

TERMODINÁMICA

Problema – 1 (5 puntos)

Nombre _____

En una central eléctrica de ciclo combinado se obtienen 170 MW de potencia neta total, con un rendimiento del 49%. Los ciclos de Brayton y Rankine asociados tienen rendimientos del 38,4% y 36% respectivamente. Se dispone de la siguiente información referente a la instalación:

Ciclo de Brayton:

- Ciclo básico CBT
- Fluido de trabajo: aire, a lo largo de todo el ciclo, considerado como gas perfecto ($\gamma=1,4$, $R=287 \text{ J/kg-K}$).
- Temperatura de los gases de entrada en la turbina: 1200°C .
- Rendimiento adiabático-isentrópico del compresor: 80%
- Flujo másico de aire: 450 kg/s

Caldera de recuperación:

- Adiabática en su conjunto (no hay pérdidas de calor hacia el exterior).
- Temperatura de salida de los gases a la atmósfera: 260°C .

Ciclo de Rankine:

- Ciclo regenerativo con recalentamiento, con una extracción de vapor en la turbina de baja presión a 5 bar.
- Vapor a la entrada de la turbina de alta presión a 350°C y 80 bar.
- Vapor a la entrada de la turbina de baja presión a 350°C y 20 bar.
- Presión de trabajo del condensador: 0,1 bar.
- La extracción de vapor de la turbina de baja presión se dirige a un calentador abierto.
- El agua de alimentación del calentador sale como líquido saturado a la presión del vapor de extracción.
- El agua sale del condensador como líquido saturado.
- Rendimiento adiabático-isentrópico de la turbina de baja presión, desde la entrada a la salida, del 90%.
- La línea de expansión de la turbina de baja presión, desde la entrada a la salida, se aproximará a una recta en el diagrama de Mollier.
- Se supone que las bombas tienen una eficiencia del 100%, es decir, en las bombas se considera:
 $\Delta h = v_{\text{entrada}} * \Delta P$

En todos los conductos y equipos que no sean turbinas, compresores y bombas se desprecian las pérdidas de presión.

Forzosamente las turbinas de vapor se han de resolver usando el diagrama de Mollier adjunto, dibujando en él las expansiones en las dos turbinas; **las lecturas de entalpía en este diagrama se redondearán a la cincuentena más próxima.**

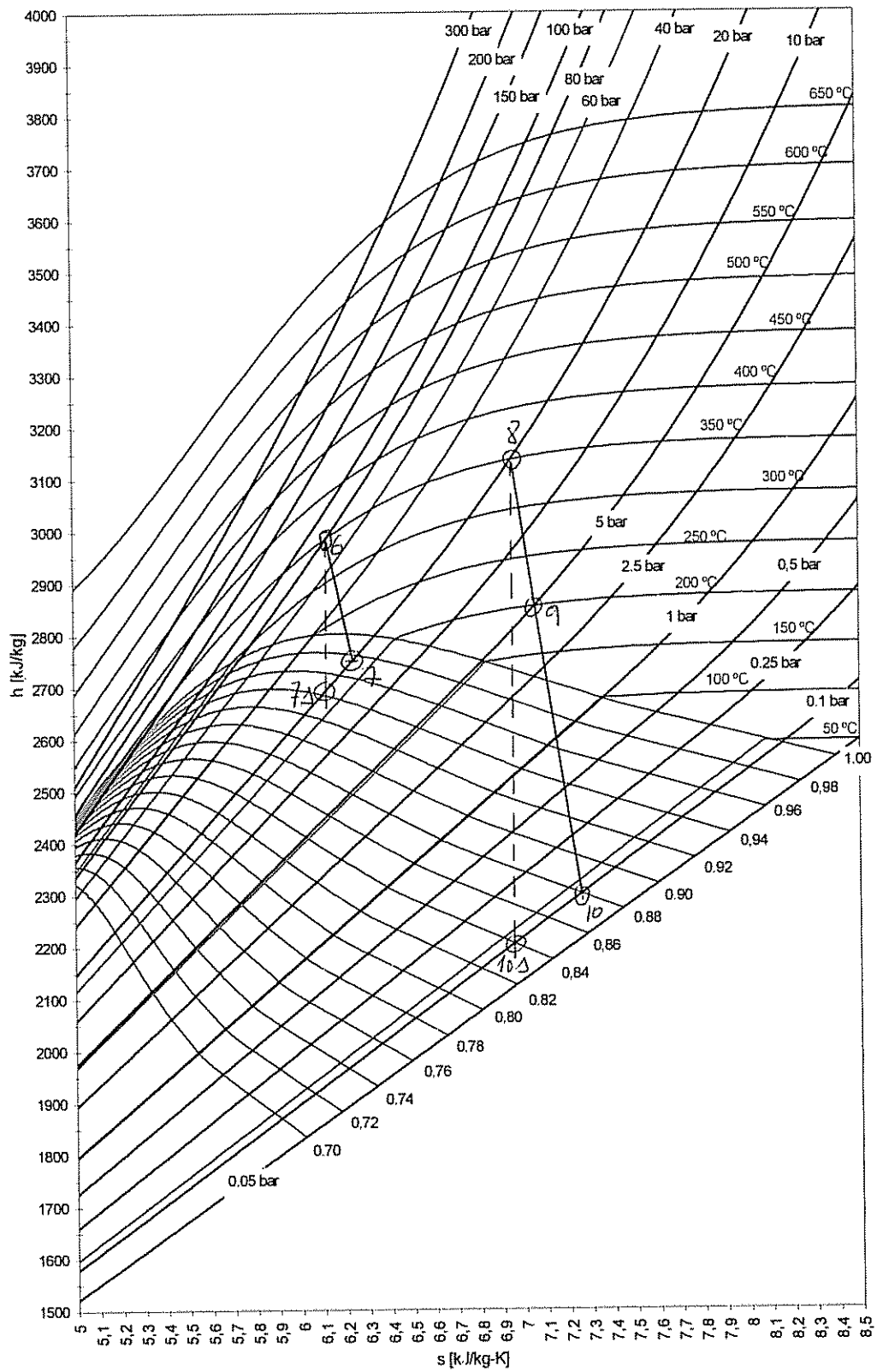
Se pide:

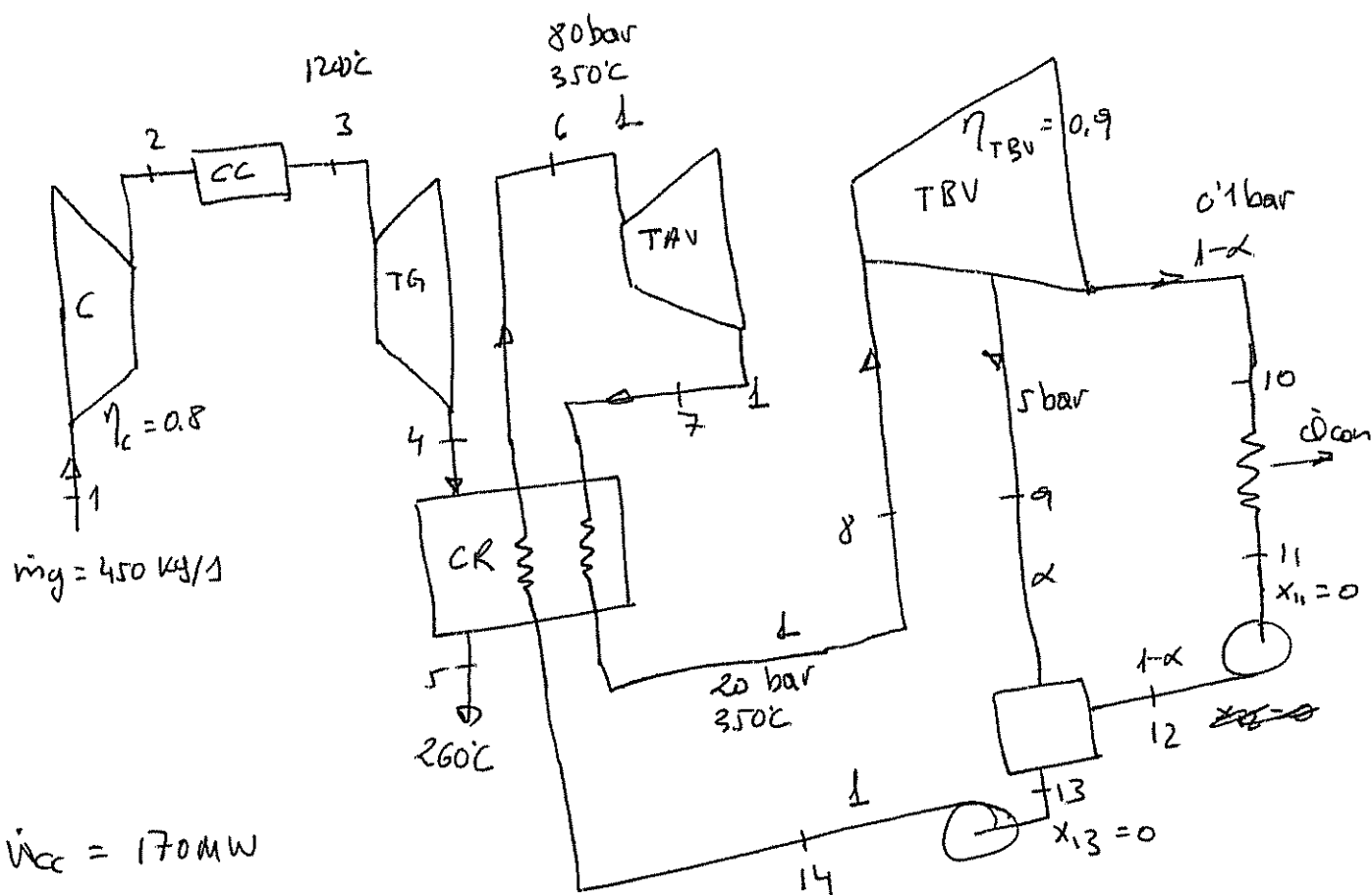
- Esquema de la central
- Temperaturas del aire en la entrada del compresor, salida del mismo y salida de la turbina.
- Relación de presiones y rendimiento adiabático-isentrópico de la turbina del ciclo de Brayton.
- Flujo másico de vapor que recorre la turbina de alta presión
- Rendimiento adiabático-isentrópico de la turbina de alta presión del ciclo de Rankine.

Tabla de agua en saturación (líquido-vapor)

P (bar)	T (°C)	v_f (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	h_f (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)
0,1	45,8	0,001010	14,67056	191,81	2583,9
5	151,8	0,001093	0,374804	640,19	2748,1

Diagrama de Mollier del agua





$$\dot{W}_{cc} = 170 \text{ MW}$$

$$\eta_{cc} = 49\%$$

$$\eta_{ccg} = 38,4\%$$

$$\eta_{cv} = 36\%$$

Ciclo de gás

$$0,49 = \frac{170 \times 10^3}{\dot{Q}_{cc}} \rightarrow \dot{Q}_{cc} = 346,939 \text{ MW} = \dot{m}_g \times 1,005 \times (1200 - T_2) \times 10^3$$

$$T_2 = 432,86^\circ\text{C}$$

$$0,287 = c_p - \frac{c_p}{1,4} \rightarrow c_p = 1,005 \text{ kJ/kg-K}$$

$$0,384 = \frac{\dot{W}_{ccg}}{346,939} \Rightarrow \dot{W}_{ccg} = 133,2246 \text{ MW} = 450 \times 1,005 [(432,86 - T_1) + (1200 - T_4)]$$

$$T_1 - T_4 = -472,56$$

Ciclo de vapor

$$h_6 = 3000 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{7s} = 2700 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 = 3150 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10s} = 2200 \text{ kJ/kg}$$

$$0,9 = \frac{3150 - h_{10}}{3150 - 2200} \rightarrow h_{10} = 2295 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_9 = 2850 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{11} = 191,81 \text{ kJ/kg}$$

$$v_{11} = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{12} \approx 191,81 + 0,001010 (5 - 0,1) 100 = 192,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{13} = 640,19 \text{ kJ/kg}$$

$$v_{13} = 0,001093 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{14} \approx 640,19 + 0,001093 (80 - 5) 100 = 648,39 \text{ kJ/kg}$$

$$\alpha h_9 + (1-\alpha) h_{12} = h_{13} \rightarrow \alpha = \frac{640,19 - 192,3}{2850 - 192,3} = 0,1685$$

$$\begin{cases} w_{TV} = (3000 - h_7) + (3150 - \alpha 2850 - (1-\alpha) 2295) = 3761,48 - h_7 \\ w_B = (1-\alpha)(192,3 - 191,81) + (648,39 - 640,19) = 8,61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{cases}$$

$$w_{cv} = 3761,48 - h_7 - 8,61 = [3752,87 - h_7] \text{ kJ/kg}$$

$$q_{Tcv} = (h_6 - h_{14}) + (h_8 - h_7) = 3000 - 648,39 + 3150 - h_7 = [5501,61 - h_7] \text{ kJ/kg}$$

$$0,36 = \frac{3752,87 - h_7}{5501,61 - h_7} \Rightarrow h_7 = 2769,2 \text{ kJ/kg}$$

Calcular recuperación

$$\dot{Q}_{CR} = 450 \times 1,005 (T_4 - 260) = \dot{m}_v \underbrace{(5501,61 - 2769,2)}_{2732,41}$$

$$\boxed{T_4 - 260 = \dot{m}_v 6,04181}$$

$$170 \times 10^3 = 133224,6 + \dot{m}_v [3752,87 - 2769,2]$$

$$\rightarrow \boxed{\dot{m}_v = 37,386 \text{ kg/s}}$$

$$\underline{T_4 = 485,88^\circ\text{C}}$$

$$\underline{T_1 = 13,32^\circ\text{C}}$$

compresor:

$$0,8 = \frac{T_{2s} - (13,32 + 273)}{432,86 - 13,32} \Rightarrow T_{2s} = 621,95 \text{ K}$$

$$\frac{621,95}{13,32 + 273} = r_p^{\frac{1,4-1}{1,4}} \Rightarrow \underline{\underline{r_p = 15,11}}$$

turbina gas:

$$T_{4s} = 1473 \times \left(\frac{1}{15,11}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 678,1 \text{ K}$$

$$\eta_{Tg} = \frac{1200 - 485,88}{1200 - (678,1 - 273)} = \underline{\underline{0,8984}}$$

Turbina vapor agua:

$$h_{7s} = 2700 \text{ kJ/kg}; \eta_{TAV} = \frac{3000 - 2769,2}{3000 - 2700} = \underline{\underline{0,769}}$$

TERMODINÁMICA

Problema – 2 (5 puntos)

Nombre _____

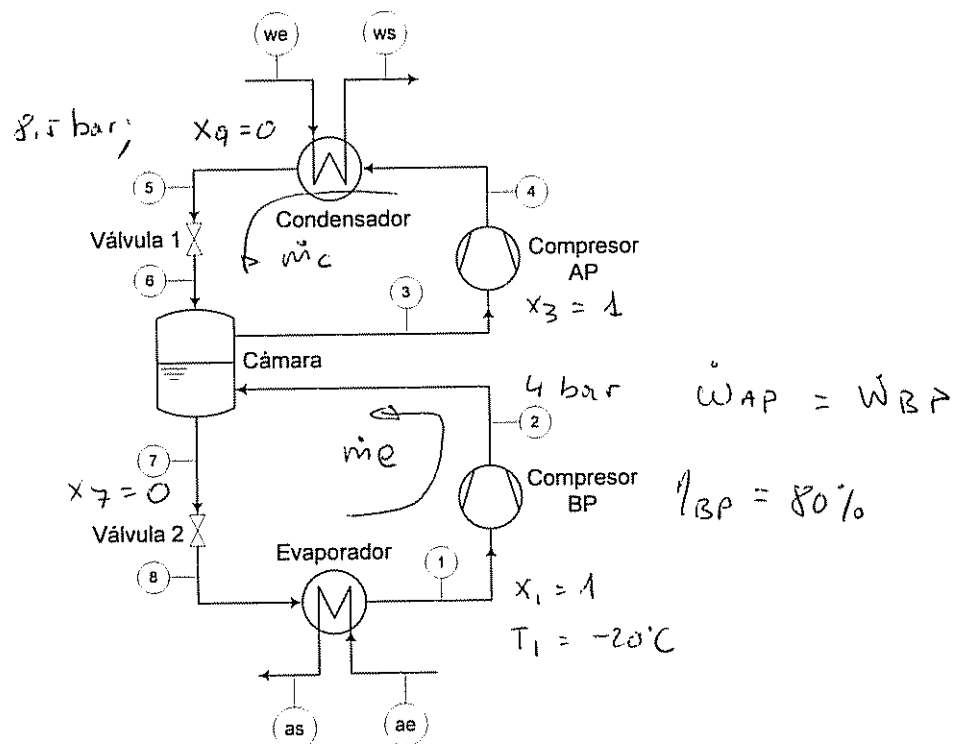
La figura adjunta muestra un ciclo de refrigeración de compresión múltiple directa que opera con R134a. En el condensador el R134a cede calor a una corriente de agua (líquido incompresible $c = 4,18 \text{ kJ/kg-K}$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) que llega a 25°C y sale a 30°C , mientras que en el evaporador absorbe calor de una corriente de $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ de líquido anticongelante (líquido incompresible $c = 3,5 \text{ kJ/kg-K}$; $\rho = 1057 \text{ kg/m}^3$) que llega a -10°C y sale a -15°C .

El R134a sale como líquido saturado del condensador a $8,5 \text{ bar}$ y como vapor saturado del evaporador a -20°C . La presión de salida del compresor BP es 4 bar . La entrada al compresor AP se encuentra en vapor saturado y la entrada a la válvula 2 en líquido saturado. No hay variación de presión en la cámara.

El rendimiento isentrópico del compresor BP es 80% y se desprecian las caídas de presión en intercambiadores y conductos. Ambos compresores consumen el mismo trabajo.

Determinar:

- a) Para una máquina totalmente reversible que opere entre las mismas corrientes de agua y anticongelante:
 - a.1) COP
 - a.2) Potencia mecánica consumida para absorber el mismo calor en el evaporador
- b) Para la instalación real:
 - b.1) COP de la instalación
 - b.2) Rendimiento isentrópico del compresor AP
 - b.3) Variación de entropía del universo



Tablas de saturación del R134a (líquido-vapor)

P [bar]	T [°C]	v_f [dm³/kg]	v_g [m³/kg]	u_f [kJ/kg]	u_g [kJ/kg]	h_f [kJ/kg]	h_g [kJ/kg]	s_f [kJ/kg-K]	s_g [kJ/kg-K]
0,8443	-30	0,7201	0,2258	12,58	213,12	12,64	232,19	0,0530	0,9559
1,0173	-26	0,7264	0,1895	17,67	215,42	17,75	234,70	0,0738	0,9515
1,2172	-22	0,7328	0,1600	22,80	217,71	22,89	237,19	0,0943	0,9476
1,4469	-18	0,7394	0,1359	27,96	220,00	28,07	239,67	0,1147	0,9440
1,7093	-14	0,7463	0,1160	33,15	222,29	33,28	242,12	0,1349	0,9408
2,0074	-10	0,7533	0,0996	38,38	224,56	38,53	244,55	0,1550	0,9378
2,3444	-6	0,7607	0,0859	43,64	226,82	43,82	246,95	0,1748	0,9351
2,7236	-2	0,7683	0,0744	48,94	229,07	49,15	249,33	0,1945	0,9327
3,1484	2	0,7761	0,0647	54,28	231,30	54,53	251,66	0,2141	0,9305
3,6223	6	0,7843	0,0565	59,66	233,51	59,95	253,96	0,2335	0,9285
4,1489	10	0,7929	0,0495	65,09	235,69	65,42	256,22	0,2528	0,9266
4,7319	14	0,8018	0,0435	70,56	237,86	70,94	258,43	0,2720	0,9249
5,3752	18	0,8112	0,0383	76,07	239,99	76,51	260,59	0,2911	0,9233
6,0827	22	0,8209	0,0339	81,64	242,09	82,14	262,69	0,3101	0,9218
6,8584	26	0,8312	0,0300	87,26	244,15	87,83	264,73	0,3290	0,9204
7,7064	30	0,8421	0,0266	92,93	246,17	93,58	266,71	0,3479	0,9190
8,6311	34	0,8535	0,0237	98,67	248,15	99,41	268,61	0,3667	0,9176
9,6368	38	0,8657	0,0211	104,47	250,07	105,30	270,44	0,3855	0,9162
10,7280	42	0,8786	0,0189	110,34	251,92	111,28	272,17	0,4043	0,9148
11,9095	46	0,8924	0,0169	116,28	253,71	117,34	273,80	0,4231	0,9133
13,1861	50	0,9072	0,0151	122,30	255,42	123,50	275,32	0,4419	0,9117

Tablas del R134a como vapor sobrecalentado

1,3 bar (Tsat = -20,5°C)					4 bar (Tsat = 8,91°C)				
T	v	u	h	s	T	v	u	h	s
[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg·kg]	[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg·kg]
sat	0,15036	218,58	238,12	0,9462	sat	0,05127	235,10	255,61	0,9271
-20	0,15068	218,93	238,52	0,9478	9	0,05123	235,17	255,66	0,9273
-18	0,15213	220,37	240,15	0,9542	11	0,05178	236,82	257,53	0,9339
-16	0,15358	221,81	241,77	0,9605	13	0,05233	238,46	259,40	0,9404
-14	0,15501	223,25	243,40	0,9668	15	0,05288	240,10	261,25	0,9469
-12	0,15644	224,69	245,03	0,9731	17	0,05342	241,74	263,11	0,9533
-10	0,15787	226,14	246,66	0,9793	19	0,05395	243,38	264,96	0,9597
-8	0,15928	227,59	248,30	0,9855	21	0,05448	245,01	266,80	0,9660
-6	0,16069	229,04	249,93	0,9916	23	0,05500	246,65	268,64	0,9722
-4	0,16209	230,50	251,57	0,9978	25	0,05552	248,28	270,49	0,9784
-2	0,16349	231,96	253,22	1,0038	27	0,05603	249,92	272,33	0,9846

6 bar (Tsat = 21,55°C)					8,5 bar (Tsat = 33,45°C)				
T	v	u	h	s	T	v	u	h	s
[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg·kg]	[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg·kg]
sat	0,03433	241,86	262,46	0,9220	sat	0,02409	247,88	268,36	0,9178
22	0,03439	242,24	262,87	0,9234	34	0,02416	248,39	268,92	0,9196
24	0,03480	244,00	264,88	0,9302	36	0,02448	250,28	271,08	0,9267
26	0,03520	245,76	266,88	0,9368	38	0,02479	252,15	273,23	0,9336
28	0,03559	247,50	268,86	0,9435	40	0,02510	254,01	275,35	0,9403
30	0,03598	249,24	270,83	0,9500	42	0,02541	255,86	277,45	0,9471
32	0,03637	250,97	272,80	0,9564	44	0,02570	257,70	279,55	0,9537
34	0,03675	252,70	274,75	0,9628	46	0,02600	259,53	281,63	0,9602
36	0,03712	254,43	276,71	0,9692	48	0,02629	261,35	283,70	0,9667
38	0,03750	256,16	278,65	0,9754	50	0,02657	263,18	285,76	0,9731
40	0,03787	257,88	280,60	0,9817	52	0,02685	264,99	287,82	0,9794

agua condensador

$$c = 4,18 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$25^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$$

anticongelante evaporador

$$19,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$c = 3,5 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\rho = 1057 \text{ kg/m}^3$$

$$-10^\circ\text{C} \rightarrow -15^\circ\text{C}$$

a) Máquina totalmente reversible

$$a.1.) \quad \bar{T}_w = \frac{h_{ws} - h_{we}}{\Delta s_w - \Delta s_e} = \frac{\phi (30 - 25)}{\phi L \left(\frac{30 + 273}{25 + 273} \right)} = 300,49 \text{ K}$$

$$\bar{T}_a = \frac{h_{as} - h_{ae}}{\Delta s_a - \Delta s_e} = \frac{c (-15 + 10)}{c L \left(\frac{273 - 15}{273 - 10} \right)} = 260,49 \text{ K}$$

$$\text{COP}_{\text{max}} = \frac{260,49}{300,49 - 260,49} = \underline{\underline{6,51}}$$

a.2.) Cálculo evaporador:

$$\dot{Q}_e = \frac{19,5 \text{ m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 1057 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} (-10 + 15) =$$

$$= 100,195 \text{ kW}$$

$$6,51 = \frac{100,195}{\dot{W}_{\text{min}}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{min}} = \underline{\underline{15,39 \text{ kW}}}$$

b) Instalación real

$$h_1 = 238,43 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_1 = 0,9458 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_{2s} = 260,94 \text{ kJ/kg}$$

$$0,8 = \frac{260,94 - 238,43}{h_2 - 238,43}$$

$$h_2 = 266,57 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 255,58 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_3 = 0,92714 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_{4s} = 271,22 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{AP} = \frac{271,22 - 255,58}{h_4 - 255,58}$$

$$h_5 = 98,58 \text{ kJ/kg} = h_6$$

$$h_7 = 63,87 \text{ kJ/kg} = h_8$$

$$\dot{Q}_e = 100,19 \text{ kW} = \dot{m}_e (238,43 - 63,87) \Rightarrow \dot{m}_e = 0,574 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_c h_6 + \dot{m}_e h_2 = \dot{m}_c h_3 + \dot{m}_e h_7$$

$$\dot{m}_c = \frac{0,574 (63,87 - 266,57)}{98,58 - 255,58} = 0,741 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{AP} = \dot{W}_{BP}$$

$$0,741 (h_4 - 255,58) = 0,574 (266,57 - 238,43)$$

$$\rightarrow h_4 = 277,38 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{AP} = 0,7176 \quad (b.2)$$

$$\text{COP}_{\text{ref}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{AP} + \dot{W}_{BP}} = \frac{100,195}{2 \times 0,574 \times (266,57 - 238,73)} =$$

$$= \underline{\underline{3,102}} \quad (\text{b.1.})$$

$$\underline{\underline{\frac{ds_u}{dz}}} = \frac{-\dot{Q}_e}{\bar{T}_a} + \frac{\dot{Q}_c}{\bar{T}_w} = \frac{-100,195}{260,49} + \frac{132,49}{300,49} = \underline{\underline{56,28 \frac{W}{K}}} \quad (\text{b.3.})$$

$$\dot{Q}_c = \dot{w}_c (h_4 - h_T) = 0,741 (277,38 - 98,58) =$$

$$= 132,49 \text{ kW}$$