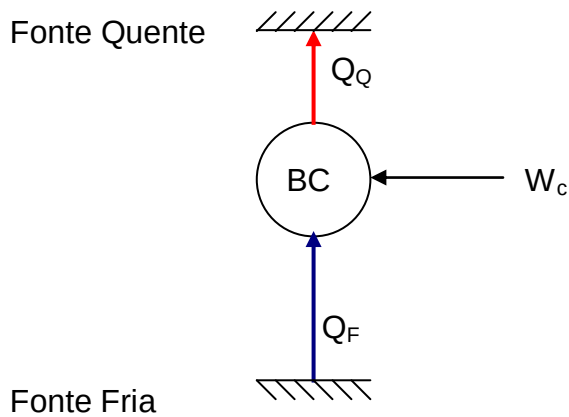
Exemplos:

- ☐ Refrigeradores em geral
- ☐ Sistemas de Ar Condicionado
- ☐ Sistemas de Aquecimento tipo Bomba de Calor

7.4.1 Refrigerador**Símbolo:****Balanco de Energia:****7.4.1.1 Enunciado de Clausius:**

É impossível construir um dispositivo que.....

Sendo $Q_Q = Q_F$ impossível $\Rightarrow W \neq 0 \therefore \beta =$

7.4.2 Bomba de Calor**Símbolo:****Balanco de Energia:**

Exemplos:

Motor de Automóvel

Central Termoelétrica:

Novas Centrais:

Turbinas de Avião:

Rendimentos:

17 a 23%

23 a 40%

até 52%

30%

Conclusões Preliminares

- ❑ Se $\eta < 100\%$, qual é o máximo rendimento de um motor?
- ❑ Analogamente: qual é o máximo coeficiente de eficácia de um refrigerador?
- ❑ Como avaliar casos reais?

7.5 Processo Reversível

É aquele que tendo ocorrido pode voltar à situação original, sem deixar vestígios no sistema e no meio.

7.6 Causas de Irreversibilidade de um processo

- a) Atrito;
- b) Expansão não resistida;
- c) Troca de calor com diferença finita de temperatura;
- d) Mistura de substâncias.

7.7 Ciclo de Carnot

É o ciclo que tem rendimento máximo, pois todos os seus processos são reversíveis.

Voltando aos esquemas dos ciclos motor e de refrigeração anteriores (pg. 44 e 46), verificamos que, independente do fluido utilizado, têm sempre os mesmos quatro processos:

- 1 → 2: processo.....
- 2 → 3: processo.....
- 3 → 4: processo.....
- 4 → 1: processo.....

7.8 Teoremas de Carnot

$$1^\circ \quad \eta_{\text{irrev}} < \eta_{\text{carnot}}$$

$$2^\circ \quad \eta_{\text{rev A}} = \eta_{\text{rev B}}$$

7.9 Conclusões

- $\eta_{\text{máx}}$ é o η do ciclo de Carnot
- $\eta_{\text{máx}} = f(T_Q \text{ e } T_F)$

7.10 Escala Termodinâmica de Temperatura = Escala Kelvin

$$\eta_{\text{Carnot}} = f(T_Q, T_F)$$

$$\frac{Q_Q}{Q_F} = \frac{T_Q}{T_F}$$

→ Para Carnot

7.10.1 Motor

$$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

Conclusão:

$\eta < \eta_{\text{máx}}$: motor real, irreversível
 $\eta = \eta_{\text{máx}}$: motor ideal, reversível
 $\eta > \eta_{\text{máx}}$: motor impossível

7.10.2 Refrigerador

$$\beta_{\text{máx}} = \frac{1}{\frac{T_Q}{T_F} - 1}$$

Conclusão:

$\beta < \beta_{\text{máx}}$: refrigerador real, irreversível
 $\beta = \beta_{\text{máx}}$: refrigerador ideal, reversível
 $\beta > \beta_{\text{máx}}$: refrigerador impossível

7.10.3 Bomba de Calor:

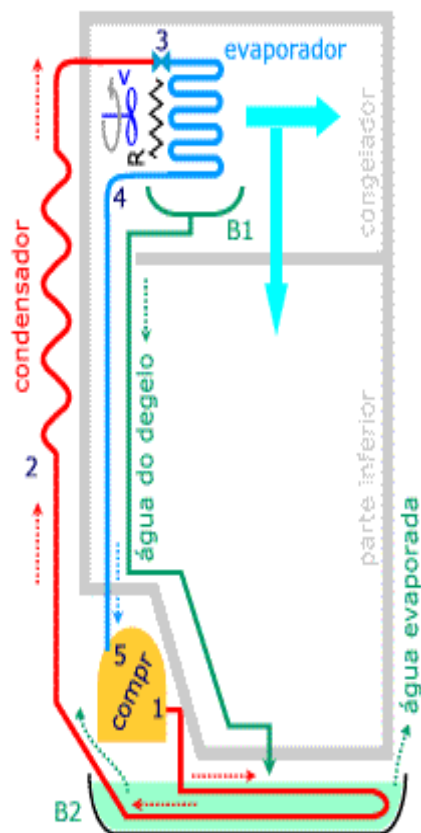
$$\beta'_{\text{máx}} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_Q}}$$

Conclusão:

$\beta' < \beta'_{\text{máx}}$: bomba de calor real, irreversível
 $\beta' = \beta'_{\text{máx}}$: bomba de calor ideal, reversível
 $\beta' > \beta'_{\text{máx}}$: bomba de calor impossível

CURIOSIDADE - CICLO DE REFRIGERAÇÃO:

Na figura abaixo, as formas e proporções estão propositalmente diferentes do real por questão de clareza.



Uma geladeira comum faz uso do ciclo normal de refrigeração. O circuito 12345 (compressor, condensador, evaporador) é fechado e contém um gás apropriado ou gás refrigerante. Na saída do compressor (1) o gás está sob alta pressão e aquecido. Ao passar pelo condensador (2 - aquela serpentina de tubos pretos, em geral na parte de trás do equipamento) ele troca calor com o ambiente e, na saída, está no estado líquido. O líquido entra no evaporador através de uma válvula de expansão (3). Na realidade é um estrangulamento que provoca uma perda de pressão e conseqüente evaporação na serpentina do evaporador, onde absorve calor do interior. Na saída do evaporador (4) está no estado gasoso, retornando ao compressor e reiniciando o ciclo.

Portanto, a parte azul do circuito (345) é de baixa pressão e a vermelha, de alta pressão.

O compressor não trabalha ininterruptamente. Há um termostato (não indicado na figura) que liga e desliga de acordo com o ajuste de temperatura desejado.

Durante muito tempo, as geladeiras foram construídas com apenas este sistema básico, que é acompanhado do inconveniente da formação de gelo no evaporador, exigindo o degelo manual periódico.

As geladeiras que dispensam o degelo (*frost-free*) fazem uso de uma resistência elétrica de aquecimento (R) junto do evaporador. Um temporizador automático desliga periodicamente o compressor e liga a resistência, fundindo o gelo. A água é recolhida na bandeja B1 e dirigida à bandeja inferior B2. Depois do período de degelo, o compressor é ligado e a resistência desligada. Conforme já dito, na saída do compressor o gás está aquecido. Uma parte da tubulação passa pela bandeja e evapora a água do degelo.

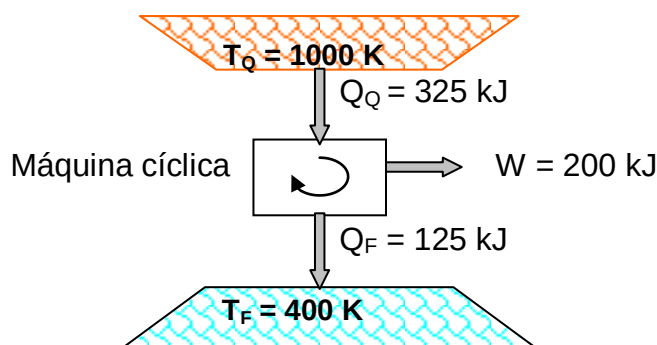
Nestas geladeiras, a circulação do ar através do evaporador é forçada com uma ventoinha (v) e condutos que distribuem na proporção adequada para o congelador e a parte inferior. A circulação forçada também contribui para melhor remoção da umidade interna, depositando-a em forma de gelo na serpentina do evaporador. A ventoinha é desligada junto com o compressor, no período de degelo conforme parágrafo anterior ou pelo termostato, no controle da temperatura. Algumas geladeiras mais recentes desligam-na também quando uma porta é aberta, para reduzir a perda de ar frio e, por conseqüência, economizar energia.

FONTE: <http://myspace.eng.br/como/comoe1.asp>

Acesso em junho de 2004.

7.11 Exercícios

1° (Van Wylen – 4ª ed.) A figura abaixo mostra o esquema de uma máquina cíclica que é utilizada para transferir calor de um reservatório térmico a alta temperatura para outro de baixa temperatura. Determine, utilizando os valores fornecidos, se esta máquina é reversível, irreversível ou impossível.

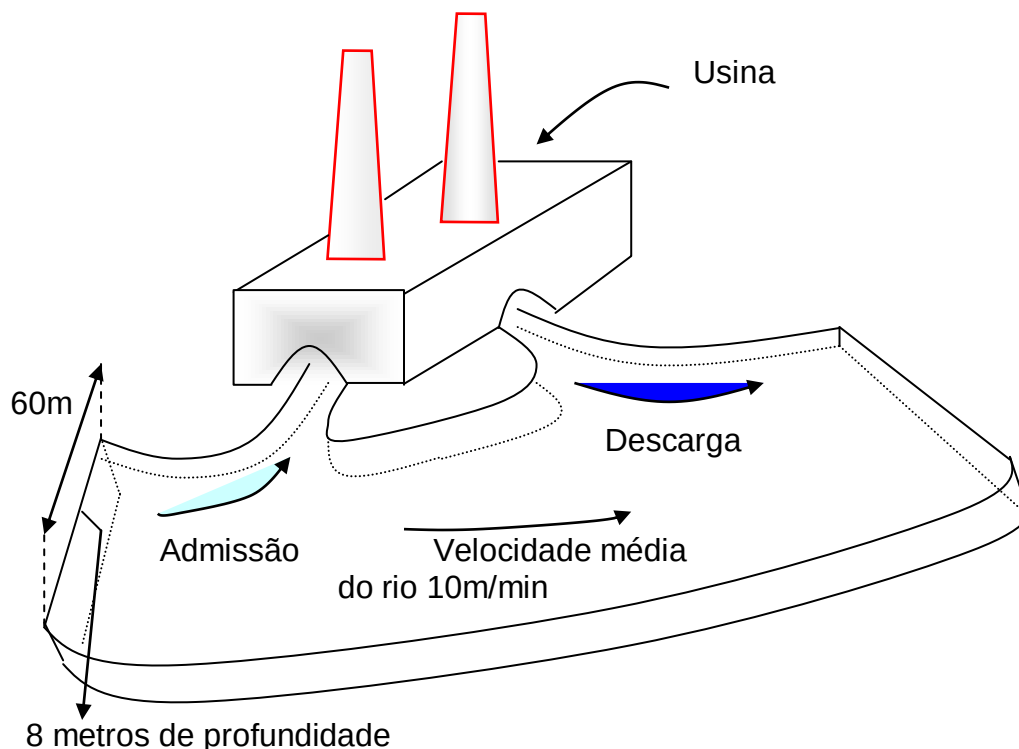


2° (Van Wylen – 4ª ed.) Propõe-se aquecer uma residência durante o inverno usando uma bomba de calor. A temperatura da residência deve ser sempre mantida igual a 20°C e a temperatura externa é -10°C . Estima-se que, a taxa de transferência de calor da residência para o meio seja igual a 25 kW . Qual é a **mínima potência** elétrica necessária para acionar a bomba?

3° (Van Wylen – 4ª ed.) Um congelador doméstico opera numa sala onde a temperatura é 20°C . Para manter a temperatura do espaço refrigerado em -30°C é necessário uma taxa de transferência de calor, do espaço refrigerado, igual a 2 kW . Qual é a **mínima potência** necessária para operar esse congelador?

4° (Van Wylen – 4ª ed.) Deseja-se produzir refrigeração a -30°C . Dispõe-se de um reservatório térmico a 200°C e a temperatura ambiente é 30°C . Assim, trabalho pode ser realizado por uma máquina térmica operando entre o reservatório a 200°C e o ambiente, e este trabalho pode ser utilizado para acionar o refrigerador. Admitindo que todos os processos sejam reversíveis, determine a relação entre o calor transferido do reservatório a alta temperatura e o calor transferido do espaço refrigerado.

5° (Van Wylen – 4ª ed.) Propõe-se construir uma central termelétrica com potência de 1.000 MW utilizando vapor d'água como fluido de trabalho. Os condensadores devem ser resfriados com a água de um rio. A temperatura máxima do vapor será de 550°C e a pressão nos condensadores será de 10 kPa . Como consultor de engenharia você é solicitado a estimar o aumento de temperatura da água do rio (entre montante e jusante da usina). Qual é a sua estimativa?



6° De acordo com o protocolo de Montreal, todos os países devem substituir os compostos de CFC de forma a reduzir os danos à camada de ozônio. Conforme notificado na imprensa, grande número dos fabricantes brasileiros de sistemas de refrigeração já estão substituindo o Freon pelo R-134.

Assim, um fabricante de sistemas de refrigeração deseja avaliar o desempenho do ciclo de refrigeração por compressão com o R-134. O ciclo deve operar entre um espaço refrigerado a -15°C e o meio ambiente a 25°C . Deve existir uma diferença de temperatura de 15°C entre o fluido refrigerante e as fontes (quente e fria), tanto no condensador como no evaporador.

Pede-se:

- O fluxograma do ciclo de refrigeração
- O coeficiente de eficácia do ciclo
- O coeficiente de eficácia máximo do ciclo

7° (Provão MEC - Eng. Mecânica - 1999) Uma pequena usina termelétrica terá seu fornecimento de óleo garantido por uma refinaria próxima, sendo este transportado através de um oleoduto. A refinaria impôs como condição contratual que a usina compre o óleo sempre a uma vazão constante q . Entretanto, a demanda de combustível no gerador de vapor varia ao longo de um período de 24 horas, podendo ser aproximada por:

$$D = 50 - 20 \cos \left(\frac{\pi t}{12} \right)$$

onde D é a demanda expressa em m^3/h e t o tempo expresso em horas, medido a partir da meia-noite (0 h). Sendo assim, será necessário construir um reservatório de óleo combustível, de forma a permitir que a usina funcione ininterruptamente. Para que este reservatório seja projetado, forneça as informações solicitadas abaixo.

a) Quais os valores máximo, mínimo e médio da demanda de óleo e o horário em que estes valores ocorrem? (valor: 2,0 pontos)

b) Qual a vazão de óleo combustível, em m^3/h , q , a ser comprada da refinaria? (valor: 2,0 pontos)

c) Sabendo-se que a usina iniciará suas operações no tempo $t = 0$ com o reservatório contendo certo volume V_0 , escreva o balanço de massa no reservatório e, a partir daí, obtenha uma expressão para o volume ocupado pelo óleo combustível no reservatório em função do tempo. Faça um gráfico que mostre esta variação no tempo, cuidando para que, neste gráfico, o volume seja sempre positivo, pois, caso contrário, a usina ficará sem combustível. (valor: 2,0 pontos)

d) Calcule a capacidade mínima do reservatório para garantir a continuidade da operação da usina e o mínimo volume inicial V_0 . (valor: 2,0 pontos)

e) A usina rejeita calor para um rio, cuja temperatura de corrente é de 200°C . De acordo com o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), a quantidade de calor rejeitada pela usina no horário de pico de consumo não poderá superar 30 MW, de forma a preservar a flora e a fauna da região. Calcule o rendimento mínimo desta usina, de forma a satisfazer a restrição de RIMA e compare este rendimento com o máximo teórico obtido a partir da Segunda lei da Termodinâmica. A partir dessa comparação, faça uma análise da viabilidade técnica da usina. (valor: 2,0 pontos)

Dados/Informações Adicionais

- Propriedades do óleo combustível:
- Massa específica: 900 kg/m^3
- Poder calorífico: 2600 kJ/kg
- Condição operacional
- Temperatura de chama na caldeira: 800°C
- Eficiência do Ciclo de Carnot: $\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$
- $K = ^\circ\text{C} + 273,15$

Exercícios Propostos: 7.9 - 7.10 - 7.17 - 7.19 - 7.20 - 7.33 - 7.39 - 7.44 - 7.45
(livro texto – 5ª ed.)
7.26 - 7.44 - 7.50 - 7.31 - 7.84 - 7.66 - 7.51 - 7.89
(livro texto – 6ª ed.)
7.35 - 7.51 - 7.54 - 7.101 - 7.76 - 7.58 - 7.107
(livro texto – 7ª ed.)

2ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA SISTEMAS FECHADOS - ENTROPIA

CAPÍTULO 8

8. ENTROPIA

(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)

Do grego: “inverter”, a entropia está relacionada ao conceito de reversibilidade do processo, que corresponde à possibilidade de inverter o processo sem afetar o meio. Este conceito é necessário para a avaliação de processos reais, que devem ser comparados com os ideais, para determinar o grau de afastamento dos processos reais em relação aos ideais.

Outra definição: “É a medida da desordem interna de um sistema”. A entropia, com a segunda lei, permite a análise qualitativa dos processos, em complementação à primeira lei, que os analisa do ponto de vista quantitativo.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad \text{processo reversível (sem perdas)}$$

ΔS é independente do caminho.

a) Processo adiabático reversível $\Rightarrow S_2 = S_1$

b) **S**: propriedade extensiva [kJ / K] ; [kcal / °C]

$\frac{S}{m} = s \Rightarrow$ entropia específica [kJ / kg.K] ; [kcal / kg.°C]

$$S = x \cdot S_v + (1-x) \cdot S_l \Rightarrow \text{vapor úmido}$$

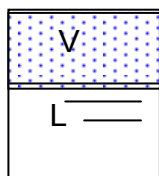
c) $\int \delta Q \text{ (reversível)} = T dS \Rightarrow Q \text{ (reversível)} = T dS = \text{área (diagrama } T \times s)$

- d) Real: processo adiabático irreversível. Ex: turbina real
 Ideal: processo adiabático reversível ou Ex. turbina ideal ($s=\text{cte.}$)

8.1 *Aplicações na Engenharia – Processos reais*: turbinas, compressores etc.

8.2 *Princípio do Aumento de Entropia do Universo*: é outro modo de enunciar a 2ª Lei da Termodinâmica.

8.2.1 Para sistemas fechados:



$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{meio}}$$

onde: $\Delta S_{\text{sist}} = S_2 - S_1$

$$\Delta S_{\text{meio}} = \frac{Q}{T_o}$$

$\Delta S_{\text{univ}} > 0$	processo real, possível (irreversível)
$\Delta S_{\text{univ}} < 0$	processo impossível
$\Delta S_{\text{univ}} = 0$	processo ideal (reversível)

A entropia do universo aumenta sempre.

8.3 Exercícios:

1º Verificar se os processos dos exercícios:

- a) 3º da pg. 27 e 6º da pg. 28
 b) 2º da pg. 35 e 4º da pg. 36
 são possíveis.

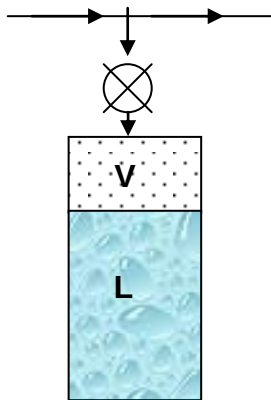
Exercícios Propostos: 8.32 - 8.73 - 8.76 - 8.77 - 8.78 (livro texto – 5ª ed.)
 8.130 - 8.131 - 8.138 (livro texto – 6ª ed.)
 8.171 - 8.175 (livro texto – 7ª ed.)

2ª LEI DA TERMODINÂMICA PARA VOLUME DE CONTROLE

CAPÍTULO 9

9. PRINCÍPIO DO AUMENTO DA ENTROPIA PARA VOLUME DE CONTROLE

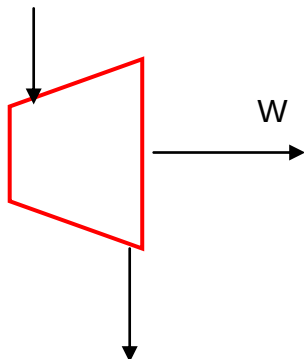
(BORGNAKKE; SONNTAG, 2009)



$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{v.c.}} + \Delta S_{\text{corr}} + \Delta S_{\text{meio}}$$

9.1 Caso particular:

Volume de controle em regime permanente $\longrightarrow \Delta S_{\text{v.c.}} = 0$



$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{corr}} + \Delta S_{\text{meio}}$$

RESUMO

	1ª Lei	2ª Lei
Sistema Fechado		
Volume de Controle (R.N.P.)		
Volume de Controle (R. P.)		

9.2 Exercícios:

1º Vapor d'água entra numa turbina a 7 atm, 420 °C e é descarregado a 1,5 atm, 200 °C. Toda troca de calor é feita com a vizinhança a 27 °C e as variações de energias cinética e potencial são desprezíveis. Alega-se que essa turbina produz 100 HP com fluxo de massa de 800 kg/h. Tal processo viola a 2ª Lei da Termodinâmica?

2º Um vendedor alega possuir uma turbina a vapor que produz 3800 HP. O vapor entra na turbina a 8 atm, 250 °C e sai na pressão de 0,15 atm, sendo requeridos 13.600 kg/h de vapor.

a) Como você julga a alegação?

b) Suponha que ele mude a alegação e diga que o fluxo necessário é de 15.400 kg/h?

Exercícios Propostos: 9.16 - 9.18 - 9.82 (livro texto – 5ª ed.)
9.39 - 9.58 - 9.53 - 9.120 - 9.66 (livro texto – 6ª ed.)
9.37 - 9.87 - 9.83 - 9.101 - 9.157 (livro texto – 7ª ed.)