

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 1 (3,5 puntos)

La figura muestra el esquema de un ciclo de potencia de una central nuclear, que opera, en su mayoría, en la zona de vapor húmedo. El vapor saturado sale del generador de vapor (GV) a 60 bar y se expansiona en la turbina de alta (TA) hasta los 10 bar, con una humedad, a la salida de la turbina, del 14 %. A la salida de la TA hay una extracción al calentador de más alta presión, FWHTR, cerrado, y el vapor restante pasa a un separador de humedad (MS) cuya misión es secarlo, a presión constante, de forma que por los drenajes (11) sale agua en estado de líquido saturado (que se dirige hasta el desaireador, a través de su correspondiente válvula de control) y por la salida principal (10) sale vapor saturado. Este vapor pasa por la carcasa de un equipo recalentador (RHTR) en el cual, sin pérdida de presión, se recalienta hasta los 250 °C, a base de condensar, hasta líquido saturado a la presión de tubos, una parte de vapor principal, extraído a la salida del generador de vapor (8). El drenaje de este equipo se conduce hasta la carcasa del calentador de alta presión FWHTR, a través de su correspondiente válvula de control.

El vapor recalentado entra en la turbina de baja (TB-1 + TB-2) en la que se expansiona hasta 0.25 bar (presión del condensador) siguiendo una línea recta en el diagrama de Mollier que es paralela a la recta que une los puntos 7 y 9 en ese diagrama. Entre las turbinas TB-1 y TB-2, a presión de 2.5 bar, existe una extracción de vapor al desaireador (DESAIR), intercambiador abierto, al cual también llegan, además del agua bombeada por la bomba de condensado (BC), los drenajes procedentes de MS y FWHTR, a través de sus correspondientes válvulas reductoras de presión.

Del calentador FWHTR el drenaje sale en condiciones de líquido saturado a la presión de carcasa. No hay pérdidas de presión en tuberías ni intercambiadores. La energía suministrada por las bombas al agua puede tomarse como $\Delta h = \Delta p \cdot v_{\text{entrada}}$.

En la tabla adjunta se dan las propiedades en algunos de los puntos descritos, que pueden usarse también para calcular las propiedades en otros puntos, lo cual, junto con el diagrama de Mollier adjunto, permitirá rellenar todas las casillas de presión, caudal y entalpía de dicha tabla así como cualquier otra que se considere necesaria del resto de la misma.

Se pide:

- Dibujar, en el diagrama de Mollier adjunto, las líneas de expansión de las turbinas de alta y baja, así como el proceso de separación de humedad y recalentamiento del vapor que pasa a través de ellas.
- Distribución de caudales.
- Potencias de bombeo.
- Potencias de cada uno de los elementos de turbina.
- Calor evacuado en el condensador.
- Calor añadido en el generador de vapor.
- Rendimiento del ciclo.
- Rendimiento adiabático-isentrópico global, (12 a 17), de la turbina de baja (TB-1+TB-2).

Diagrama de Mollier del agua

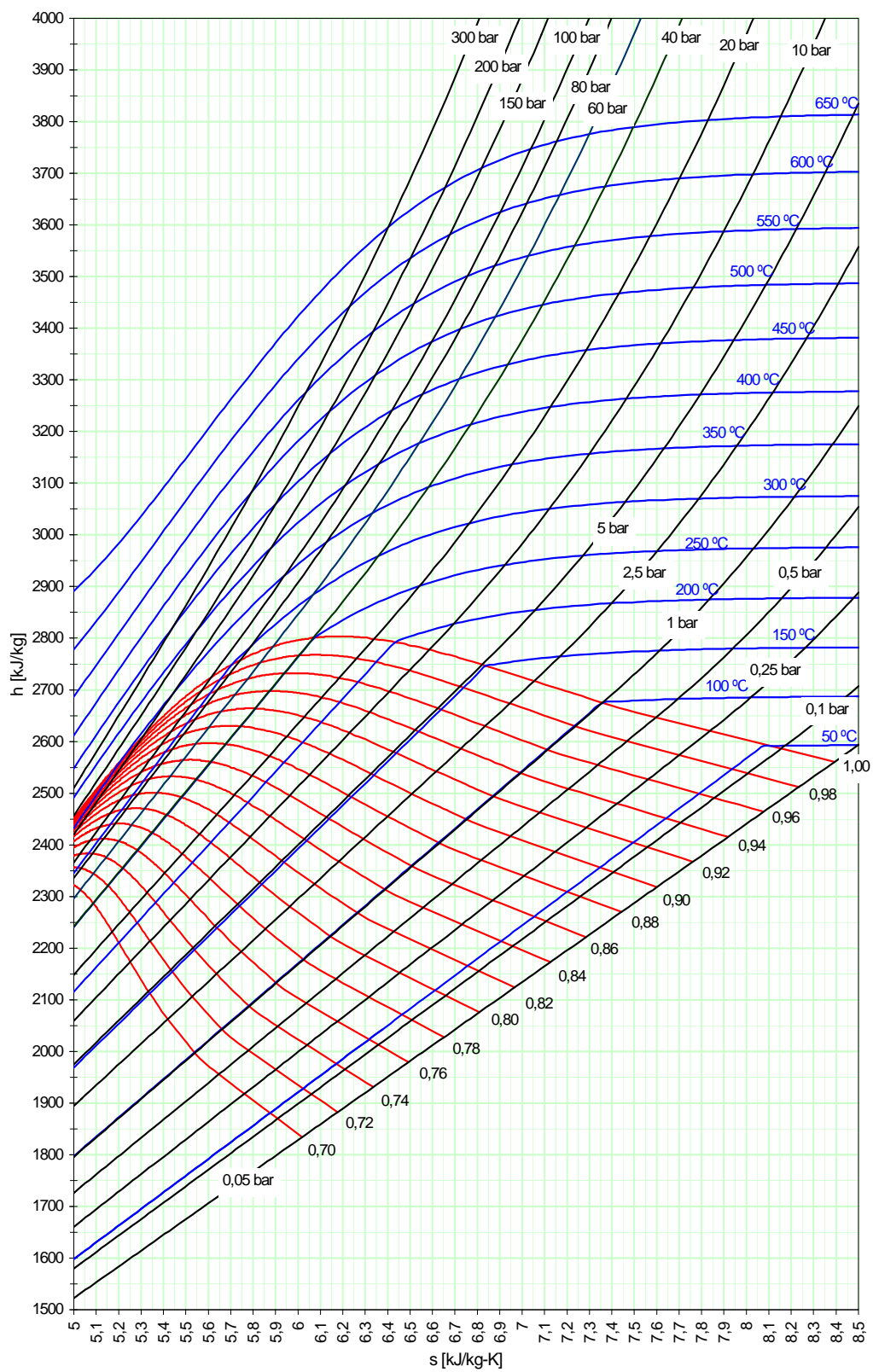
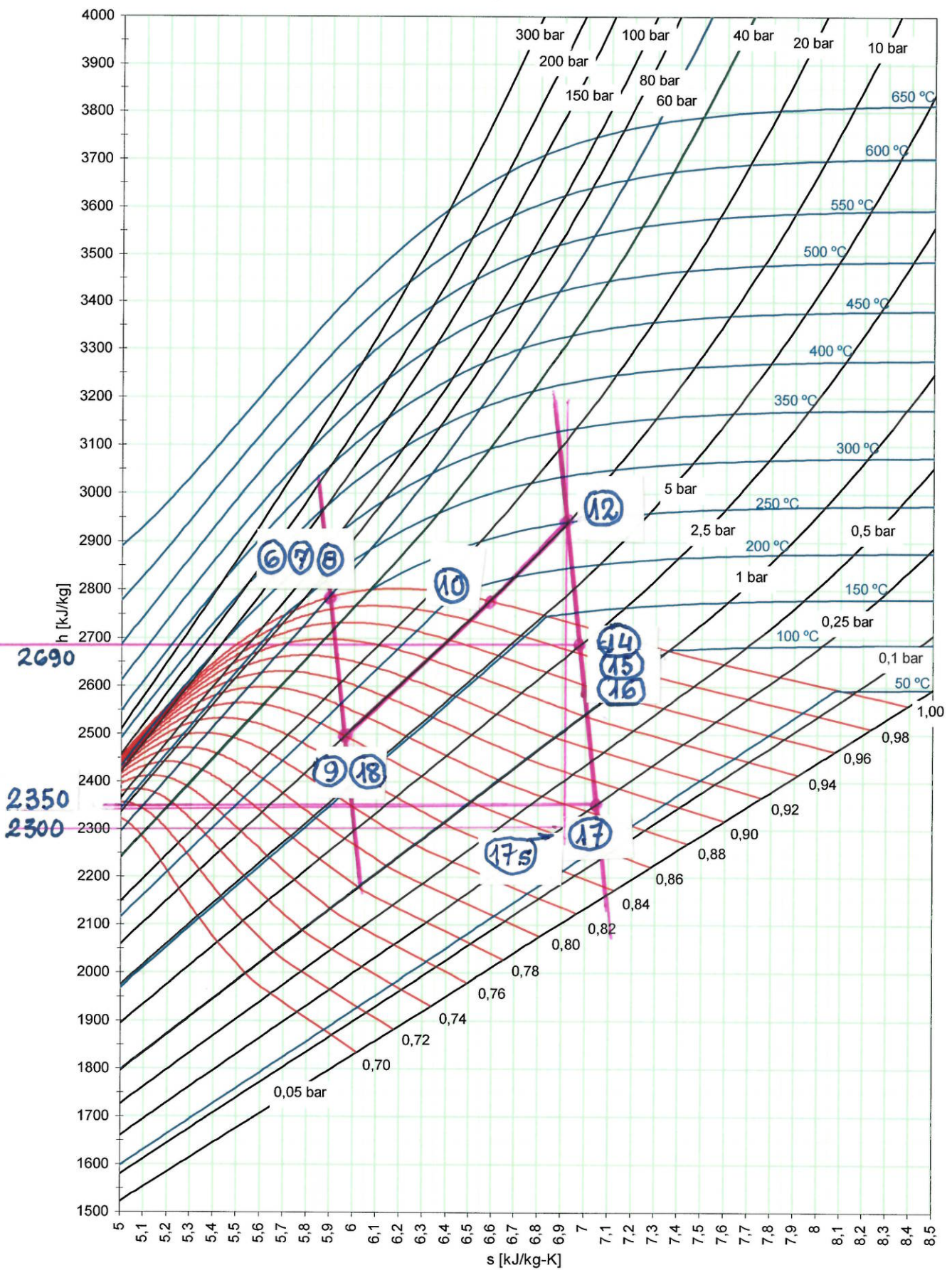
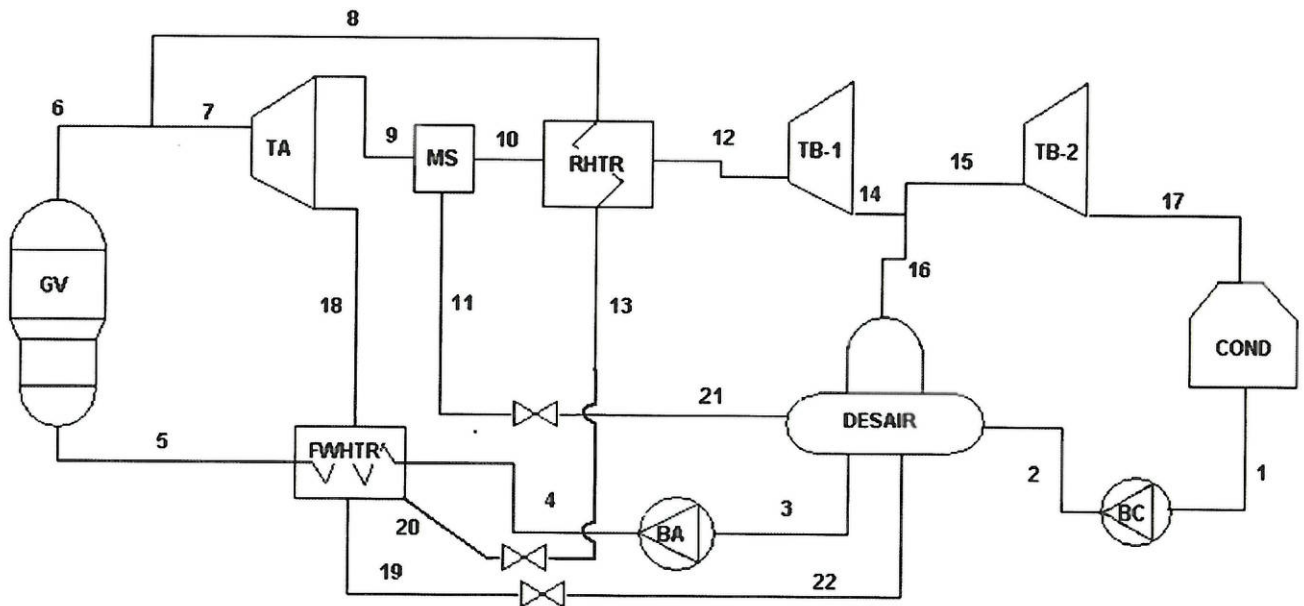


Diagrama de Mollier del agua





	W(kg/s)	P (bara)	T (°C)	Calidad (%)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m³/kg)
1	334.787	0.25	64.96	0	271.93	0.893	0.001020
2	334.787	2.5			272.16		
3	500	2.5	127.41	0	535.35	1.607	0.001067
4	500	60			541.49		
5	500	60	169.89		721.58		
6	500	60	275.59	100	2784.56	5.890	0.032449
7	461.826	60	275.59	100	2784.56	5.890	0.032449
8	38.174	60	275.59	100	2784.56	5.890	0.032449
9	419.789	10			2495.10		
10	361.018	10	179.89	100	2777.12	6.585	0.194349
11	58.77	10	179.89	0	762.68	2.138	0.001127
12	361.018	10	250.00		2943.22	6.927	0.232739
13	38.174	60	275.59	0	1213.73	3.027	0.001319
14	361.018	2.5			2690		
15	334.787	2.5			2690		
16	26.231	2.5			2690		
17	334.787	0.25			2350		
18	42.037	10			2495.10		
19	80.211	10	179.89	0	762.68	2.138	0.001127
20	38.174	10			1213.73		
21	58.77	2.5			762.68		
22	80.211	2.5			762.68		

① Cálculo de entalpías

$$h_2 = h_1 + v_1(p_2 - p_1) = 271.93 + 0.00102(2.5 - 0.25)100 = 272.16 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + v_3(p_4 - p_3) = 535.35 + 0.001067(60 - 2.5)100 = 541.49 \text{ kJ/kg}$$

$$h_9 = 0.86(2777.12 - 762.68) + 762.68 = 2495.10 \text{ kJ/kg} = h_{18}$$

Con esto se puede trazar la línea de expansión de TA y, paralela a ella pasando por punto (12), la línea de expansión de la TB.

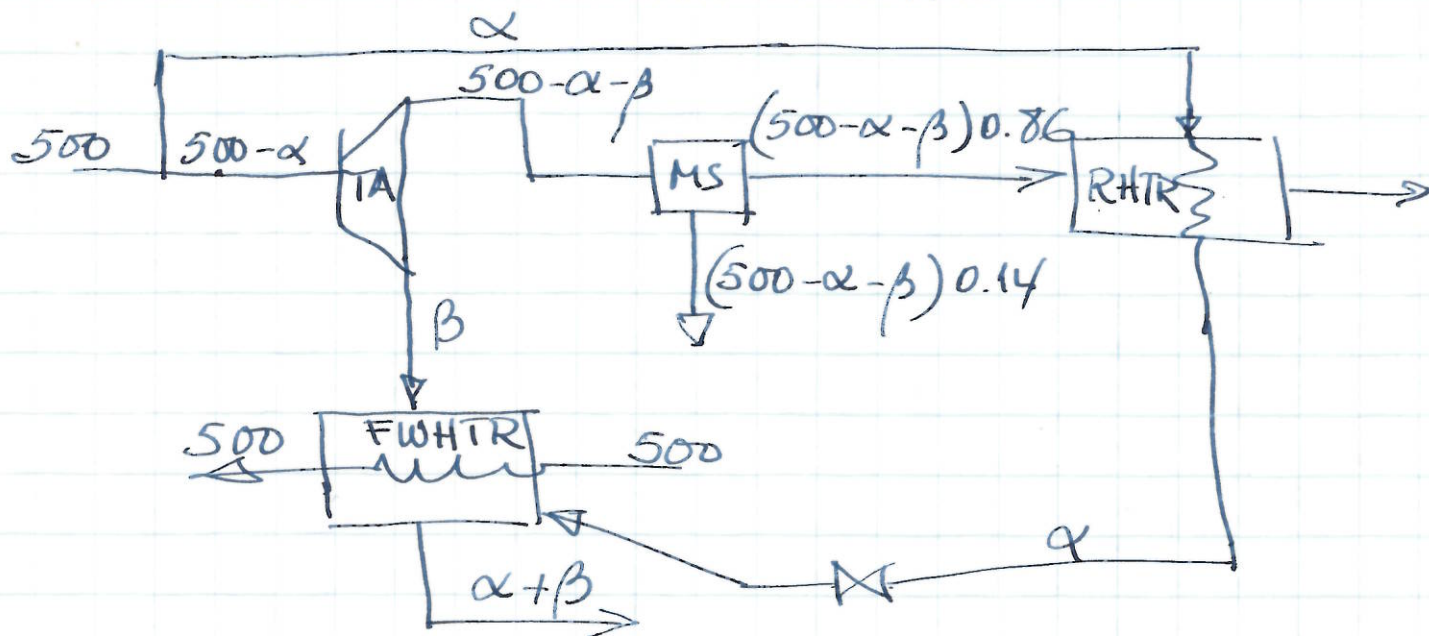
Leyendo en el diagrama se tiene:

$$h_{14}, h_{15}, h_{16} \approx 2690 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{17} \approx 2350 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{20} = h_{13}, h_{21} = h_{11}, h_{22} = h_{19}$$

Balance TA-MS-RHTR-FWHTR



RHTR

$$(500 - \alpha - \beta)0.86(h_{12} - h_{10}) = \alpha(h_8 - h_{13})$$

$$(500 - \alpha - \beta)0.86(2943.22 - 2777.12) = \alpha[2784.56 - 1213.73]$$

$$1713.676\alpha + 142.846\beta = 71423 \quad (I)$$

② FWHTR

$$500 [h_5 - h_4] = \alpha [h_{20} - h_{19}] + \beta [h_{18} - h_{19}]$$

$$500 (721.58 - 541.49) = \alpha (1213.73 - 762.68) + \beta (2495.1 - 762.68)$$

$$451.05\alpha + 1732.42\beta = 90045 \quad (\text{II})$$

$$\alpha = 38.174 \text{ kg/s} \quad \beta = 42.037 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_9 = 500 - \alpha - \beta = 419.789 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{14} = (500 - \alpha - \beta) 0.86 = 361.018 \text{ kg/s} = \dot{m}_{10}$$

$$\dot{m}_{11} = (500 - \alpha - \beta) 0.14 = 58.770 \text{ kg/s} = \dot{m}_{21}$$

$$\dot{m}_7 = 500 - \alpha = 461.826 \text{ kg/s}$$

Balance en DESAIR ($\dot{m}_{16} = \gamma$)

$$(361.018 - \gamma) h_2 + \gamma \cdot h_{16} + (\alpha + \beta) h_{22} + 58.77 \cdot h_{11} = 500 \cdot h_3$$

$$\gamma = 26.231 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_{15} = 334.787 \text{ kg/s}$$

POTENCIAS

$$\text{TA} : 461.826 \times (2784.56 - 2495.10) = 133680 \text{ kW}$$

$$\text{TB-1} : 361.018 \times (2943.22 - 2690) = 91417 \text{ kW}$$

$$\text{TB-2} : 334.787 \times (2690 - 2350) = 113828 \text{ kW}$$

$\Sigma \text{ TURB}$

$$338655 \text{ kW}$$

$$\text{BC} : 334.787 \times (272.16 - 271.93) = 77 \text{ kW}$$

$$\text{BA} : 500 \times (541.49 - 535.35) = 3070 \text{ kW}$$

Potencia neta: 335508 kW.

$$\text{Calor a\u00f1adido en GV} : 500 \times (2784.56 - 721.58) = 1031490 \text{ kW}; Q_{\text{COND}} = 695711 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = 335508 / 1031490 = 32.53 \%$$

$$\eta_{\text{TB-1 \& TB-2}} = \frac{2943.22 - 2350}{2943.22 - 2300} = 92.23 \%$$

↑ Ver Mollier

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

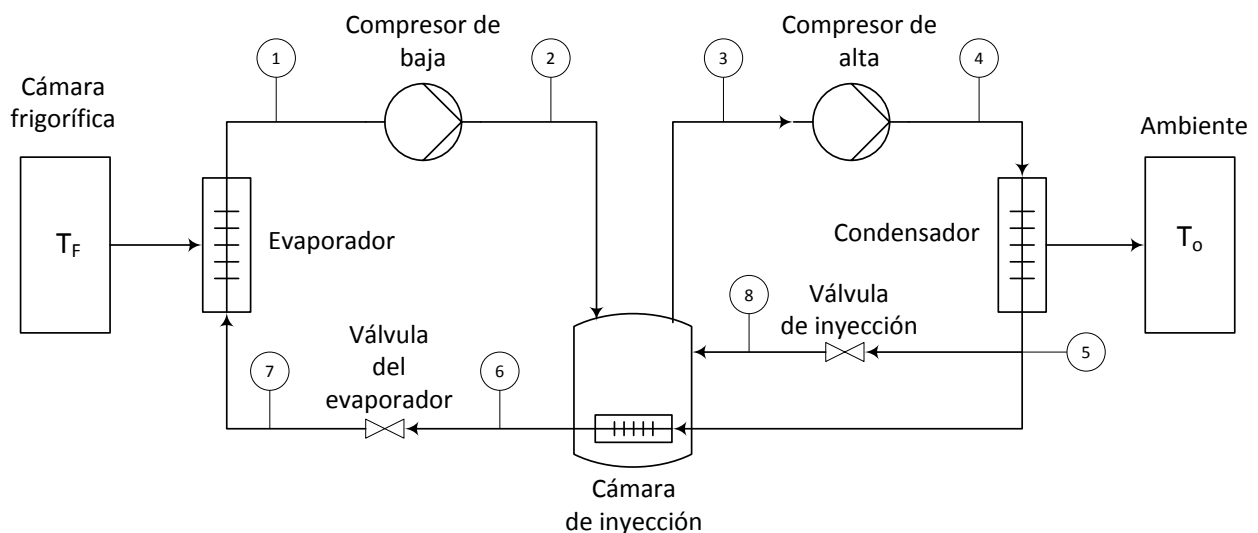
Problema – 2 (3,5 puntos)

El esquema inferior representa un refrigerador que trabaja con R502 y retira calor de una cámara (foco a $T_F = 243\text{ K}$) en el evaporador y cede calor al ambiente (foco a $T_o = 305\text{ K}$). Para ello dispone de dos compresores adiabáticos de rendimiento isentrópico 80% y de una cámara de inyección donde se produce el subenfriamiento del líquido que sale del condensador y el enfriamiento de la impulsión del compresor de baja mediante la mezcla con parte del flujo que sale del condensador.

La aspiración del compresor de baja está a -40°C como vapor saturado y la del compresor de alta a 4 bar, también como vapor saturado. La presión de la cámara de inyección es de 4 bar. El refrigerante abandona el condensador a 18 bar como líquido saturado, saliendo del intercambiador de calor de la cámara de inyección (6) a 38°C . Se desprecian las caídas de presión en intercambiadores, cámara y conductos.

Se pide, para 1 kg/s que recorre el condensador:

- Flujo másico que recorre la válvula de inyección
- Calor retirado en el evaporador
- Consumo de cada compresor
- Variación de entropía del Universo
- COP
- Se proponen una serie de mejoras para reducir el consumo conjunto de los compresores, manteniendo el calor retirado en el evaporador. ¿Cuál sería el mínimo consumo teóricamente alcanzable?



Propiedades de saturación (líquido-vapor) del R502

p [bar]	T [°C]	v _f [m³/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]
1	-45,69	0,000675	0,16276	-5,07	151,3	-5,00	167,6	-0,02242	0,73641
2	-29,73	0,000699	0,08488	10,27	158,4	10,41	175,4	0,04276	0,72060
3	-19,16	0,000718	0,05774	21,06	163,1	21,27	180,4	0,08612	0,71263
4	-11,02	0,000733	0,04379	29,68	166,6	29,98	184,1	0,11958	0,70751
5	-4,298	0,000747	0,03525	37,01	169,4	37,39	187,0	0,14721	0,70382
6	1,491	0,000759	0,02947	43,46	171,8	43,91	189,5	0,17094	0,70096
7	6,605	0,000771	0,02528	49,24	173,9	49,78	191,6	0,19185	0,69861
8	11,21	0,000783	0,02210	54,53	175,7	55,15	193,4	0,21062	0,69661
9	15,41	0,000794	0,01960	59,41	177,3	60,12	194,9	0,22769	0,69485
10	19,28	0,000805	0,01758	63,96	178,7	64,76	196,3	0,24338	0,69325
11	22,89	0,000815	0,01591	68,22	180,0	69,12	197,6	0,25792	0,69178
12	26,26	0,000826	0,01452	72,25	181,2	73,24	198,7	0,27149	0,69038
13	29,43	0,000837	0,01332	76,07	182,3	77,16	199,6	0,28424	0,68904
14	32,44	0,000847	0,01229	79,72	183,3	80,90	200,5	0,29626	0,68773
15	35,29	0,000858	0,01139	83,20	184,2	84,49	201,3	0,30765	0,68643
16	38,01	0,000868	0,01060	86,54	185,0	87,93	202,0	0,31849	0,68514
17	40,6	0,000879	0,00989	89,75	185,8	91,25	202,6	0,32883	0,68383
18	43,09	0,000890	0,00926	92,85	186,5	94,45	203,2	0,33873	0,68250
19	45,48	0,000901	0,00869	95,85	187,1	97,56	203,6	0,34823	0,68114
20	47,77	0,000913	0,00818	98,75	187,7	100,58	204,0	0,35739	0,67973

Propiedades de vapor sobrecalentado del R502

4 bar (sat: -11,0 °C)					18 bar (sat: 43,1 °C)				
T [°C]	v [m³/kg]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg-K]	T [°C]	v [m³/kg]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg-K]
-11	0,04379	166,6	184,1	0,70751	43,1	0,00926	186,5	203,2	0,68250
-10	0,04404	167,2	184,8	0,71025	45	0,00943	188,1	205,1	0,68861
-8,5	0,04439	168,1	185,9	0,71424	46,5	0,00957	189,4	206,6	0,69331
-7	0,04475	169,0	186,9	0,71820	48	0,00970	190,6	208,1	0,69794
-5,5	0,04510	169,9	188,0	0,72215	49,5	0,00982	191,9	209,6	0,70249
-4	0,04545	170,8	189,0	0,72608	51	0,00995	193,1	211,0	0,70699
-2,5	0,04580	171,7	190,1	0,72999	52,5	0,01007	194,3	212,4	0,71142
-1	0,04614	172,7	191,1	0,73388	54	0,01019	195,5	213,9	0,71580
0,5	0,04649	173,6	192,2	0,73775	55,5	0,01031	196,7	215,3	0,72012
2	0,04683	174,5	193,2	0,74161	57	0,01042	197,9	216,7	0,72440
3,5	0,04717	175,4	194,3	0,74544	58,5	0,01054	199,1	218,1	0,72863
5	0,04751	176,4	195,4	0,74926	60	0,01065	200,3	219,5	0,73282
6,5	0,04785	177,3	196,4	0,75307	61,5	0,01076	201,5	220,9	0,73696
8	0,04819	178,2	197,5	0,75686	63	0,01087	202,7	222,3	0,74107
9,5	0,04853	179,1	198,6	0,76063	64,5	0,01097	203,9	223,6	0,74514
11	0,04886	180,1	199,6	0,76438	66	0,01108	205,0	225,0	0,74917

$$h_1 = 170,38 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_1 = 0,730773 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_{2s} = 190,30 \text{ kJ/kg}$$

$$0,8 = \frac{190,3 - 170,38}{h_2 - 170,38} \rightarrow h_2 = 195,28 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 184,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_3 = 0,70751 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_{4s} = 211,16 \text{ kJ/kg}$$

$$0,8 = \frac{211,16 - 184,1}{h_4 - 184,1} \rightarrow h_4 = 217,93 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = 94,45 \text{ kJ/kg} = h_8$$

$$h_6 = 87,93 \text{ kJ/kg} = h_7$$

$$(1-\alpha)h_2 + \underbrace{\alpha h_8 + (1-\alpha)h_5}_{h_5} = h_3 + (1-\alpha)h_6$$

$$(1-\alpha)(h_2 - h_6) = h_3 - h_5$$

$$1-\alpha = \frac{184,1 - 94,45}{195,28 - 87,93} = 0,8351$$

$$\alpha = 0,164881$$

$$\boxed{\dot{m}_8 = 0,164881 \text{ kg/s}}$$

$$\underline{\dot{Q}_{ev}} = 1 \cdot (1-\alpha) (h_1 - h_7) = 0,8351 (170,38 - 87,93) =$$

$$= \underline{68,85 \text{ kW}}$$

$$\dot{W}_{cb} = 1 \cdot (1-\alpha) (h_2 - h_1) = 0,8351 (195,28 - 170,38) =$$

$$= \underline{20,794 \text{ kW}}$$

$$\dot{W}_{ca} = 1 \cdot (h_4 - h_3) = 217,93 - 184,1 = \underline{33,83 \text{ kW}}$$

$$\frac{ds_u}{dz} = \frac{-\dot{Q}_{ev}}{T_F} + \frac{\dot{Q}_{con}}{T_o} = \frac{-68,85}{243} + \frac{123,48}{305} = \underline{121,5 \frac{W}{K}}$$

$$\dot{Q}_{con} = 1 \cdot (h_4 - h_5) = 217,93 - 94,45 = 123,48 \text{ kW}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{W}_{cb} + \dot{W}_{ca}} = \frac{68,85}{20,794 + 33,83} = \underline{1,26}$$

$$COP_{max} = \frac{243}{305 - 243} = 3,9194 = \frac{68,85}{\dot{W}_{min}}$$

$$\underline{\underline{\dot{W}_{min} = 17,57 \text{ kW}}}$$

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 3 (3 puntos)

El esquema adjunto representa un sistema de cogeneración constituido por un motor de Carnot (MCC) que recibe calor de un foco a temperatura $T_C = 1500 \text{ K}$ y produce simultáneamente electricidad (W) y calor útil (Q_U) que entrega a un foco a temperatura $T_W = 340 \text{ K}$.

La manera convencional de producir ambos productos energéticos es de forma separada, como se muestra en la figura izquierda donde un motor de Carnot (MCS) produce W , disipando calor al ambiente (foco a temperatura $T_o = 293 \text{ K}$) y una caldera (C) produce Q_U con un rendimiento del 100% ($Q_{CU} = Q_U$). Ambos dispositivos reciben calor de un foco a la misma temperatura que el motor MCC ($T_C = 1500 \text{ K}$).

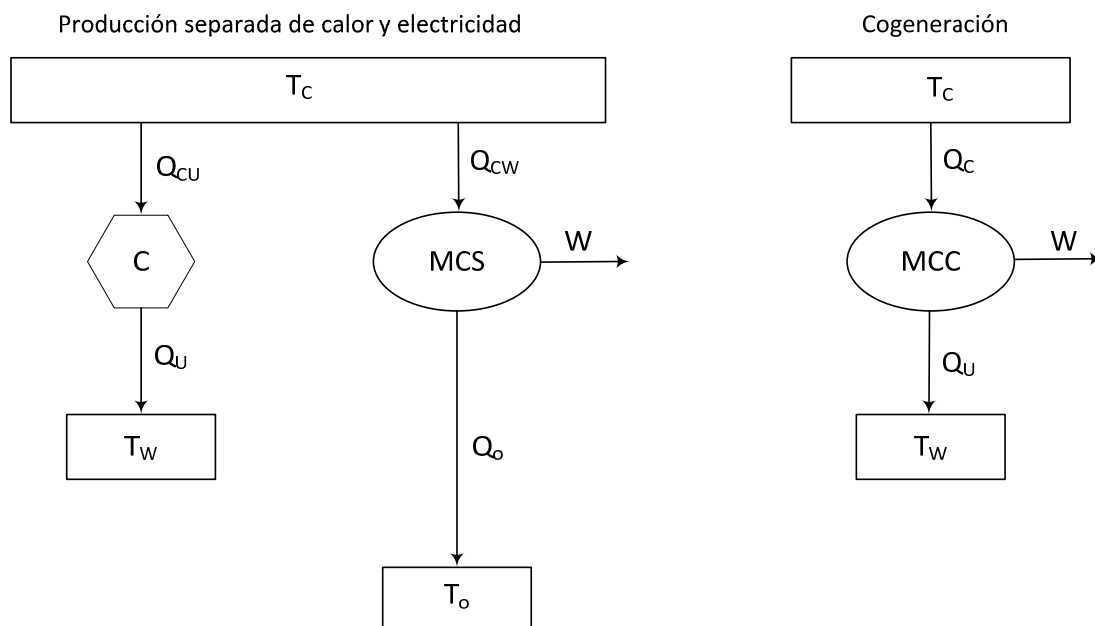
Se pide:

- a) Variación de entropía del Universo en ambos procedimientos por unidad de calor útil producido, es decir:

$$\frac{\Delta S_u}{Q_u}$$

- b) Ahorro relativo de energía primaria, definido como:

$$AEP = \frac{(Q_{CU} + Q_{CW}) - Q_C}{Q_{CU} + Q_{CW}}$$



a) - Sistema mediante cogeneración:

es un motor de Carnot, por tanto totalmente reversible: $\Delta S_u^{cog} = 0$

- Sistema en producción separada:

si bien el motor vuelve a ser de Carnot, suprimiendo así cualquier irreversibilidad en la producción de W , la caldera es intrínsecamente irreversible, aunque su rendimiento energético sea del 100%:

$$\Delta S_u^{sep} = -\frac{Q_{cu}}{T_c} + \frac{Q_u}{T_w} = Q_u \left[\frac{1}{T_w} - \frac{1}{T_c} \right]$$

$$\frac{\Delta S_u^{sep}}{Q_u} = \frac{1}{340} - \frac{1}{1500} = \underline{\underline{0.002275 \text{ K}^{-1}}}$$

b) Cogeneración:

$$\frac{Q_c}{T_c} = \frac{Q_u}{T_w}; \quad Q_c = \frac{W}{1 - \frac{T_w}{T_c}} = \frac{T_c W}{T_c - T_w}$$

Separada:

$$Q_{cu} = Q_u$$

$$Q_{cw} = \frac{W}{1 - \frac{T_o}{T_c}} = \frac{T_c W}{T_c - T_o} = \frac{(T_c - T_w) Q_c}{T_c - T_o} =$$

$$= \left(\frac{T_c - T_w}{T_c - T_o} \right) \left(\frac{T_c}{T_w} \right) d_u$$

Ans: Ans:

$$AEP = \frac{\cancel{Q_u} + \left(\frac{T_c - T_w}{T_c - T_o} \right) \left(\frac{T_c}{T_w} \right) \cancel{Q_u} - \left(\frac{T_c}{T_w} \right) \cancel{Q_u}}{\cancel{Q_u} + \left(\frac{T_c - T_w}{T_c - T_o} \right) \left(\frac{T_c}{T_w} \right) \cancel{Q_u}} =$$

$$= 1 - \frac{\frac{(T_c - T_o) \cancel{T_w} T_c}{\cancel{T_w}}}{T_w (T_c - T_o) + T_c (T_c - T_w)} =$$

$$= 1 - \frac{T_c^2 - T_o T_c}{\cancel{T_w T_c} - T_w T_o + T_c^2 - T_c \cancel{T_w}} =$$

$$= 1 - \frac{T_c (T_c - T_o)}{T_c^2 - T_w T_o} = 1 - \frac{1500 (1500 - 293)}{1500^2 - 340 \times 293} =$$

$$= \underline{\underline{15.81\%}}$$