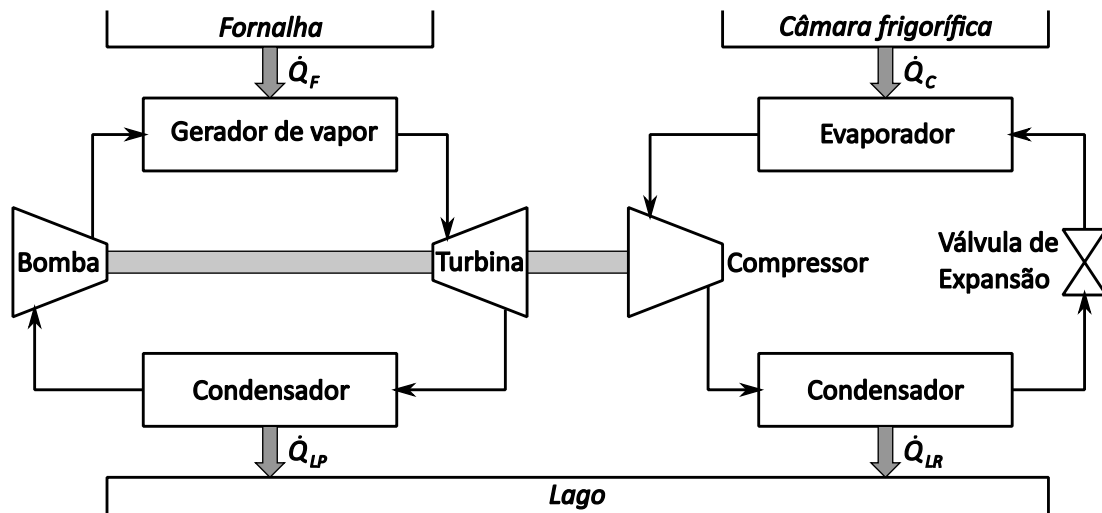
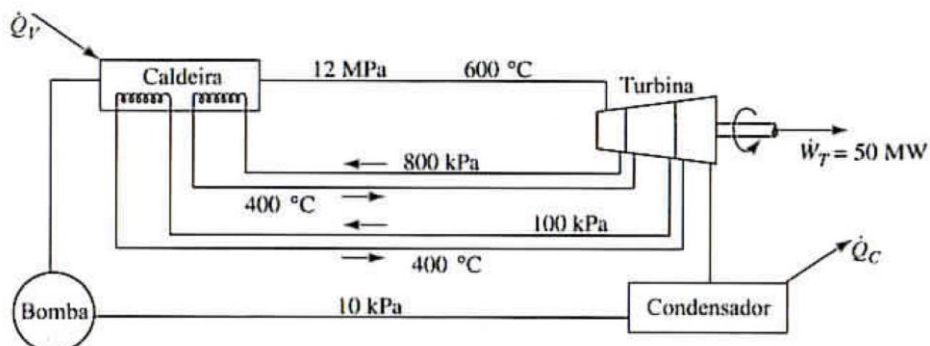


**Lista de exercícios resolvidos 08 – Ciclos motores e de refrigeração a vapor**

- 1- Um grande fazendeiro procura a sua empresa para que projetem um sistema que aproveite bagaço de cana, normalmente desprezado de uma usina de álcool localizada na propriedade, como fonte de energia para o sistema de refrigeração de uma câmara frigorífica, também localizada na propriedade. Você propõe um ciclo de potência de baixo custo, que será acoplado mecanicamente ao sistema de refrigeração, conforme mostrado na figura. O bagaço de cana será queimado numa fornalha, que fornecerá calor ao gerador de vapor e o condensador do sistema de potência trocará calor com um grande lago da propriedade, assim como o sistema de refrigeração faz. O fluido de trabalho do ciclo de refrigeração é R-134a. O evaporador trabalha à temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  e a pressão no condensador do ciclo de refrigeração é de  $1,2\text{MPa}$ . Já o sistema de potência proposto funciona segundo um ciclo Rankine, onde vapor d'água é admitido na turbina, de eficiência isentrópica  $85\%$ , a  $200^{\circ}\text{C}$  e  $400\text{kPa}$ . Na entrada da bomba a água tem pressão de  $10\text{kPa}$ . Sabendo que a câmara frigorífica precisa ser resfriada a uma taxa de  $85\text{kW}$ , e considerando as trocas de calor como processos internamente reversíveis, calcule:
- A potência requerida no compressor;
  - O fluxo mássico necessário no ciclo de potência;
  - A soma das taxas de geração de entropia nos processos irreversíveis dos ciclos.

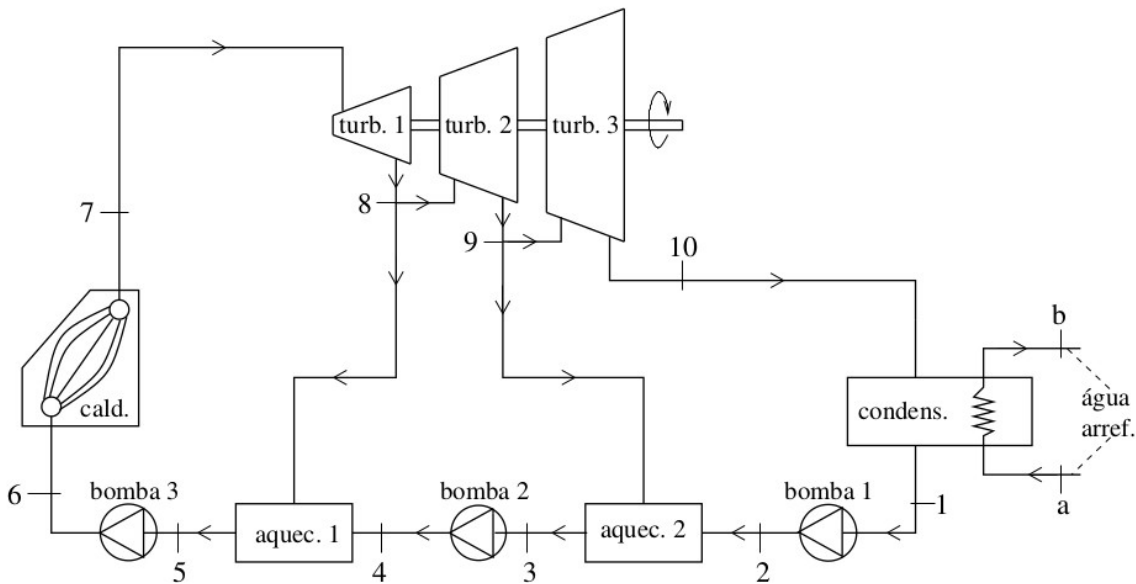


- 2- Considere o ciclo com dois estágios de aquecimento mostrado na figura. Sabendo que eficiência isentrópica da turbina é  $85\%$ , esboce o diagrama  $T-s$  do processo e determine a vazão mássica de vapor e o rendimento do ciclo.



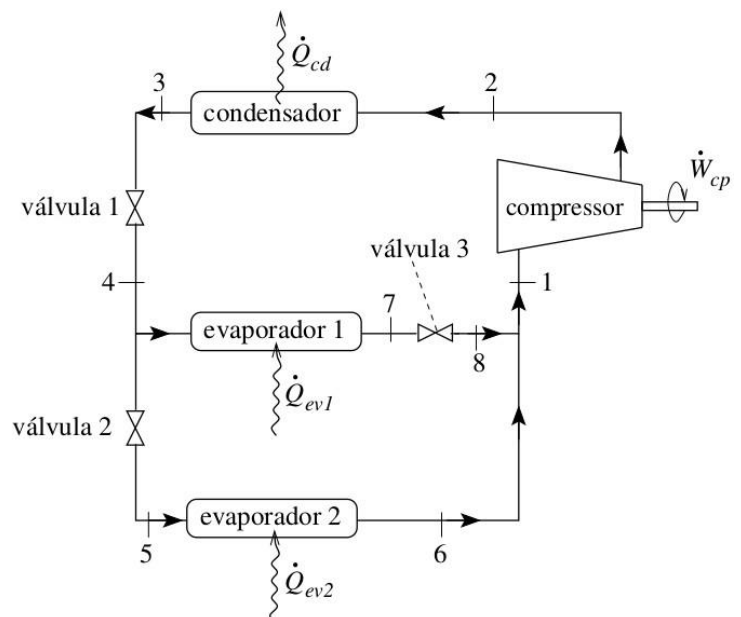
3- Em um ciclo de Rankine com regeneração há duas extrações de vapor da turbina para os pré-aquecedores de mistura: uma a 6,86 bar e outra a 1,17 bar, conforme figura abaixo. As propriedades do vapor na entrada da turbina são  $p_7 = 8,82 \text{ MPa}$  e  $T_7 = 535 \text{ }^\circ\text{C}$ . A pressão no condensador é 3,43 kPa. Considerando que a água de alimentação na saída de cada pré-aquecedor atinge a temperatura de saturação do vapor extraído e desprezando a potência consumida pelas bombas, pede-se:

- As frações da vazão total extraídas;
- O trabalho específico produzido pela turbina;
- O rendimento do ciclo regenerativo;
- Se a água de arrefecimento sofre um aumento de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  ao passar pelo condensador, determine sua vazão mássica, em kg/h;
- Construa o diagrama  $T-s$  para o ciclo indicando corretamente (porém sem se preocupar com escala) cada estado enumerado na figura abaixo.



4- Considere um sistema de refrigeração por compressão de vapor com dois evaporadores, operando com R-12 (Freon 12). O evaporador de baixa temperatura opera a  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  com vapor saturado em sua saída e com uma capacidade de refrigeração de 3 TR (TR = Tonelada de Refrigeração; 1 TR = 3,517 kW). O evaporador de temperatura mais alta gera vapor saturado a 3,2 bar em sua saída e tem capacidade de refrigeração de 2 TR. A compressão é isentrópica, sendo a pressão de descarga do compressor de 10 bar. Desprezando a perda de carga nas linhas de refrigerante e sabendo que o refrigerante deixa o condensador como líquido saturado a 10 bar, determine:

- A vazão mássica de refrigerante em cada evaporador;
- A potência do compressor;
- A taxa de calor rejeitada no condensador;
- O coeficiente de desempenho do ciclo de refrigeração;
- O diagrama  $T-s$  para o ciclo indicando, sem se preocupar com escala, cada estado enumerado na figura.



OBS: Em anexo encontra-se a tabela de saturação e vapor superaquecido do R-12.

**Tabela B.3** — Propriedades termodinâmicas do refrigerante-12 (Diclorodifluormetano)

**Tabela B.3.1** — R-12 saturado

Temp. °C <i>T</i>	Pressão		Volume específico, m <sup>3</sup> /kg			Entalpia, kJ/kg			Entropia, kJ/kg K		
	Abs. MPa <i>p</i>	Líquido sat. <i>v<sub>l</sub></i>	Evap. <i>v<sub>lv</sub></i>	Vapor sat. <i>v<sub>v</sub></i>	Líquido sat. <i>h<sub>l</sub></i>	Evap. <i>h<sub>lv</sub></i>	Vapor sat. <i>h<sub>v</sub></i>	Líquido sat. <i>s<sub>l</sub></i>	Evap. <i>s<sub>lv</sub></i>	Vapor sat. <i>s<sub>v</sub></i>	
-90	0,00284	0,000608	4,414937	4,415545	-43,284	189,748	146,464	-0,20863	1,03593	0,82730	
-85	0,00424	0,000612	3,036704	3,037316	-39,005	187,737	148,731	-0,18558	0,99771	0,81213	
-80	0,00617	0,000617	2,137728	2,138345	-34,721	185,740	151,018	-0,16312	0,96155	0,79843	
-75	0,00879	0,000622	1,537030	1,537651	-30,430	183,751	153,321	-0,14119	0,92725	0,78606	
<b>-70</b>	<b>0,01227</b>	<b>0,000627</b>	<b>1,126654</b>	<b>1,127280</b>	<b>-26,128</b>	<b>181,764</b>	<b>155,636</b>	<b>-0,11977</b>	<b>0,89465</b>	<b>0,77489</b>	
-65	0,01680	0,000632	0,840534	0,841166	-21,814	179,774	157,960	-0,09880	0,86361	0,76480	
-60	0,02262	0,000637	0,637274	0,637911	-17,485	177,775	160,289	-0,07827	0,83397	0,75570	
-55	0,02998	0,000642	0,490358	0,491000	-13,141	175,762	162,621	-0,05815	0,80563	0,74748	
-50	0,03915	0,000648	0,382457	0,383105	-8,779	173,730	164,951	-0,03841	0,77848	0,74007	
<b>-45</b>	<b>0,05044</b>	<b>0,000654</b>	<b>0,302029</b>	<b>0,302682</b>	<b>-4,400</b>	<b>171,676</b>	<b>167,276</b>	<b>-0,01903</b>	<b>0,75241</b>	<b>0,73338</b>	
-40	0,06417	0,000659	0,241251	0,241910	0	169,595	169,595	0	0,72735	0,72735	
-35	0,08071	0,000666	0,194732	0,195398	4,420	167,482	171,903	0,01871	0,70322	0,72193	
-30	0,10041	0,000672	0,158703	0,159375	8,862	165,335	174,197	0,03711	0,67993	0,71704	
-25	0,12368	0,000679	0,130487	0,131166	13,327	163,149	176,476	0,05522	0,65742	0,71264	
<b>-20</b>	<b>0,15093</b>	<b>0,000685</b>	<b>0,108162</b>	<b>0,108847</b>	<b>17,816</b>	<b>160,920</b>	<b>178,736</b>	<b>0,07306</b>	<b>0,63563</b>	<b>0,70869</b>	
-15	0,18260	0,000693	0,090326	0,091018	22,331	158,643	180,974	0,09063	0,61450	0,70513	
-10	0,21912	0,000700	0,075946	0,076646	26,874	156,314	183,188	0,10796	0,59397	0,70194	
-5	0,26096	0,000708	0,064255	0,064963	31,446	153,928	185,375	0,12506	0,57400	0,69907	
0	0,30861	0,000716	0,054673	0,055389	36,052	151,479	187,531	0,14196	0,55453	0,69649	
<b>5</b>	<b>0,36255</b>	<b>0,000724</b>	<b>0,046761</b>	<b>0,047485</b>	<b>40,694</b>	<b>148,961</b>	<b>189,654</b>	<b>0,15865</b>	<b>0,53551</b>	<b>0,69416</b>	
10	0,42330	0,000733	0,040180	0,040914	45,375	146,365	191,740	0,17517	0,51689	0,69206	
15	0,49137	0,000743	0,034671	0,035413	50,100	143,684	193,784	0,19154	0,49862	0,69015	
20	0,56729	0,000752	0,030028	0,030780	54,874	140,909	195,783	0,20777	0,48064	0,68841	
25	0,65162	0,000763	0,026091	0,026854	59,702	138,028	197,730	0,22388	0,46292	0,68680	
<b>30</b>	<b>0,74490</b>	<b>0,000774</b>	<b>0,022734</b>	<b>0,023508</b>	<b>64,592</b>	<b>135,028</b>	<b>199,620</b>	<b>0,23991</b>	<b>0,44539</b>	<b>0,68530</b>	
35	0,84772	0,000786	0,019855	0,020641	69,551	131,896	201,446	0,25587	0,42800	0,68387	
40	0,96065	0,000798	0,017373	0,018171	74,587	128,613	203,200	0,27179	0,41068	0,68248	
45	1,08432	0,000811	0,015220	0,016032	79,712	125,160	204,872	0,28771	0,39338	0,68109	
50	1,21932	0,000826	0,013344	0,014170	84,936	121,514	206,450	0,30366	0,37601	0,67967	
<b>55</b>	<b>1,36630</b>	<b>0,000841</b>	<b>0,011701</b>	<b>0,012542</b>	<b>90,274</b>	<b>117,645</b>	<b>207,920</b>	<b>0,31967</b>	<b>0,35849</b>	<b>0,67817</b>	
60	1,52592	0,000858	0,010253	0,011111	95,743	113,521	209,264	0,33580	0,34073	0,67653	
65	1,69884	0,000877	0,008971	0,009847	101,362	109,099	210,460	0,35209	0,32262	0,67471	
70	1,88578	0,000897	0,007828	0,008725	107,155	104,326	211,481	0,36861	0,30401	0,67262	
75	2,08745	0,000920	0,006802	0,007723	113,153	99,136	212,288	0,38543	0,28474	0,67017	
<b>80</b>	<b>2,30460</b>	<b>0,000946</b>	<b>0,005875</b>	<b>0,006821</b>	<b>119,394</b>	<b>93,437</b>	<b>212,832</b>	<b>0,40265</b>	<b>0,26457</b>	<b>0,66722</b>	
85	2,53802	0,000976	0,005029	0,006005	125,932	87,107	213,039	0,42040	0,24320	0,66361	
90	2,78850	0,001012	0,004246	0,005258	132,841	79,961	212,802	0,43887	0,22018	0,65905	
95	3,05689	0,001056	0,003508	0,004563	140,235	71,707	211,942	0,45833	0,19477	0,65310	
100	3,34406	0,001113	0,002790	0,003903	148,314	61,810	210,124	0,47928	0,16564	0,64492	
<b>105</b>	<b>3,65093</b>	<b>0,001197</b>	<b>0,002045</b>	<b>0,003242</b>	<b>157,521</b>	<b>49,047</b>	<b>206,568</b>	<b>0,50285</b>	<b>0,12970</b>	<b>0,63254</b>	
110	3,97846	0,001364	0,001098	0,002462	169,550	28,444	197,995	0,53334	0,07423	0,60758	
112	4,11548	0,001792	0	0,001792	183,418	0	183,418	0,56888	0	0,56888	

Tabela B.3.2 — Refrigerante-12 superaquecido

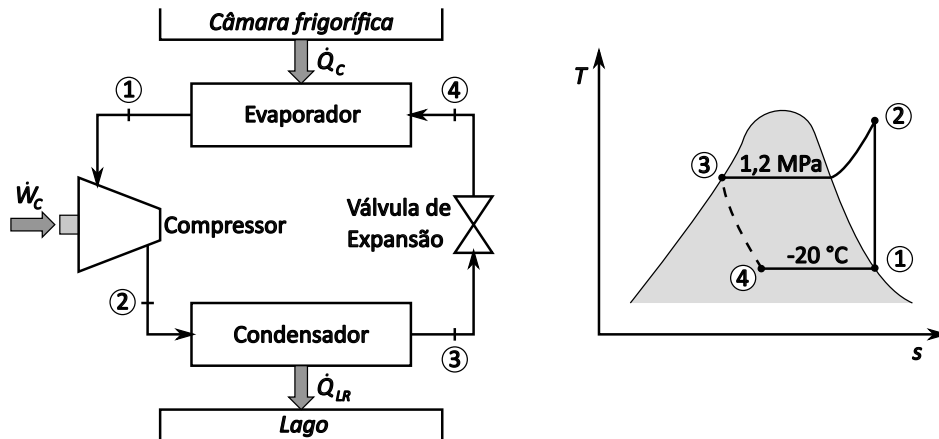
Temp. °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
	0,05 MPa			0,10 MPa			0,15 MPa		
-20	0,341859	181,170	0,79172	0,167702	179,987	0,74064	—	—	—
-10	0,356228	186,889	0,81388	0,175223	185,839	0,76331	0,114826	184,753	0,73240
0	0,370509	192,705	0,83557	0,182648	191,765	0,78541	0,119980	190,800	0,75495
10	0,384717	198,614	0,85681	0,189995	197,770	0,80700	0,125051	196,906	0,77690
<b>20</b>	<b>0,398864</b>	<b>204,617</b>	<b>0,87764</b>	<b>0,197277</b>	<b>203,855</b>	<b>0,82812</b>	<b>0,130053</b>	<b>203,077</b>	<b>0,79832</b>
30	0,412960	210,710	0,89808	0,204507	210,018	0,84879	0,135000	209,314	0,81924
40	0,427014	216,891	0,91814	0,211692	216,262	0,86905	0,139900	215,621	0,83971
50	0,441031	223,160	0,93784	0,218839	222,583	0,88892	0,144761	221,998	0,85975
60	0,455018	229,512	0,95720	0,225956	228,982	0,90842	0,149589	228,446	0,87940
<b>70</b>	<b>0,468980</b>	<b>235,946</b>	<b>0,97623</b>	<b>0,233045</b>	<b>235,457</b>	<b>0,92757</b>	<b>0,154391</b>	<b>234,963</b>	<b>0,89867</b>
80	0,482919	242,460	0,99494	0,240112	242,007	0,94638	0,159168	241,549	0,91759
90	0,496839	249,050	1,01334	0,247160	248,629	0,96487	0,163926	248,204	0,93617
	0,20 MPa			0,25 MPa			0,30 MPa		
0	0,088609	189,805	0,73249	0,069752	188,779	0,71437	0,057150	187,718	0,69894
10	0,092550	196,020	0,75484	0,073024	195,109	0,73713	0,059984	194,173	0,72215
20	0,096419	202,281	0,77657	0,076219	201,468	0,75920	0,062735	200,636	0,74458
30	0,100229	208,597	0,79775	0,079351	207,866	0,78066	0,065419	207,119	0,76633
<b>40</b>	<b>0,103990</b>	<b>214,971</b>	<b>0,81843</b>	<b>0,082432</b>	<b>214,309</b>	<b>0,80157</b>	<b>0,068049</b>	<b>213,635</b>	<b>0,78747</b>
50	0,107710	221,405	0,83866	0,085470	220,803	0,82198	0,070636	220,191	0,80808
60	0,111397	227,902	0,85846	0,088474	227,351	0,84193	0,073186	226,793	0,82820
70	0,115056	234,462	0,87786	0,091449	233,956	0,86147	0,075706	233,444	0,84787
80	0,118691	241,087	0,89689	0,094399	240,620	0,88061	0,078200	240,147	0,86712
<b>90</b>	<b>0,122305</b>	<b>247,775</b>	<b>0,91556</b>	<b>0,097328</b>	<b>247,341</b>	<b>0,89937</b>	<b>0,080673</b>	<b>246,904</b>	<b>0,88599</b>
100	0,125902	254,525	0,93390	0,100239	254,122	0,91779	0,083127	253,716	0,90449
110	0,129484	261,338	0,95191	0,103135	260,962	0,93588	0,085566	260,582	0,92265
	0,40 MPa			0,50 MPa			0,60 MPa		
20	0,045837	198,906	0,72043	0,035646	197,077	0,70043	—	—	—
30	0,047971	205,577	0,74281	0,037464	203,963	0,72352	0,030422	202,263	0,70679
40	0,050046	212,250	0,76447	0,039215	210,810	0,74574	0,031966	209,307	0,72965
50	0,052072	218,939	0,78549	0,040912	217,643	0,76722	0,033450	216,300	0,75163
<b>60</b>	<b>0,054059</b>	<b>225,653</b>	<b>0,80595</b>	<b>0,042566</b>	<b>224,479</b>	<b>0,78806</b>	<b>0,034887</b>	<b>223,268</b>	<b>0,77287</b>
70	0,056014	232,401	0,82591	0,044185	231,330	0,80832	0,036286	230,231	0,79346
80	0,057941	239,188	0,84540	0,045775	238,206	0,82807	0,037653	237,201	0,81348
90	0,059846	246,017	0,86447	0,047341	245,112	0,84735	0,038996	244,188	0,83299
100	0,061731	252,892	0,88315	0,048886	252,054	0,86621	0,040316	251,200	0,85204
110	0,063601	259,815	0,90145	0,050415	259,035	0,88467	0,041619	258,242	0,87066
120	0,065456	266,786	0,91941	0,051929	266,057	0,90276	0,042907	265,318	0,88889
130	0,067299	273,806	0,93704	0,053430	273,123	0,92050	0,044181	272,431	0,90675
	0,70 MPa			0,80 MPa			0,90 MPa		
40	0,026761	207,732	0,71529	0,022830	206,074	0,70210	0,019744	204,320	0,68972
50	0,028100	214,903	0,73783	0,024068	213,446	0,72527	0,020912	211,921	0,71361
60	0,029387	222,017	0,75951	0,025247	220,720	0,74744	0,022012	219,373	0,73633
70	0,030632	229,099	0,78045	0,026380	227,934	0,76878	0,023062	226,730	0,75808
<b>80</b>	<b>0,031843</b>	<b>236,171</b>	<b>0,80076</b>	<b>0,027477</b>	<b>235,114</b>	<b>0,78940</b>	<b>0,024073</b>	<b>234,028</b>	<b>0,77905</b>
90	0,033028	243,244	0,82051	0,028545	242,279	0,80941	0,025051	241,290	0,79932
100	0,034189	250,330	0,83976	0,029588	249,443	0,82887	0,026005	248,537	0,81901
110	0,035332	257,436	0,85855	0,030612	256,616	0,84784	0,026937	255,781	0,83817
120	0,036459	264,568	0,87693	0,031619	263,806	0,86636	0,027852	263,032	0,85685
<b>130</b>	<b>0,037572</b>	<b>271,730</b>	<b>0,89492</b>	<b>0,032612</b>	<b>271,019</b>	<b>0,88448</b>	<b>0,028751</b>	<b>270,298</b>	<b>0,87510</b>
140	0,038673	278,925	0,91254	0,033592	278,259	0,90221	0,029639	277,585	0,89295
150	0,039765	286,155	0,92984	0,034563	285,529	0,91960	0,030515	284,896	0,91043

**Tabela B.3.2 (Continuação) — Refrigerante-12 superaquecido**

Temp. °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
	<b>1,00 MPa</b>			<b>1,20 MPa</b>			<b>1,40 MPa</b> *		
50	0,018366	210,317	0,70259	0,014483	206,813	0,68165	—	—	—
60	0,019410	217,970	0,72591	0,015463	214,964	0,70649	0,012579	211,613	0,68806
70	0,020397	225,485	0,74814	0,016368	222,851	0,72982	0,013448	219,984	0,71281
80	0,021341	232,910	0,76946	0,017221	230,568	0,75198	0,014247	228,059	0,73601
<b>90</b>	<b>0,022251</b>	<b>240,278</b>	<b>0,79004</b>	<b>0,018032</b>	<b>238,171</b>	<b>0,77321</b>	<b>0,014997</b>	<b>235,940</b>	<b>0,75802</b>
100	0,023133	247,612	0,80996	0,018812	245,699	0,79366	0,015710	243,692	0,77907
110	0,023993	254,931	0,82931	0,019567	253,180	0,81344	0,016393	251,355	0,79934
120	0,024835	262,246	0,84816	0,020301	260,632	0,83265	0,017053	258,961	0,81893
130	0,025661	269,567	0,86655	0,021018	268,072	0,85133	0,017695	266,530	0,83795
<b>140</b>	<b>0,026474</b>	<b>276,902</b>	<b>0,88452</b>	<b>0,021721</b>	<b>275,509</b>	<b>0,86955</b>	<b>0,018321</b>	<b>274,078</b>	<b>0,85644</b>
150	0,027275	284,255	0,90211	0,022412	282,952	0,88735	0,018934	281,618	0,87447
160	0,028068	291,632	0,91933	0,023093	290,408	0,90477	0,019535	289,158	0,89208
	<b>1,60 MPa</b>			<b>1,80 MPa</b>			<b>2,00 MPa</b>		
70	0,011208	216,810	0,69641	0,009406	213,208	0,67992	—	—	—
80	0,011984	225,344	0,72092	0,010187	222,363	0,70622	0,008704	219,024	0,69143
90	0,012698	233,563	0,74387	0,010884	231,007	0,73036	0,009406	228,226	0,71713
100	0,013366	241,575	0,76564	0,011525	239,332	0,75297	0,010035	236,936	0,74079
<b>110</b>	<b>0,014000</b>	<b>249,448</b>	<b>0,78646</b>	<b>0,012126</b>	<b>247,446</b>	<b>0,77443</b>	<b>0,010615</b>	<b>245,336</b>	<b>0,76300</b>
120	0,014608	257,225	0,80649	0,012697	255,417	0,79497	0,011159	253,528	0,78411
130	0,015195	264,937	0,82586	0,013244	263,288	0,81474	0,011676	261,577	0,80433
140	0,015765	272,606	0,84465	0,013772	271,090	0,83385	0,012172	269,526	0,82380
150	0,016320	280,250	0,86293	0,014284	278,847	0,85240	0,012651	277,405	0,84265
<b>160</b>	<b>0,016864</b>	<b>287,880</b>	<b>0,88076</b>	<b>0,014784</b>	<b>286,574</b>	<b>0,87045</b>	<b>0,013116</b>	<b>285,237</b>	<b>0,86094</b>
170	0,017398	295,506	0,89816	0,015272	294,284	0,88805	0,013570	293,037	0,87874
180	0,017923	303,136	0,91519	0,015752	301,988	0,90524	0,014013	300,819	0,89611
	<b>2,50 MPa</b>			<b>3,00 MPa</b>			<b>3,50 MPa</b>		
90	0,006595	219,736	0,68284	—	—	—	—	—	—
100	0,007264	230,029	0,71081	0,005231	220,723	0,67755	—	—	—
110	0,007837	239,453	0,73573	0,005886	232,256	0,70806	0,004324	222,360	0,67559
120	0,008351	248,379	0,75873	0,006419	242,398	0,73420	0,004959	235,086	0,70840
<b>130</b>	<b>0,008827</b>	<b>256,986</b>	<b>0,78035</b>	<b>0,006887</b>	<b>251,825</b>	<b>0,75788</b>	<b>0,005456</b>	<b>245,865</b>	<b>0,73548</b>
140	0,009273	265,377	0,80091	0,007313	260,818	0,77991	0,005884	255,728	0,75965
150	0,009697	273,616	0,82062	0,007709	269,521	0,80072	0,006270	265,053	0,78195
160	0,010104	281,748	0,83961	0,008083	278,024	0,82059	0,006626	274,027	0,80291
170	0,010497	289,802	0,85799	0,008439	286,384	0,83967	0,006961	282,759	0,82284
<b>180</b>	<b>0,010879</b>	<b>297,802</b>	<b>0,87584</b>	<b>0,008782</b>	<b>294,640</b>	<b>0,85809</b>	<b>0,007279</b>	<b>291,319</b>	<b>0,84194</b>
190	0,011250	305,764	0,89322	0,009114	302,820	0,87594	0,007584	299,752	0,86035
200	0,011614	313,701	0,91018	0,009436	310,946	0,89330	0,007878	308,092	0,87816
	<b>4,00 MPa</b>			<b>5,00 MPa</b>					
120	0,003736	225,180	0,67769	0,001369	176,303	0,54710	—	—	—
130	0,004325	238,691	0,71164	0,002501	216,458	0,64811	—	—	—
140	0,004781	249,930	0,73918	0,003139	235,004	0,69359	—	—	—
150	0,005172	260,124	0,76357	0,003585	248,416	0,72568	—	—	—
<b>160</b>	<b>0,005522</b>	<b>269,710</b>	<b>0,78596</b>	<b>0,003950</b>	<b>259,910</b>	<b>0,75253</b>	—	—	—
170	0,005845	278,903	0,80694	0,004268	270,400	0,77648	—	—	—
180	0,006147	287,825	0,82685	0,004555	280,276	0,79851	—	—	—
190	0,006434	296,552	0,84590	0,004821	289,740	0,81917	—	—	—
200	0,006708	305,136	0,86424	0,005071	298,916	0,83877	—	—	—
<b>210</b>	<b>0,006972</b>	<b>313,614</b>	<b>0,88197</b>	<b>0,005308</b>	<b>307,882</b>	<b>0,85753</b>	—	—	—
220	0,007228	322,013	0,89917	0,005535	316,690	0,87557	—	—	—
230	0,007477	330,352	0,91592	0,005753	325,380	0,89301	—	—	—

Soluções da Lista de Exercícios 08

1) a. Analisando o ciclo de refrigeração:



$$\dot{W}_C = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad \dot{Q}_C = \dot{m}_r(h_1 - h_4) = 85 \text{ kW}$$

Com as entalpias  $h_1$  e  $h_4$ , podemos achar  $\dot{m}_r$ , pois temos  $\dot{Q}_C$ . Depois, achando  $h_2$ , calculamos  $\dot{W}_C$ .

Estado 1:  $T_1 = -20^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = 1,0$

Das tabelas:  $h_1 = 235,31 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_1 = 0,9332 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 2:  $p_2 = 1,2 \text{ MPa}$ ,  $s_2 = s_1 = 0,9332 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

→ vapor superaquecido. Das tabelas:  $h_2 = 281,04 \text{ kJ/kg}$

Estado 3:  $p_3 = 1,2 \text{ MPa}$ ,  $x_3 = 0,0$

Das tabelas:  $h_3 = 115,76 \text{ kJ/kg}$

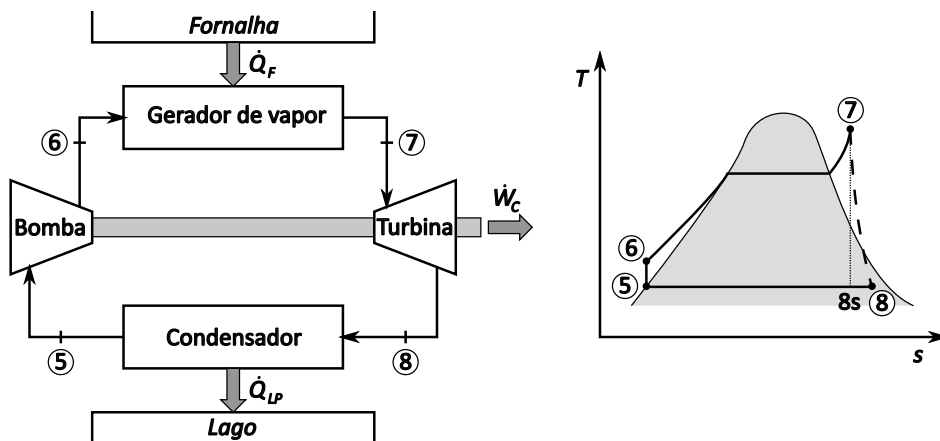
Estado 4:  $T_4 = -20^\circ\text{C}$ ,  $h_4 = h_3 = 115,76 \text{ kJ/kg}$

Assim:

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{Q}_C}{h_1 - h_4} = \frac{85}{235,31 - 115,76} = 0,711 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}_r(h_2 - h_1) = 0,711 \times (281,04 - 235,31) \Rightarrow \boxed{\dot{W}_C = 32,51 \text{ kW}}$$

b. Analisando o ciclo de potência:



$$\dot{W}_C = \dot{W}_T - \dot{W}_B = \dot{m}_p [(h_7 - h_8) - v_5(p_6 - p_5)] = \dot{m}_p [\eta_T(h_7 - h_{8s}) - v_5(p_6 - p_5)]$$

Já sabemos  $\dot{W}_C$  do item anterior. Basta, portanto, definir  $h_7$ ,  $h_{8s}$  e  $v_5$ .

Estado 7:  $T_7 = 0,4 \text{ MPa}$ ,  $T_7 = 200^\circ\text{C}$

→vapor superaquecido. Das tabelas:  $h_7 = 2860,5 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_7 = 7,1706 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 8s:  $p_{8s} = 10 \text{ kPa}$ ,  $s_{8s} = s_7 = 7,1706 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$s_l < s_{8s} < s_g$  →mudança de fase.

$$x_{8s} = \frac{s_{8s} - s_l}{s_{lg}} = \frac{7,1706 - 0,6491}{7,5019} = 0,869$$

$$h_{8s} = h_l + x_{8s}h_{lg} = 191,8 + 0,869 \times 2392,8 = 2271,1 \text{ kJ/kg}$$

Estado 5:  $p_5 = 10 \text{ kPa}$ ,  $x_5 = 0,0$

Das tabelas:  $v_5 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$

Assim:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{W}_C}{\eta_T(h_7 - h_{8s}) - v_5(p_6 - p_5)} = \frac{32,51}{0,85 \times (2860,5 - 2271,1) - 0,001010 \times (400 - 10)}$$

$$\boxed{\dot{m}_p = 0,0649 \text{ kg/s}}$$

c. Os processos irreversíveis dos ciclos são a expansão na turbina do ciclo de potência e a expansão na válvula do ciclo de refrigeração.

$$\dot{\sigma}_{\text{total}} = \dot{\sigma}_{\text{turbina}} + \dot{\sigma}_{\text{válvula}} = \dot{m}_p(s_8 - s_7) + \dot{m}_r(s_4 - s_3)$$

Estado 8:  $p_8 = 10 \text{ kPa}$

$$\cancel{\dot{m}_p} \eta_T (h_7 - h_{8s}) = \cancel{\dot{m}_p} (h_7 - h_8) \Rightarrow h_8 = h_7 - \eta_T (h_7 - h_{8s})$$

$$h_8 = 2860,5 - 0,85 \times (2860,5 - 2271,1) = 2359,5 \text{ kJ/kg}, \quad h_l < h_8 < h_{lg} \rightarrow \text{mudança de fase.}$$

$$x_8 = \frac{h_8 - h_l}{h_{lg}} = \frac{2359,5 - 191,8}{2392,8} = 0,906$$

$$s_8 = s_l + x_8 s_{lg} = 0,6491 + 0,906 \times 7,5019 = 7,4458 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Estado 3:  $p_3 = 1,2 \text{ MPa}$ ,  $x_3 = 0,0$

Das tabelas:  $s_3 = 0,4164 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 4:  $T_4 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_4 = 115,76 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_l < h_4 < h_{lg} \rightarrow \text{mudança de fase.}$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_l}{h_{lg}} = \frac{115,76 - 24,26}{211,05} = 0,434$$

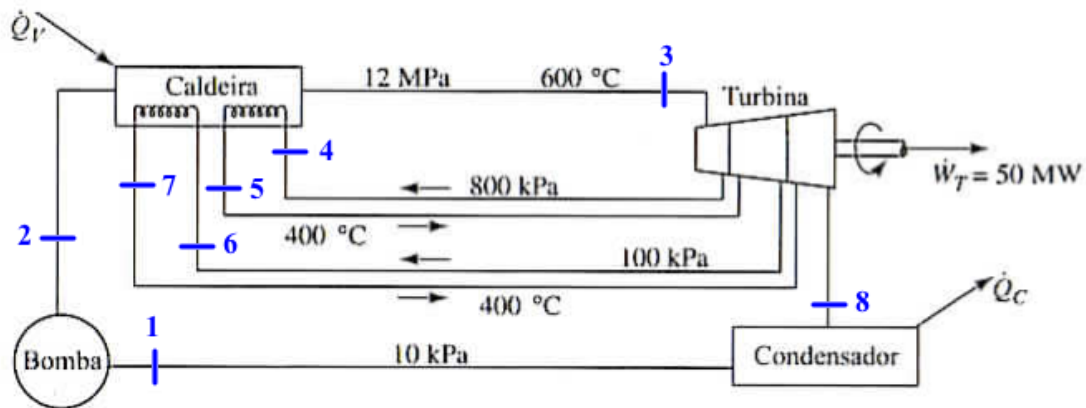
$$s_4 = (1 - x_4)s_l + x_4 s_g = (1 - 0,434) \times 0,0996 + 0,434 \times 0,9332 = 0,4614 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Assim:

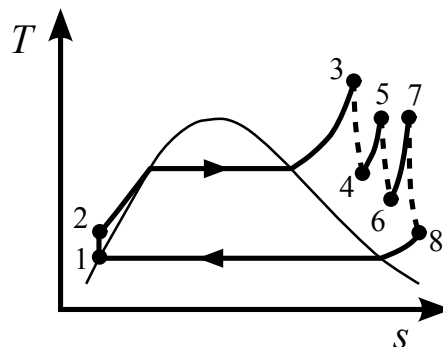
$$\dot{\sigma}_{\text{total}} = 0,0649 \times (7,4458 - 7,1706) + 0,711 \times (0,4614 - 0,4164) = 0,0179 + 0,0320$$

$$\dot{\sigma}_{\text{total}} = 0,0499 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{s})$$

2) A figura abaixo traz a numeração adotada para cada um dos estados



O diagrama  $T - s$  correspondente está abaixo:



Para encontrar a vazão mássica de vapor, consideraremos a turbina como volume de controle.



A 1ª Lei escrita para este VC é

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4 + h_5 - h_6 + h_7 - h_8) \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{W}_T}{(h_3 - h_4 + h_5 - h_6 + h_7 - h_8)} \quad (1)$$

Como  $\dot{W}_T$  foi dado, falta determinar as entalpias dos estados 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Estado 3:  $T_3 = 600^\circ\text{C}$ ,  $p_3 = 12\text{ MPa}$  → vapor superaquecido

tabelas:  $h_3 = 3608,12\text{ kJ/kg}$ ,  $s_3 = 6,8127\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Para encontrar os estados nas saídas da turbina, precisamos considerar processos hipotéticos isentrópicos e depois aplicar a eficiência isentrópica da turbina, que é  $\eta_T = 85\%$ .

Estado 4s:  $p_{4s} = 800\text{ kPa}$ ,  $s_{4s} = s_3 = 6,8127\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  → vapor superaquecido

tabela:  $h_{4s} = 2837,83\text{ kJ/kg}$

Estado 4:  $p_4 = 800\text{ kPa}$ ,  $\eta_T = \frac{w_r}{w_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \Rightarrow h_4 = h_3 - \eta_T(h_3 - h_{4s}) = 2953,39\text{ kJ/kg}$

Estado 5:  $T_5 = 400^\circ\text{C}$ ,  $p_5 = 800\text{ kPa}$  → vapor superaquecido

tabelas:  $h_5 = 3267,07\text{ kJ/kg}$ ,  $s_5 = 7,5715\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 6s:  $p_{6s} = 100\text{ kPa}$ ,  $s_{6s} = s_5 = 7,5715\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  → vapor superaquecido

tabela:  $h_{6s} = 2759,77\text{ kJ/kg}$

Estado 6:  $p_6 = 100\text{ kPa}$ ,  $h_6 = h_5 - \eta_T(h_5 - h_{6s}) = 2835,86\text{ kJ/kg}$

Estado 7:  $T_7 = 400^\circ\text{C}$ ,  $p_7 = 100\text{ kPa}$  → vapor superaquecido

tabelas:  $h_7 = 3728,11\text{ kJ/kg}$ ,  $s_7 = 8,5434\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 8s:  $p_{8s} = 10\text{ kPa}$ ,  $s_{8s} = s_7 = 8,5434\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  → vapor superaquecido

tabela:  $h_{8s} = 2725,44\text{ kJ/kg}$

Estado 8:  $p_8 = 10\text{ kPa}$ ,  $h_8 = h_7 - \eta_T(h_7 - h_{8s}) = 2808,34\text{ kJ/kg}$

Substituindo os valores das entalpias na eq. (1), obtemos  $\dot{m} = 32,14\text{ kg/s}$ .

Para calcular o rendimento do ciclo, vamos desprezar o trabalho na bomba. Assim, o rendimento é dado por

$$\eta = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_V} = \frac{w_T}{q_V} = \frac{(h_3 - h_4 + h_5 - h_6 + h_7 - h_8)}{(h_3 - h_2 + h_5 - h_4 + h_7 - h_6)} \quad (2)$$

Falta somente calcular a entalpia do estado 2 mas para isso precisamos calcular primeiramente a entalpia do estado 1.

Estado 1:  $p_1 = 10\text{ kPa}$ ,  $x_1 = 0,0$ . Tabelas:  $h_1 = 191,81\text{ kJ/kg}$ ,  $v_1 = 0,001010\text{ m}^3/\text{kg}$

Estado 2:  $p_2 = 12000\text{ kPa}$ ,  $(p_2 - p_1)v_1 \simeq h_2 - h_1 \Rightarrow h_2 = h_1 + (p_2 - p_1)v_1 = 203,92\text{ kJ/kg}$

Substituindo na eq. (2), obtemos  $\eta = 0,374$ .

**3)** Para solução de todas as perguntas deste exercício convém, antes, determinar as entalpias de todos os principais estados do ciclo.

Estado 1:  $p_1 = 3,43\text{ kPa}$  e  $x_1 = 0 \Rightarrow h_1 = 109,81\text{ kJ/kg}$  e  $v_1 = 1,003 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{kg}$ .

Estado 2: Considerando bomba 1 isentrópica,

$$h_2 = h_1 - v_1 (p_1 - p_2) = 109,81 - 1,003 \times 10^{-3} \times (3,43 - 117) \Rightarrow h_2 = 109,92 \text{ kJ/kg}$$

Estado 3:  $p_3 = p_2 = 117 \text{ kPa}$  e  $x_3 = 0 \Rightarrow h_3 = 435,70 \text{ kJ/kg}$  e  $v_3 = 1,046 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Estado 4: Considerando bomba 2 isentrópica,

$$h_4 = h_3 - v_3 (p_3 - p_4) = 435,70 - 1,046 \times 10^{-3} \times (117 - 686) \Rightarrow h_4 = 436,30 \text{ kJ/kg}$$

Estado 5:  $p_5 = p_4 = 686 \text{ kPa}$  e  $x_5 = 0 \Rightarrow h_5 = 693,58 \text{ kJ/kg}$  e  $v_5 = 1,107 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Estado 6: Considerando bomba 3 isentrópica,

$$h_6 = h_5 - v_5 (p_5 - p_6) = 693,58 - 1,107 \times 10^{-3} \times (686 - 882) \Rightarrow h_6 = 693,80 \text{ kJ/kg}$$

Estado 7:  $p_7 = 8820 \text{ kPa}$  e  $T_7 = 535 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow h_7 = 3475,39 \text{ kJ/kg}$  e  $s_7 = 6,7810 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Estado 8:  $p_8 = p_5 = p_4 = 686 \text{ kPa}$  e  $s_8 = s_7 = 6,7810 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Como à  $686 \text{ kPa}$ ,  $s_{8v} \approx 6,72 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) < s_8$ , segue-se que o estado 8 é de vapor superaquecido e  $h_8 = 2790,81 \text{ kJ/kg}$ .

Estado 9:  $p_9 = p_3 = p_2 = 117 \text{ kPa}$  e  $s_9 = s_8 = s_7 = 6,7810 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . À  $117 \text{ kPa}$ ,  $s_{9l} = 1,3511 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  e  $s_{9v} = 7,3083 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Como  $s_{9l} < s_9 < s_{9v}$ , segue-se que o estado 9 é mistura de líquido e vapor. Da mesma tabela:  $h_{9l} = 435,70 \text{ kJ/kg}$  e  $h_{9v} = 2682,19 \text{ kJ/kg}$ .

$$x_9 = \frac{s_9 - s_{9l}}{s_{9v} - s_{9l}} = 0,9115$$

$$h_9 = (1 - x_9)h_{9l} + x_9h_{9v} = 2483,34 \text{ kJ/kg}$$

Estado 10:  $p_{10} = p_1 = 3,43 \text{ kPa}$  e  $s_{10} = s_9 = s_8 = s_7 = 6,7810 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . À  $3,43 \text{ kPa}$   $s_{10l} = 0,3838 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  e  $s_{10v} = 8,5333 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Como  $s_{10l} < s_{10} < s_{10v}$ , segue-se que o estado 10 é mistura de líquido e vapor. Da mesma tabela:  $h_{10l} = 109,8063 \text{ kJ/kg}$  e  $h_{10v} = 2549,314 \text{ kJ/kg}$ .

$$x_{10} = \frac{s_{10} - s_{10l}}{s_{10v} - s_{10l}} = 0,7850$$

$$h_{10} = (1 - x_{10})h_{10l} + x_{10}h_{10v} = 2024,78 \text{ kJ/kg}$$

**a.** Designa-se por  $\alpha_1$  a fração da vazão mássica extraída em 8 para o aquecedor 1; e  $\alpha_2$  a fração da vazão mássica extraída em 9 para o aquecedor 2. Assim, um balanço de energia no aquecedor 1, resulta:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \dot{m} h_8 + (1 - \alpha_1) \dot{m} h_4 &= \dot{m} h_5 \\ \alpha_1 &= \frac{h_5 - h_4}{h_8 - h_4} = \frac{693,58 - 436,30}{2790,81 - 436,30} = 0,1093 \end{aligned}$$

De forma semelhante, o balanço de energia no aquecedor 2 fornece:

$$\begin{aligned} \alpha_2 \dot{m} h_9 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \dot{m} h_2 &= (1 - \alpha_1) \dot{m} h_3 \\ \alpha_2 &= \frac{h_3 - h_2 + \alpha_1 (h_2 - h_3)}{h_9 - h_2} = \frac{435,70 - 109,92 + 0,1093 \times (109,92 - 435,70)}{2483,34 - 109,92} = 0,1223 \end{aligned}$$

b. O trabalho específico produzido pela turbina vale:

$$w_t = (h_7 - h_8) + (1 - \alpha_1)(h_8 - h_9) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_9 - h_{10})$$

$$w_t = (3475,39 - 2790,81) + (1 - 0,1093) \times (2790,81 - 2483,34) + (1 - 0,1093 - 0,1223) \times (2483,34 - 2024,78)$$

$$w_t = 1310,84 \text{ kJ/kg}$$

c. Para o cálculo do rendimento, calcula-se antes a quantidade de calor adicionada ao fluido de trabalho no gerador de vapor:

$$q_{GV} = h_7 - h_6 = 3475,39 - 693,80 = 2781,59 \text{ kJ/kg}$$

Considerando as bombas:

$$w_b = (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1)(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

$$w_b = (1 - 0,1093 - 0,1223) \times (109,81 - 109,92) + (1 - 0,1093) \times (435,70 - 436,30) + (693,58 - 693,80)$$

$$w_b = -0,839 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{w_t - |w_b|}{q_{GV}} = \frac{1310,84 - 0,839}{2781,59} = 0,47095 = 47,1\%$$

Desprezando as bombas:

$$\eta = \frac{w_t}{q_{GV}} = \frac{1310,84}{2781,59} = 0,47126 = 47,1\%$$

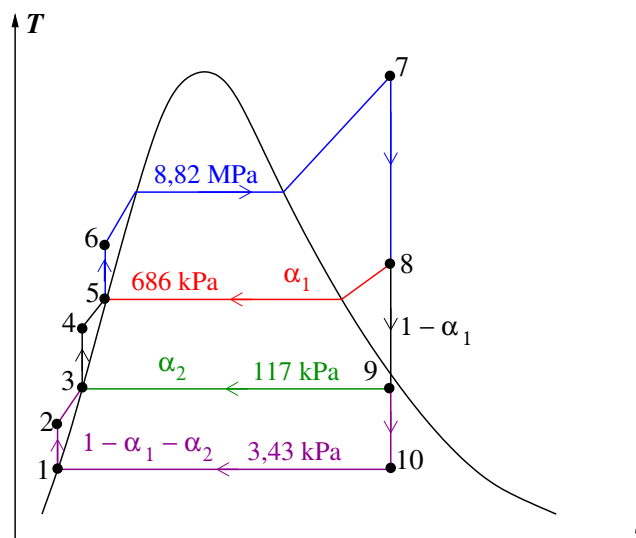
d. Modelando a quantidade de calor recebida pela água de arrefecimento como:

$$q_{arref} = h_b - h_a = C_p(T_b - T_a) = C_p \Delta T_{arref} = 4,18 \times 3 = 12,54 \text{ kJ/kg}$$

Balço de energia no condensador:

$$-\dot{m}_c(h_1 - h_{10}) = \dot{m}_a q_{arref} \Rightarrow \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} = \frac{h_{10} - h_1}{q_{arref}} = \frac{2024,78 - 109,81}{12,54} = 152,71$$

e. A seguir o diagrama  $T \times s$  pedido



4) Inicia-se a solução determinando as entalpias de todos os principais estados do ciclo, começando por aqueles cujas informações são suficientes para sua determinação.

Estado 3:  $p_3 = 10 \text{ bar}$  e  $x_3 = 0 \Rightarrow h_3 = 76,22 \text{ kJ/kg}$ .

Estados 4 e 5: Por se tratarem de expansões através de válvulas, os processos  $3 \rightarrow 4$  e  $4 \rightarrow 5$  são isoentálpicos. Assim,  $h_5 = h_4 = h_3 = 76,22 \text{ kJ/kg}$ .

Estado 6:  $T_6 = -18^\circ\text{C}$  e  $x_6 = 1 \Rightarrow h_6 = 179,63 \text{ kJ/kg}$ .

Estado 7:  $p_7 = 3,2 \text{ bar}$  e  $x_7 = 1 \Rightarrow h_7 = 187,98 \text{ kJ/kg}$ .

A este ponto já é possível responder ao item (a).

a. Para o evaporador 2:

$$\dot{Q}_{ev,2} = \dot{m}_6(h_6 - h_5) \Rightarrow \dot{m}_6 = \dot{m}_{ev,2} = \frac{\dot{Q}_{ev,2}}{h_6 - h_5} = \frac{3 \times 3,517}{179,63 - 76,22} = 0,102 \text{ kg/s}$$

Para o evaporador 1:

$$\dot{Q}_{ev,1} = \dot{m}_7(h_7 - h_4) \Rightarrow \dot{m}_7 = \dot{m}_{ev,1} = \frac{\dot{Q}_{ev,1}}{h_7 - h_4} = \frac{2 \times 3,517}{187,98 - 76,22} = 0,063 \text{ kg/s}$$

b. A potência consumida no compressor depende das entalpias na entrada, 1, e saída, 2, a serem determinadas.

Estado 1: Um balanço de energia para a mistura das vazões que chegam por 6 e 8 e transformam-se em 1, resulta:

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_6 h_6 = (\dot{m}_7 + \dot{m}_6) h_1 \Rightarrow h_1 = \frac{\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_6 h_6}{\dot{m}_7 + \dot{m}_6}$$

$$h_1 = \frac{0,063 \times 187,98 + 0,102 \times 179,63}{0,063 + 0,102} = 182,82 \text{ kJ/kg}$$

Note que  $p_1 = p_6$ , pois a válvula 3 reduz a pressão de  $p_7 = 3,2 \text{ bar}$  para  $p_8 = p_6 = p_1 = p_{sat @ -18^\circ\text{C}} = 1,636 \text{ bar}$ . Assim, para o estado 1 são conhecidos  $h_1$  e  $p_1$ . Por interpolação obtém-se  $s_1 \cong 0,72 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

Estado 2:  $p_2 = 10 \text{ bar}$  e  $s_2 = s_1 = 0,72 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \Rightarrow h_2 = 216,03 \text{ kJ/kg}$ .

Calculando a potência do compressor:

$$\dot{W}_{cp} = (\dot{m}_7 + \dot{m}_6) (h_2 - h_1) = (0,063 + 0,102) \times (216,03 - 182,82) = 5,48 \text{ kW}$$

c. Cálculo da taxa de calor rejeitado no condensador:

$$\dot{Q}_{cd} = (\dot{m}_7 + \dot{m}_6) (h_3 - h_2) = (0,063 + 0,102) \times (76,22 - 216,03) = -23,06 \text{ kW}$$

d. Cálculo do coeficiente de desempenho do ciclo de refrigeração:

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{ev,1} + \dot{Q}_{ev,2}}{|\dot{W}_{cp}|} = \frac{3,517 \times (2 + 3)}{5,48} = 3,21$$

e. A seguir o diagrama  $T \times s$  pedido

