

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

No se permite el empleo de apuntes, libros o formularios.

No se permite el empleo de calculadoras programables.

Los dispositivos electrónicos con capacidad de comunicación deberán permanecer fuera del alcance del alumno durante el examen.

Problema – 1 (4 puntos)

El generador de vapor de un ciclo de Rankine regenerativo con recalentamiento produce vapor a 100 bar y 500°C. A la salida del recalentador el vapor se encuentra a 40 bar y 500°C. Se realizan dos extracciones de vapor en la turbina de baja presión, una a 10 bar y otra a 2,5 bar, dirigiéndose la de mayor presión a un calentador cerrado y la segunda a uno abierto. El drenaje del calentador cerrado se dirige mediante una válvula al abierto. El drenaje del calentador cerrado y el agua de alimentación en ambos calentadores salen de los respectivos equipos a la temperatura de saturación del vapor de extracción. El agua sale del condensador como líquido saturado a la presión de 0,05 bar. El rendimiento isentrópico de las bombas es la unidad y el de cada una de las turbinas de 85%. El rendimiento en las turbinas se define entre entrada-salida, asumiendo que la línea de expansión en el diagrama de Mollier (h-s) es una recta. Se desprecian las pérdidas de presión en todos los intercambiadores y conductos.

La exergía destruida en el condensador es de 23,3 MW, siendo la temperatura del ambiente de 25°C. Tal destrucción de exergía incluye tanto las irreversibilidades internas al condensador como las externas, hasta que el calor es liberado al ambiente.

Determinar:

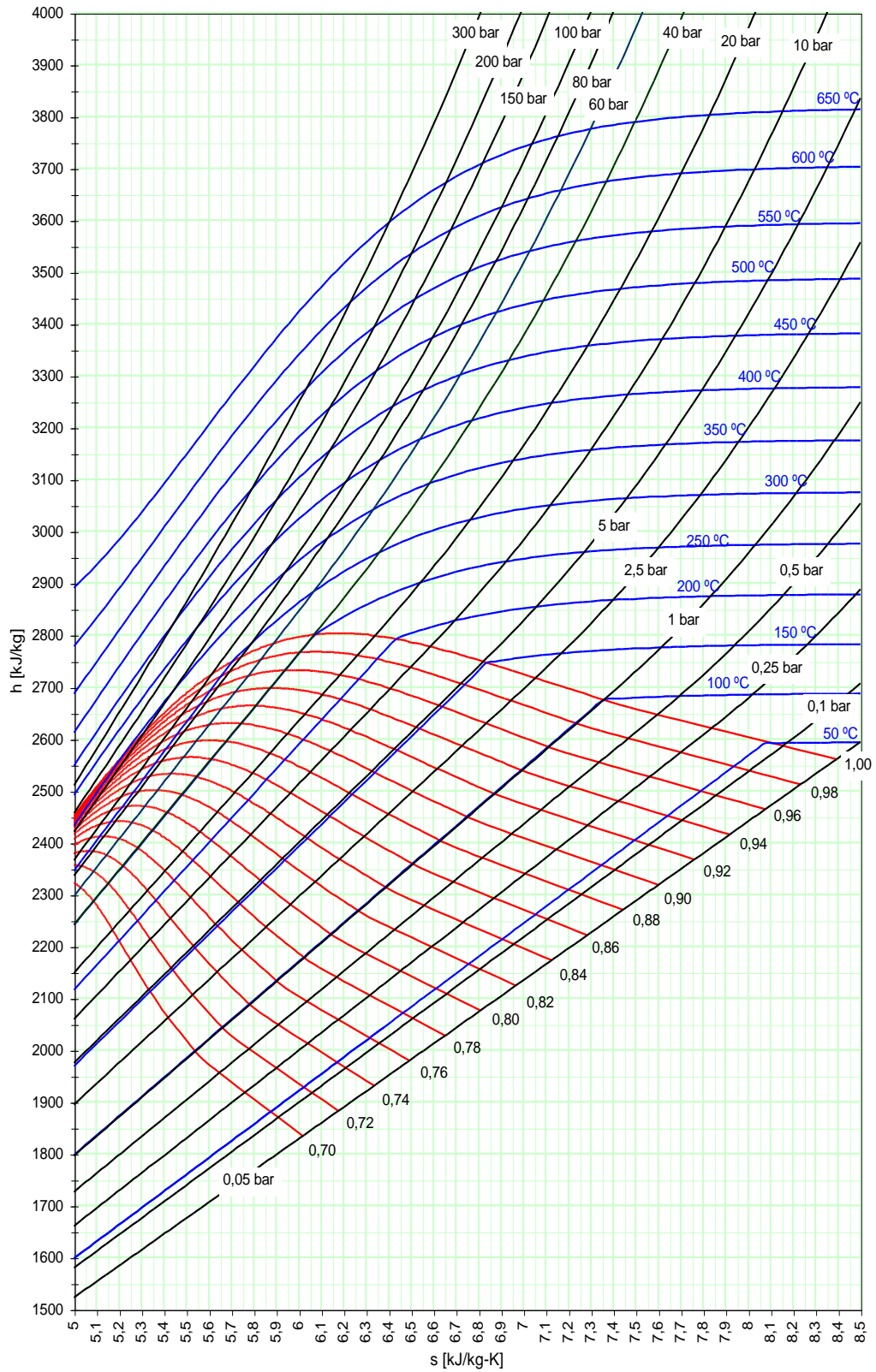
- Esquema de la planta
- Diagrama T-s del ciclo
- Representar la línea de expansión de las turbinas en el diagrama h-s adjunto
- Rendimiento del ciclo
- Potencia neta producida por el ciclo

Tómese el estado muerto a 25°C y 100 kPa

Tablas del agua saturada (líquido – vapor)

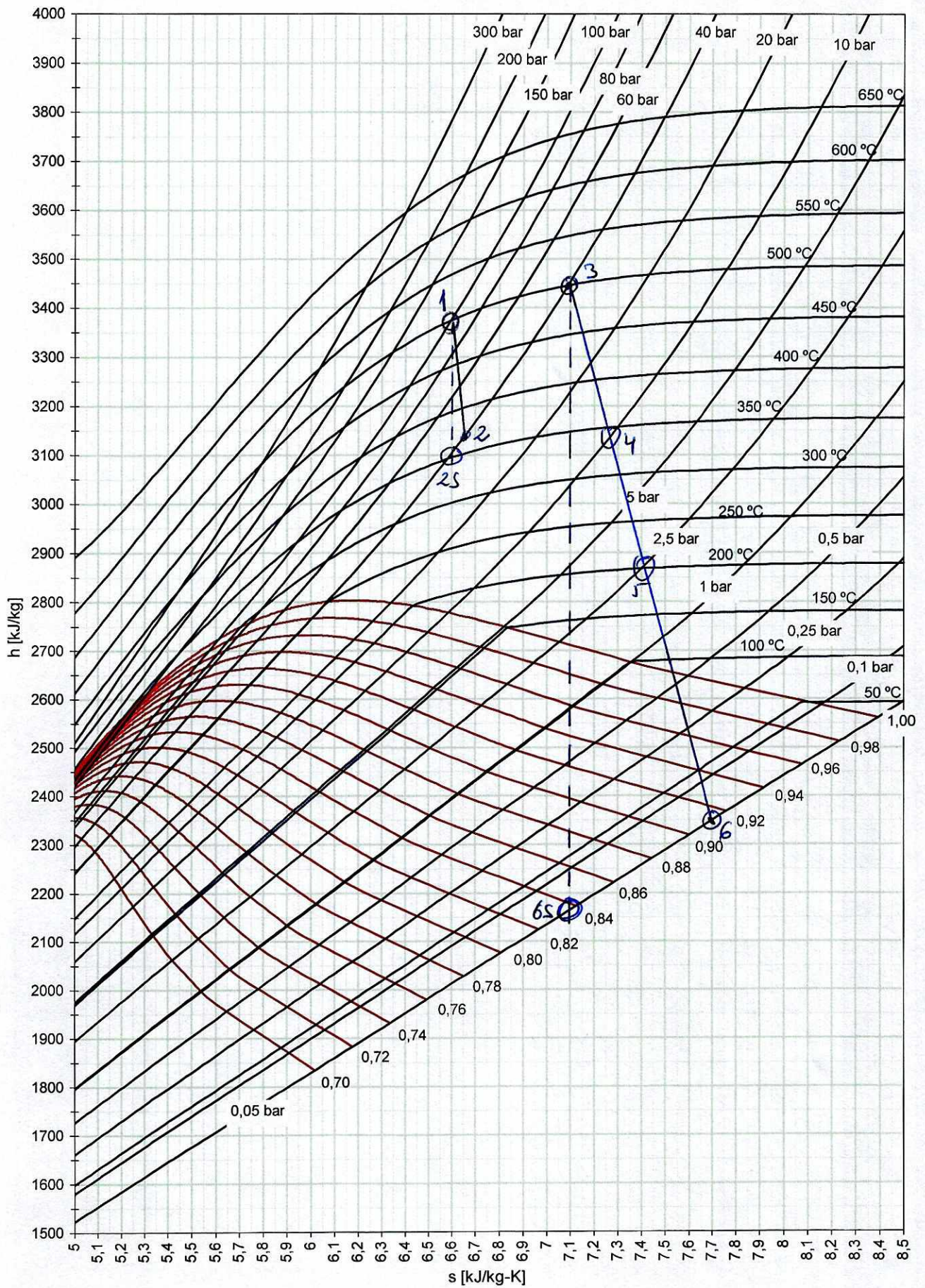
p [bar]	T [°C]	v_f [m ³ /kg]	v_g [m ³ /kg]	h_f [kJ/kg]	h_g [kJ/kg]	s_f [kJ/kg-K]	s_g [kJ/kg-K]
0,02	17	0,00100136	66,99	73,4	2530	0,260577	8,72263
0,05	33	0,00100533	28,19	138	2560	0,476202	8,39379
0,15	54	0,00101405	10,02	226	2600	0,754859	8,00708
0,2	60	0,00101716	7,648	251	2610	0,832015	7,90723
0,5	81	0,00102993	3,240	341	2650	1,09120	7,59304
1	100	0,00104316	1,694	418	2670	1,30276	7,35891
2	120	0,00106052	0,8858	505	2710	1,53018	7,12695
2,5	130	0,00106722	0,7187	535	2720	1,60723	7,05250
5	150	0,00109255	0,3748	640	2750	1,86038	6,82069
10	180	0,00112723	0,1944	763	2780	2,13806	6,58502
20	210	0,00117672	0,09959	908	2800	2,44670	6,33902
40	250	0,00125241	0,04978	1090	2800	2,79657	6,06961
80	300	0,00138430	0,02352	1320	2760	3,20769	5,74496
100	310	0,00145219	0,01803	1410	2730	3,36027	5,61587

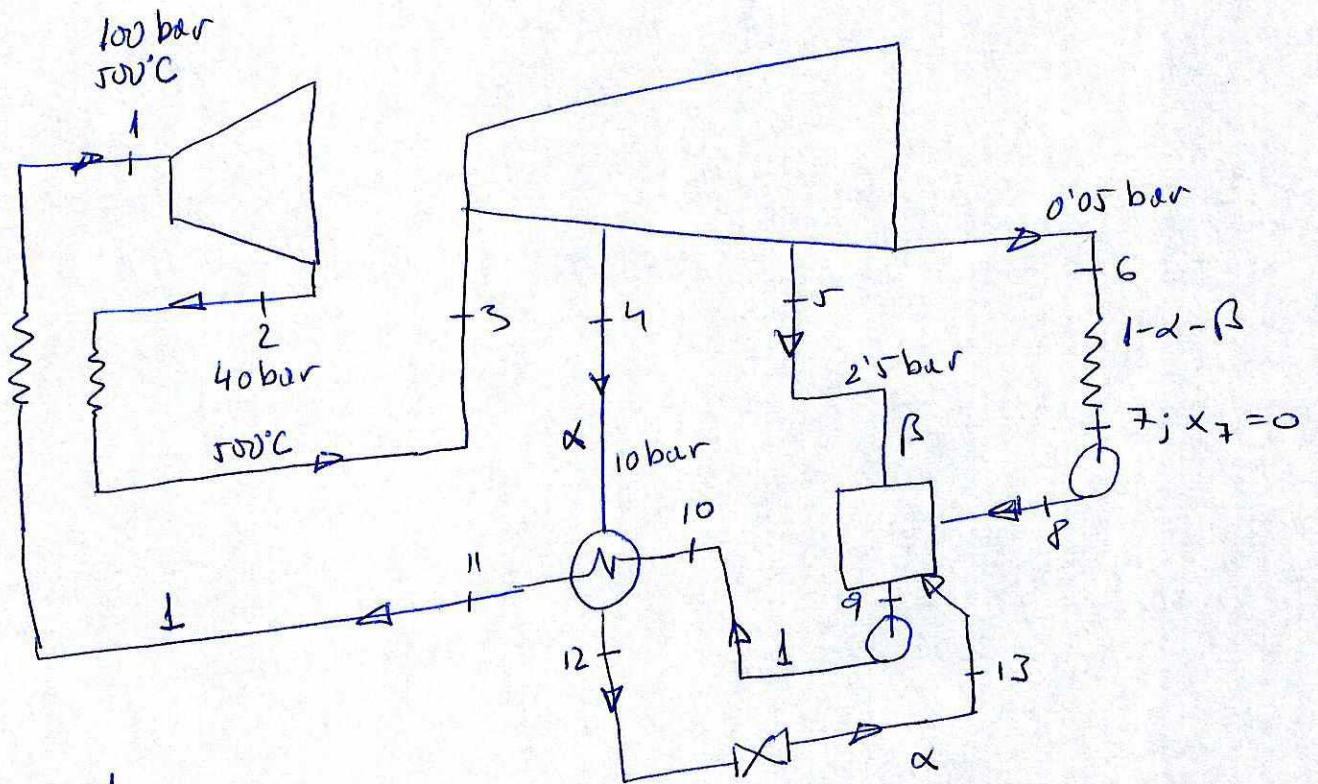
Diagrama de Mollier del agua



Nota: Redondear la entalpía a la cincuenta más próxima.

Diagrama de Mollier del agua



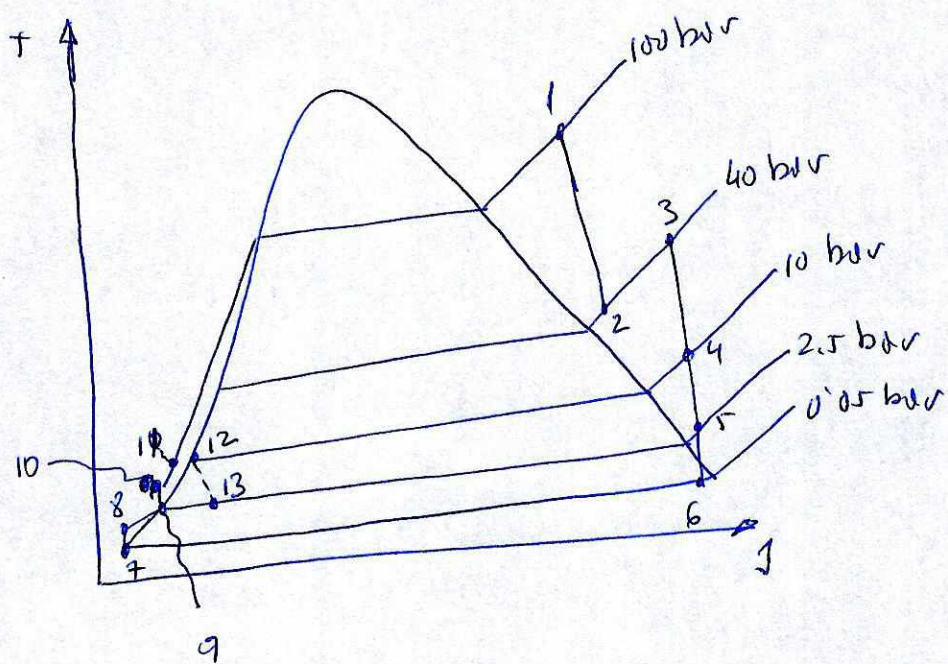


$$\eta_B = 1$$

$$\eta_T = 85\%$$

$$\dot{I}_{con} = 23.3 \text{ MW}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$



$$h_1 = 3350 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 3100 \text{ kJ/kg}$$

$$0.85 = \frac{3350 - h_2}{3350 - 3100} \Rightarrow h_2 = 3137.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 3450 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{6s} = 2150 \text{ kJ/kg}$$

$$0.85 = \frac{3450 - h_6}{3450 - 2150} \rightarrow h_6 = 2345 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = 3150 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = 2850 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = h_f(0.05 \text{ bar}) = 138 \text{ kJ/kg}$$

$$v_7 = v_f(0.05 \text{ bar}) = 0.00100533 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_8 = 138 + 0.00100533(2.5 - 0.05)100 = 138.25 \text{ kJ/kg}$$

$$h_9 = h_f(2.5 \text{ bar}) = 535 \text{ kJ/kg}$$

$$v_9 = v_f(2.5 \text{ bar}) = 0.00106722 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{10} = 535 + 0.00106722(100 - 2.5)100 = 545.41 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{11} = h_f(\text{sat}(10 \text{ bar})) = h_f(10 \text{ bar}) = 763 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{12} = h_f(10 \text{ bar}) = 763 \text{ kJ/kg} = h_{13}$$

$$\alpha h_4 + h_{10} = \alpha h_{12} + h_{11}$$

$$\alpha = \frac{h_{11} - h_{10}}{h_{12} - h_{12}} = \frac{763 - 545.41}{3150 - 763} = 0.0912$$

$$\beta h_5 + (1 - \alpha - \beta) h_8 + \alpha h_{13} = h_9$$

$$\beta = \frac{h_9 - \alpha h_{13} - h_8 + \alpha h_8}{h_5 - h_8} = 0.1253$$

$$w_{TA} = h_1 - h_2 = 212,5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{TB} = h_3 - \alpha h_4 - \beta h_5 - (1 - \alpha - \beta) h_6 = 968,31 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{Bcon} = (1 - \alpha - \beta)(h_8 - h_7) = 0,1959 \text{ kJ/kg}$$

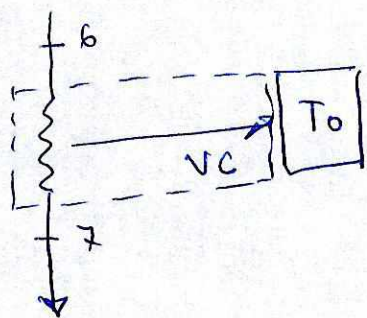
$$w_{BAA} = h_{10} - h_9 = 10,41 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{cal} = h_1 - h_{11} = 2587 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{rec} = h_3 - h_2 = 312,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{212,5 + 968,31 - 0,1959 - 10,41}{2587 + 312,5} = \underline{\underline{40,36\%}}$$

El esquema del condensador es:



$$\begin{aligned} \dot{m}(1 - \alpha - \beta) \Delta_6 + \dot{S}_{gen}^{con} &= \\ &= \dot{m}(1 - \alpha - \beta) \Delta_7 + \frac{\dot{m}(1 - \alpha - \beta)(h_6 - h_7)}{T_0} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{con} = 23300 \text{ kW} = T_0 \dot{S}_{gen}^{con}$$

$$23300 = \dot{m}(1 - \alpha - \beta) \left[\underbrace{h_6 - h_7 + T_0(\Delta_7 - \Delta_6)}_{\psi_6 - \psi_7} \right]$$

$$\Delta_6 = 0,476202 + 0,91(8,39379 - 0,476202) \approx 7,6812 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}}$$

$$\Delta_7 = 0,476202 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\dot{m} = \frac{23300}{(1 - 0,0912 - 0,1253) [2345 - 138 + 298(0,476202 - 7,6812)]}$$

$$= \underline{\underline{496,38 \text{ kg/s}}}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{net}} &= \dot{m} (W_{TA} + W_{TB} - W_{Bcon} - W_{BAA}) = \\ &= 496,38 (212,5 + 968,31 - 0,1959 - 10,41) = \\ &= 580,865,9 \text{ kW} \simeq \underline{\underline{581 \text{ MW}}} \end{aligned}$$

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

No se permite el empleo de apuntes, libros o formularios.

No se permite el empleo de calculadoras programables.

Los dispositivos electrónicos con capacidad de comunicación deberán permanecer fuera del alcance del alumno durante el examen.

Problema – 2 (3 puntos)

Un compresor de simple efecto y simple etapa con un espacio perjudicial del 2% gira a 800 rpm. A esas revoluciones aspira un caudal de aire ($R = 287 \text{ J/kg-K}$; $\gamma = 1,4$) $200 \text{ dm}^3/\text{min}$ en condiciones ambiente (aire libre), siendo la presión de impulsión de 6 barg. En dichas condiciones el rendimiento mecánico es del 70% y las pérdidas de carga en la aspiración y la impulsión son de 4,8 kPa y 37 kPa respectivamente.

Un caudal de aire evacua el calor producido por el compresor consiguiéndose un exponente politrópico de 1,35. Las condiciones del ambiente (estado muerto) son 95 kPa y 25°C.

Se pide:

- a) Cilindrada del compresor
- b) Potencia absorbida
- c) Calor disipado
- d) Diagrama de Sankey cualitativo del sistema compresor + entorno próximo
- e) Irreversibilidad total
- f) Eficiencia exergética

Formulario:

$$\eta_{vi} = 1 - \alpha \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right]$$

$$w_i^{ad} = C_p \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$w_i^{ref} = R \cdot T_1 \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$i = 1$$

simple etape

$$\alpha = 0,02$$

$$N = 800 \text{ rpm}$$

$$\begin{cases} R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \\ \gamma = 1,4 \end{cases}$$

$$P_e = 95 \text{ kPa}$$

$$T_e = 25^\circ \text{C}$$

$$\dot{V}_a = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$$

$$P_s = 6 \text{ barg} = 6,95 \text{ bara}$$

$$\eta_m = 0,7$$

$$\Delta P_e = 0,048 \text{ bar}$$

$$\Delta P_s = 0,37 \text{ bar}$$

$$\eta = 1,35$$

$$P_1 = P_e - \Delta P_e = 95 - 4,8 = 90,2 \text{ kPa}$$

$$P_2 = P_s + \Delta P_s = 6,95 + 0,37 = 7,32 \text{ bar}$$

$$\eta_{vi} = 1 - 0,02 \left[\left(\frac{7,32}{0,902} \right)^{1/1,35} - 1 \right] = 0,92568 =$$

$$= \frac{\dot{m} \vartheta_1}{V_D \cdot \frac{800}{60}}$$

$$\vartheta_1 = \frac{0,287 \times 298}{90,2} = 0,94818 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m} = 0,92568 \times \frac{1}{0,94818} \times \frac{800}{60} V_D = 13,01694 V_D$$

$$\vartheta_e = \frac{0,287 \times 298}{95} = 0,90027 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m} = \frac{200 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ kg}}{0,90027 \text{ m}^3} = 3,70258 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Por rezult:

$$3,70258 \cdot 10^{-3} = 13,01694 V_D \rightarrow \boxed{V_D = 284,44 \text{ cm}^3}$$

$$\eta_m = \frac{w_i}{w_a}$$

$$w_i = 0.287 \times 298 \left(\frac{1.35}{1.35-1} \right) \left[\left(\frac{7.32}{0.902} \right)^{\frac{1.35-1}{1.35}} - 1 \right] =$$

$$= 237.80173 \text{ kJ/kg}$$

$$w_a = 237.80173 / 0.7 = 339.71676 \text{ kJ/kg}$$

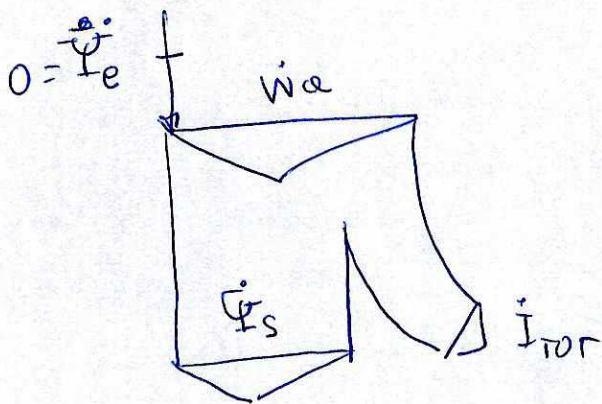
$$\dot{W}_a = \dot{w}_i \times w_a = \underline{1.25783 \text{ kW}}$$

$$\dot{m} h_e + \dot{W}_a = \dot{m} h_1 + \dot{Q}_0$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} c_p (T_e - T_s) + \dot{W}_a = \underline{0.4585 \text{ kW}}$$

$$\kappa = c_p - c_v = c_p \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \Rightarrow c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_2 = T_1 = T_e = T_1 \left(\frac{7.32}{0.902} \right)^{\frac{1.35-1}{1.35}} = 239.82^\circ\text{C}$$



$$\dot{I}_{TOT} = \dot{W}_a - \dot{m} \psi_s$$

$$\psi_s = 1.005 (239.82 - 25) - 298 \left[1.005 \ln \left(\frac{512.82}{298} \right) - \right.$$

$$\left. - 0.287 \ln \left(\frac{6.95}{0.95} \right) \right] = 223.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\dot{I}_{Tot}}} &= 1,25783 - 3,70258 \times 10^{-3} \times 283,52 = \\ &= \underline{\underline{0,43022 \text{ kW}}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\varphi}} &= \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{W}_a} = \frac{\dot{W}_a - \dot{I}}{\dot{W}_a} = 1 - \frac{0,43022}{1,25783} = \\ &= \underline{\underline{65,8\%}}\end{aligned}$$

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

No se permite el empleo de apuntes, libros o formularios.

No se permite el empleo de calculadoras programables.

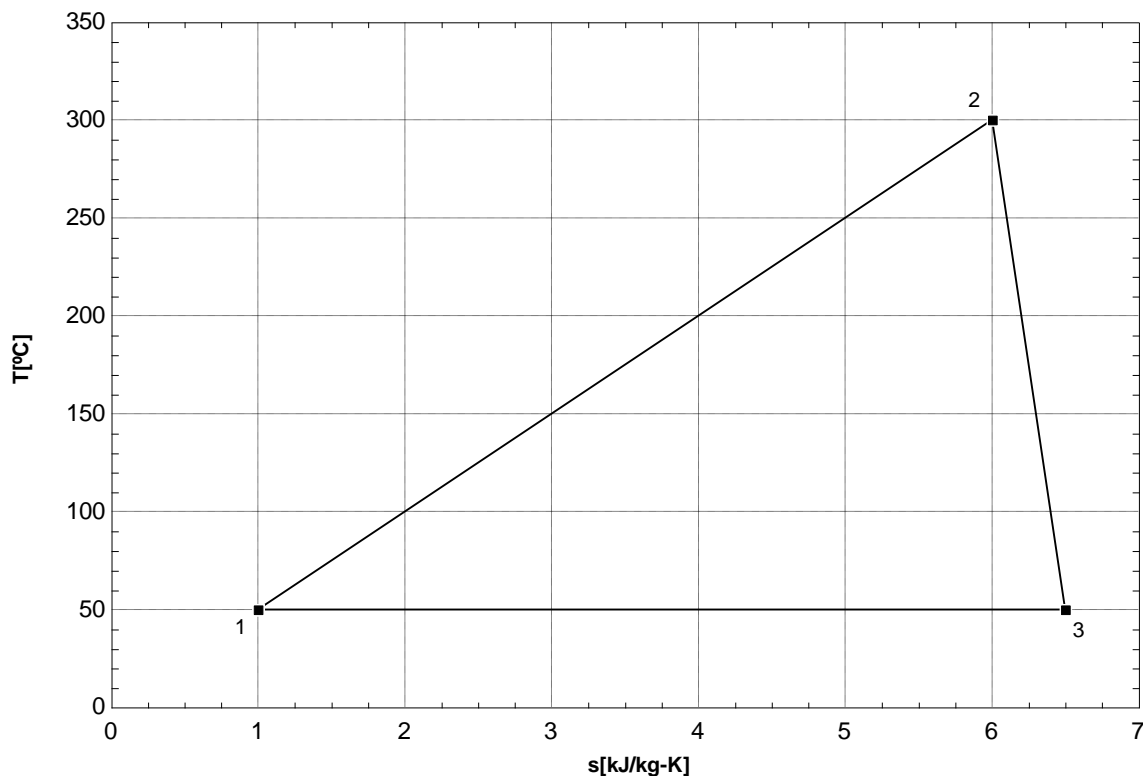
Los dispositivos electrónicos con capacidad de comunicación deberán permanecer fuera del alcance del alumno durante el examen.

Problema – 3 (3 puntos)

Una cierta sustancia recorre el ciclo de potencia representado en la figura inferior. Los procesos 1-2 y 3-1 son internamente reversibles, siendo el proceso 2-3 adiabático. Una corriente de gases ($C_p = 1,15 \text{ kJ/kg-K}$; $R = 287 \text{ J/kg-K}$) aporta calor al ciclo a través de un intercambiador de calor, en el que la corriente entra a 320°C y sale, sin perder presión, a 70°C . El ciclo cede calor al ambiente (estado muerto), considerado un foco a 25°C . La irreversibilidad total del ciclo es de $5,62 \text{ MW}$.

Se pide:

- Potencia neta producida por el ciclo
- Irreversibilidad interna del ciclo
- Eficiencia exergética del ciclo
- Se sustituye la corriente de gases que aporta calor al ciclo por un foco caliente a 320°C , manteniendo la potencia térmica aportada y el ciclo tal como se describe en la figura. Los procesos 1-2 y 3-1 siguen siendo internamente reversibles y el proceso 2-3 adiabático. Determine la nueva eficiencia exergética del ciclo.



12 y 31 son internamente reversibles.

$$q_{23} = 0$$

El aporte de calor al ciclo: $\left[\begin{array}{l} 320^\circ\text{C} \rightarrow 70^\circ\text{C} \\ \text{gas perfecto.} \end{array} \right.$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$\dot{I}_{TOT} = 5'62 \text{ MW}$$

12 internamente reversible

$$\int_1^2 T d\Delta = \frac{T_1 + T_2}{2} (\Delta_2 - \Delta_1) = q_{12} = \left(\frac{350}{2} + 273 \right) \times 5 = 2240 \text{ kJ/kg}$$

En el proceso 31

$$\int_3^1 T d\Delta = (50 + 273)(5'5) = 1776,5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{neto}} = q_{\text{neto}} = 2240 - 1776,5 = 463,5 \text{ kJ/kg}$$

Es preciso hallar el flujo másico a partir de la exergía destruida total:

$$\dot{Q}_{12} \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right) = \dot{w}_{\text{neto}} + \dot{I}_{TOT}$$

Al ser un gas perfecto la corriente de gases calientes se tiene que:

$$T_c = \frac{320 - 70}{L \left(\frac{320 + 273}{70 + 273} \right)} = 456,65 \text{ K}$$

$$\dot{m} 2240 \left(1 - \frac{298}{456,65} \right) = \dot{m} 463,5 + 5620$$

$$\rightarrow \dot{m} = 17,85672 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{\text{neto}} = \dot{m} W_{\text{neto}} = 8276,59 \text{ kW} \approx \underline{8,28 \text{ MW}}$$

La irreversibilidad interna se puede calcular poniendo los frontiers del intercambio de calor en 12 y 31:

$$\dot{Q}_{12} \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{12}} \right) = \dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{31} \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{31}} \right) + \dot{I}_{\text{int}}$$

$$\bar{T}_{31} = 50 + 273 = 323 \text{ K}$$

$$\int_1^2 \frac{\dot{Q}}{T} = \dot{m} (\Delta_2 - \Delta_1) = \frac{\dot{Q}_{12}}{\bar{T}_{12}} \Rightarrow \bar{T}_{12} = \frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{m} (\Delta_2 - \Delta_1)} =$$

$$= \frac{\dot{m} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) (\Delta_2 - \Delta_1)}{\dot{m} (\Delta_2 - \Delta_1)} = \frac{T_1 + T_2}{2} =$$

$$= 448 \text{ K}$$

$$\dot{I}_{\text{int}} = 17,85672 \left[2240 \left(1 - \frac{298}{448} \right) - 463,5 - \right.$$

$$\left. - 1776,5 \left(1 - \frac{298}{323} \right) \right] = 2660,65 \text{ kW} \approx \underline{2,66 \text{ MW}}$$

Una manera alternativa sería darles cuenta de que las únicas irreversibilidades internas se sitúan en 23:

$$\dot{m} \Delta_2 + \dot{S}_{\text{gen}}^{\text{int}} = \dot{m} \Delta_3$$

$$\dot{S}_{\text{gen}}^{\text{int}} = \dot{m} (\Delta_3 - \Delta_2)$$

$$\dot{I}_{\text{int}} = \dot{m} T_0 (\Delta_3 - \Delta_2) = 2660,65 \text{ kW} \checkmark$$

$$\underline{\underline{\varphi}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{Q}_{12} \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right)} = \frac{8276,59}{17,85672 \cdot 2240 \left(1 - \frac{298}{456,65}\right)} =$$

$$= \underline{\underline{59,56\%}}$$

$$\text{También: } \varphi = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{I}_{\text{tot}}} = \frac{8276,59}{8276,59 + 5620} \checkmark$$

Al sustituir la fuente de gas por un fog, se tiene $T_c' = 320 + 273 = 593 \text{ K}$. Como esa temperatura es la máxima de los gas originales resulta que las irreversibilidades externas están aumentando, mientras que las internas se mantienen. Se sigue, por tanto, que el rendimiento del ciclo se mantendrá constante, mientras que la eficiencia exergética se reducirá.

De las ecuaciones anteriores se sigue que:

$$\underline{\underline{\varphi'}} = \frac{\eta}{\eta'_{\text{Carnot}}} = \frac{\frac{8276,59}{17'85672 \cdot 2240}}{1 - \frac{298}{593}} = \underline{\underline{41,59\%}}$$

Si usamos dicho valor de φ' :

$$\dot{Q}'_{12} = \dot{Q}_{12} = 17,85672 \cdot 2240 = 39999,05 \text{ kW}$$

$$\eta' = \eta = \frac{8276,59}{\dot{Q}_{12}} = 0,20692$$

$$\dot{W}' = \dot{W} = 8276,59 \text{ kW}$$

$$39999,05 \left(1 - \frac{298}{593} \right) = 8276,59 + \dot{J}'_{\text{tot}}$$

$$\dot{J}'_{\text{tot}} = 11621,46 \text{ kW} > \dot{J}_{\text{tot}}$$

$$\varphi' = \frac{8276,59}{8276,59 + 11621,46} = 41,59\% \checkmark \checkmark$$