TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 1
(60 %)

No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes "smartwatch" deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.

Una central térmica que produce 500 MW de trabajo neto sigue un ciclo de Rankine regenerativo con recalentamiento. El vapor entra en la turbina de alta presión a 150 bar y 550 °C. Dicha turbina opera de forma adiabática con un rendimiento isentrópico del 85%. El vapor sale de la turbina a 40 bar y se dirige al recalentador, del que sale a 550 °C para dirigirse a la turbina de baja presión, que también opera de forma adiabática con el mismo rendimiento isentrópico. En la turbina de baja presión hay dos extracciones, una a 20 bar para alimentar a un precalentador cerrado y otra a 2,5 bar para un precalentador abierto. El vapor sale de esta turbina a 0,05 bar y se dirige al condensador, del que el agua sale como líquido saturado.

El agua de alimentación a caldera sale del precalentador cerrado 10 °C por debajo de la temperatura de saturación correspondiente a la presión del vapor de extracción, dirigiéndose el drenaje de este calentador (líquido saturado) hacia el precalentador abierto mediante una válvula. El agua de alimentación a la caldera sale del calentador abierto como líquido saturado.

No hay pérdida de presión en los intercambiadores y conductos. Los rendimientos isentrópicos de las turbinas se definen entre la entrada y la salida de las mismas, siendo la línea de expansión en el diagrama de Mollier una recta. Las bombas son adiabáticas, con rendimiento isentrópico del 100%.

Se pide:

a) Esquema de la instalación [2 puntos]

b) Rendimiento del ciclo [4 puntos]

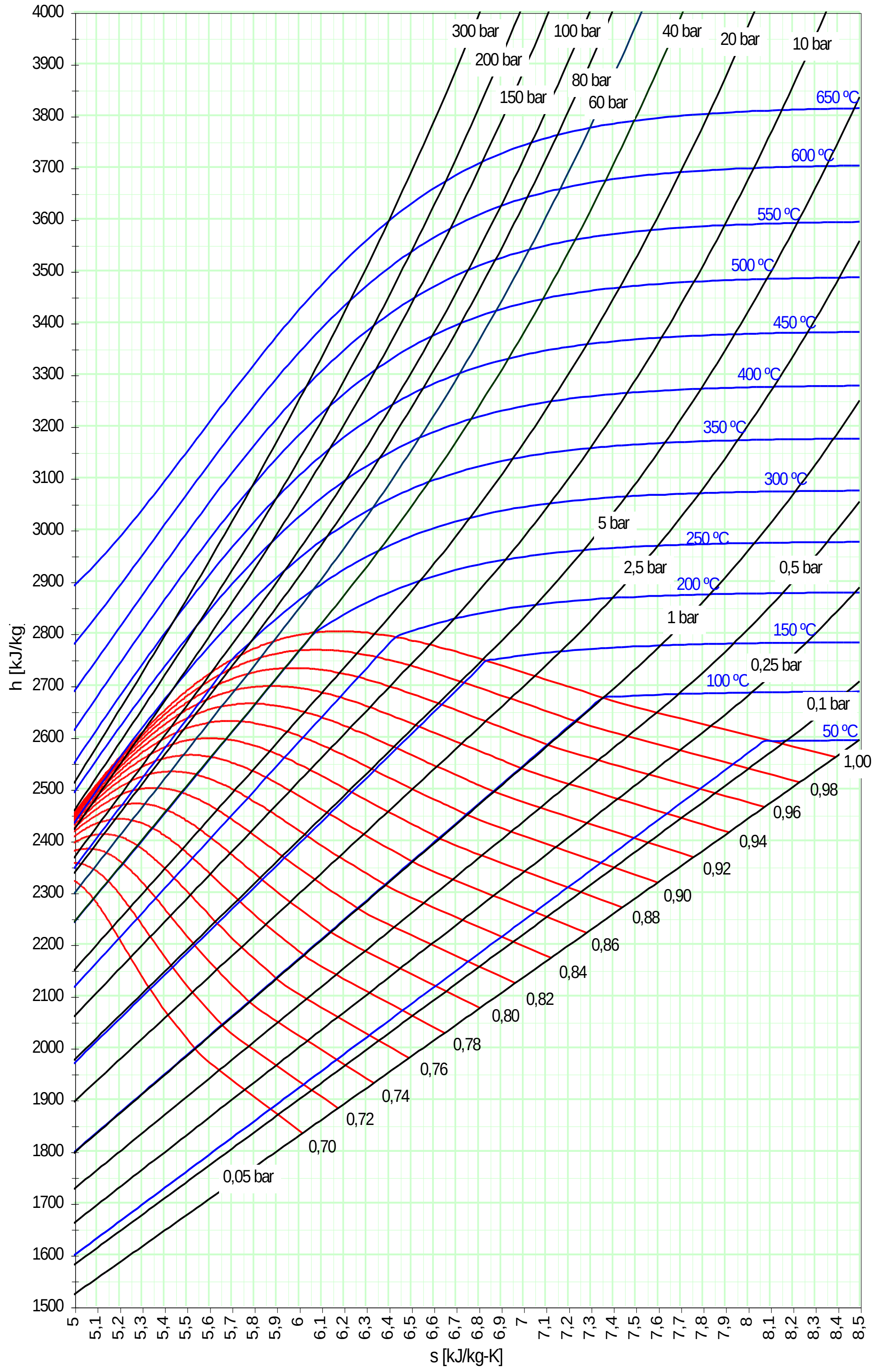
c) Exergía destruida en el condensador, asumiendo que el agua de refrigeración es un líquido incompresible (c = 4,18 kJ/kg-K; ρ = 1000 kg/m^3) que entra a 22 °C y sale a 27 °C. Tómese el estado muerto a 1 bar y 20 °C. [2 puntos]

d) Diagrama de Sankey cualitativo (sin indicaciones numéricas) del calentador abierto [2 puntos]

Tablas del agua saturada (líquido – vapor)

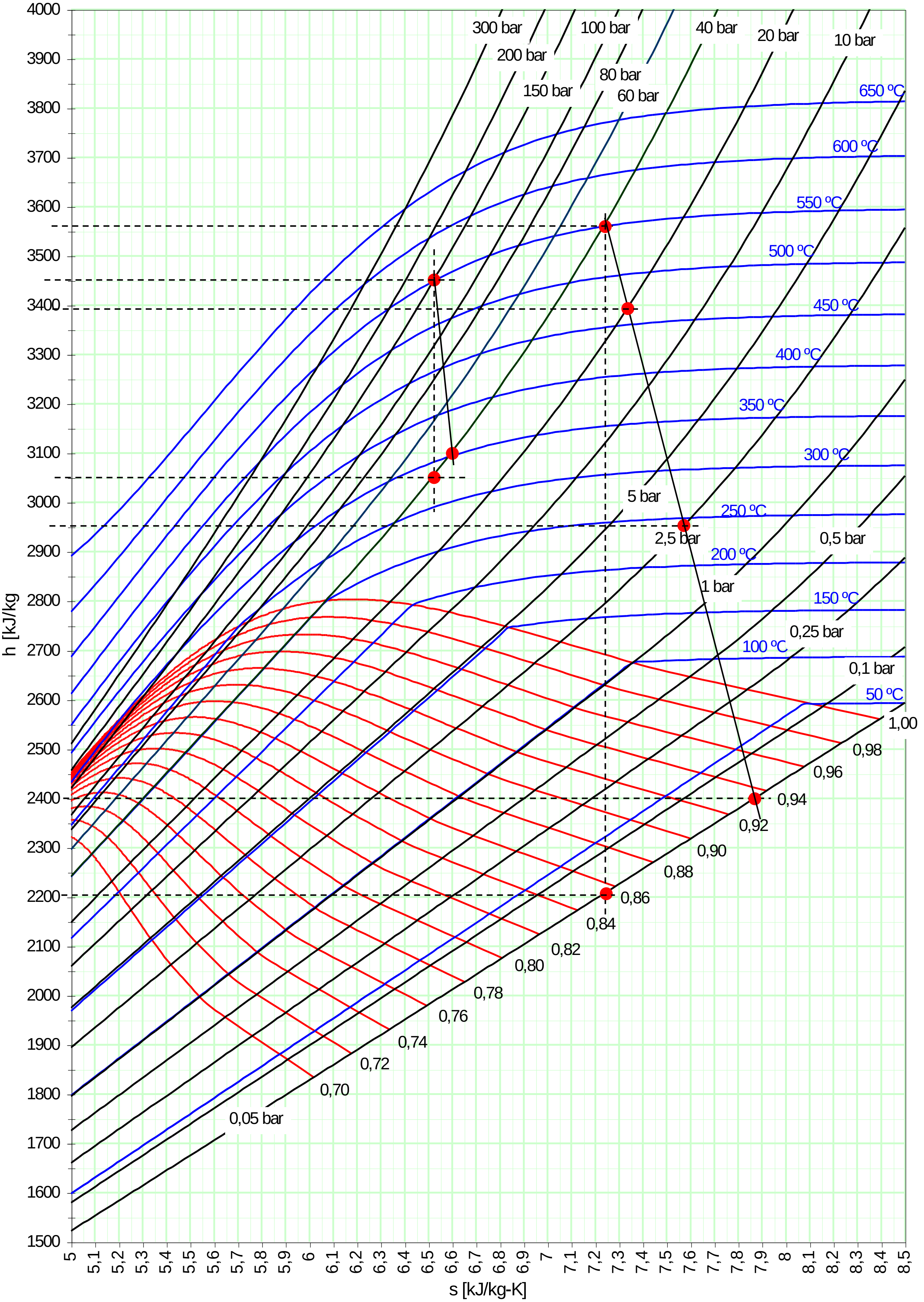
p [bar]	T [ºC]	v_f [m^3/kg]	v_g [m^3/kg]	h_f [kJ/kg]	h_g [kJ/kg]	s_f [kJ/kg-K]	s_g [kJ/kg-K]
0,05	32,87	0,00100533	28,19	137,75	2560,7	0,476202	8,39379
0,1	45,81	0,00101028	14,67	191,80	2583,9	0,649191	8,14881
2,5	127,41	0,00106722	0,7187	535,35	2716,5	1,60723	7,05250
5	151,83	0,00109255	0,3748	640,09	2748,1	1,86038	6,82069
7	164,95	0,00110796	0,2728	697,00	2762,8	1,99177	6,70708
10	179,88	0,00112723	0,1944	762,51	2777,1	2,13806	6,58502
12	187,96	0,00113850	0,1633	798,32	2783,7	2,21591	6,52169
15	198,29	0,00115385	0,1317	844,54	2791,0	2,31431	6,44299
17	204,31	0,00116333	0,1167	871,72	2794,5	2,37110	6,39815
20	212,38	0,00117672	0,09959	908,47	2798,3	2,44670	6,33902
40	250,35	0,00125241	0,04978	1087,39	2800,8	2,79657	6,06961
150	342,16	0,00165722	0,01034	1610,31	2610,8	3,68474	5,31080

Diagrama de Mollier del agua

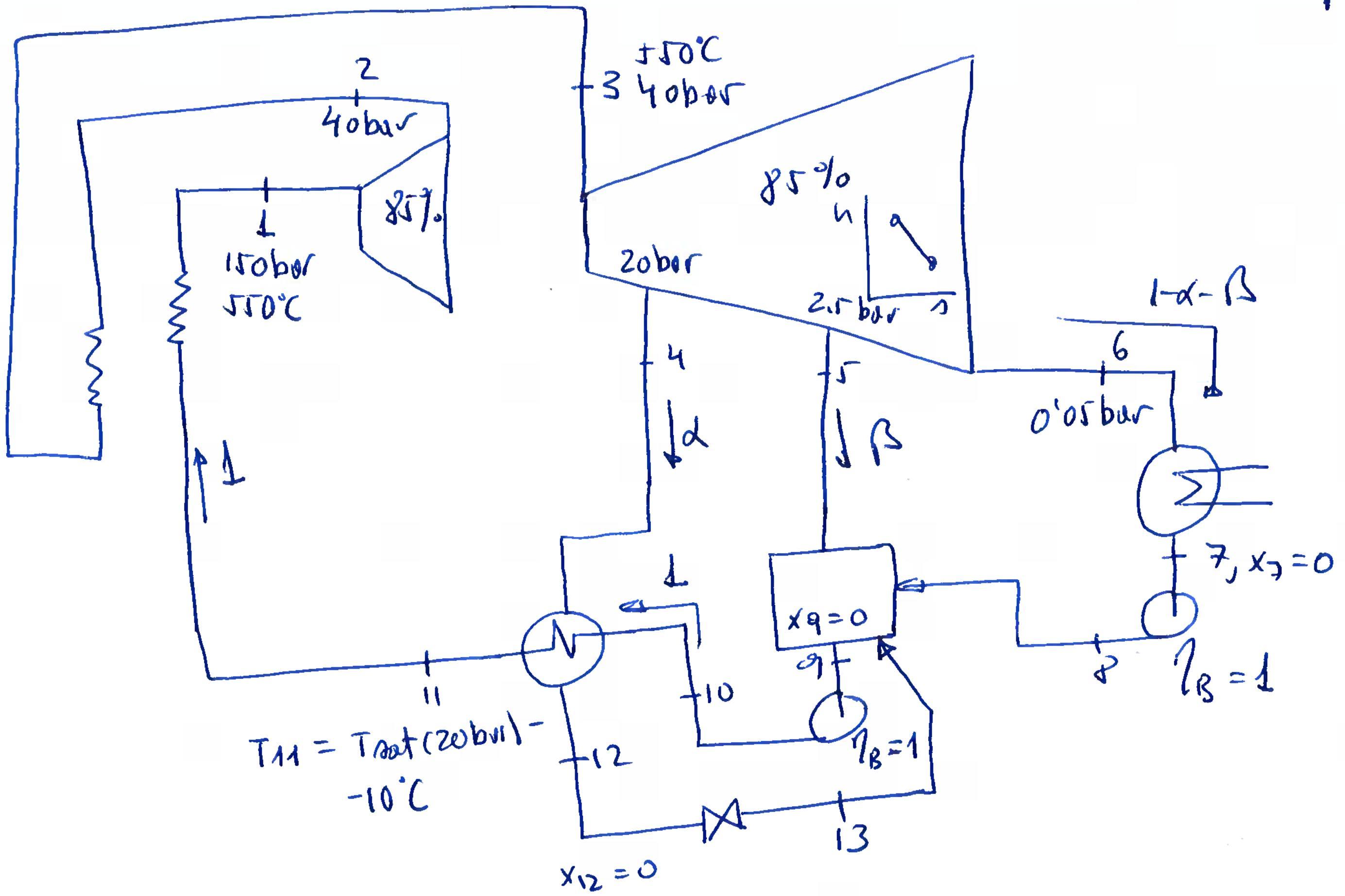


Nota: Redondear la entalpía a la cincuentena más próxima.

Diagrama de Mollier del agua



a)



b)

$h_1 = 3450$ kJ/kg
$h_{2s} = 3050$ kJ/kg
$$0,85 = \frac{3450 - h_2}{3450 - 3050} \rightarrow h_2 = 3110 \frac{kJ}{kg}$$

$h_3 = 3550$ kJ/kg
$h_{6s} = 2200$ kJ/kg
$$0.85 = \frac{3550 - h_6}{3550 - 2200} \rightarrow h_6 = 2402,5 \frac{kJ}{kg}$$

$h_5 = 2950$ kJ/kg ; $h_4 = 3400$ kJ/kg

$h_7 = 137,75$ kJ/kg

$v_7 = 0,00100533$ m^3/kg

$h_8 = 137,75 + 0,00100533(2,5 - 0,05)100 = 137,9963$ kJ/kg

$h_9 = 535,35$ kJ/kg

$v_9 = 0,00106722$ m^3/kg

$h_{10} = 535,35 + 0,00106722(150 - 2,5)100 = 551,09$ kJ/kg

$$h_{11} \simeq h_f(212,38°C - 10°C) = 844,54 + \frac{871,72 - 844,54}{204,31 - 198,29} \times$$

$$\times (202,38 - 198,29) = 863,0061 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{12} = h_f(20 \text{ bar}) = 908,47 \text{ KJ/Kg} = h_{13}$$

$$\alpha \cdot 3400 + 551,09 = \alpha\ 908,47 + 863,01$$

$$\hookrightarrow \alpha = 0,1252$$

$$\beta\ 2950 + (1 - 0,1252 - \beta)\ 137,9963 + 0,1252 \cdot 908,47 =$$

$$= 535,35 \rightarrow \beta = 0,1070$$

$$W_{TA} = 3450 - 3100 = 340 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{TB} = 3550 - 0,1252 \times 3400 - 0,1070 \cdot 2950 -$$

$$-(1 - 0,1252 - 0,1070)\ 2402,5 = 964,03 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{BCON} = (1 - 0,1252 - 0,1070)(137,9963 - 137,75) =$$

$$= 0,1891 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{BAC} = 551,09 - 535,35 = 15,74 \text{ KJ/Kg}$$

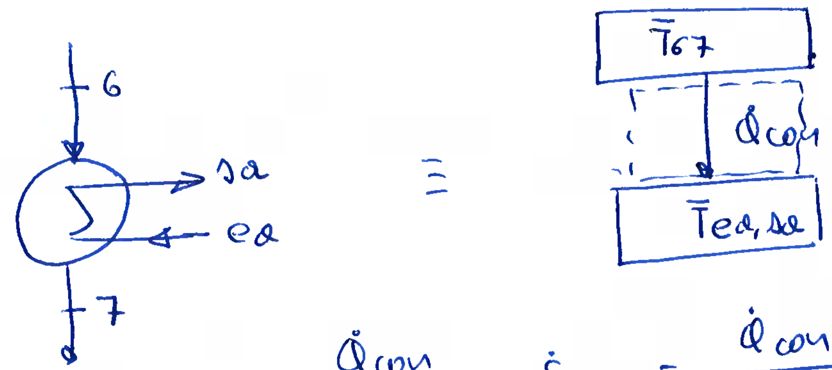
$$W_{neto} = 1288,10 \text{ KJ/Kg}$$

$q_{cal} = 3450 - 863,0061 = 2586,994 \text{ kJ/kg}$

$q_{rec} = 3550 - 3110 = 440 \text{ kJ/kg}$

$$\boxed{\eta} = \frac{1288,10}{2586,994 + 440} = \boxed{42,55\,\%}$$

c)



$$\frac{\dot Q_{con}}{\bar T_{67}} + \dot S_{gen} = \frac{\dot Q_{con}}{\bar T_{ea,sa}}$$

$$\dot I_{con} = T_0 \, \dot Q_{con} \left[\frac{1}{\bar T_{ea,sa}} - \frac{1}{\bar T_{67}} \right]$$

Como $x_6 \simeq 0,935 < 1$ y $x_7 = 0$ se tiene que

$\bar T_{67} = T_{sat}(0,05 \text{ bar}) = 32,87\,°C = 305,87 \text{ K}$

$$\bar T_{ea,sa} = \frac{\cancel{c}(27-22) + \cancel{\Delta P/\rho}}{\cancel{c}\, L\left(\frac{27+273}{22+273}\right)} = 297,49 \text{ K}$$

$\dot Q_{con} = \dot m (1-\alpha-\beta)(2402,5 - 137,75)$

$500 \cdot 10^3 = \dot m \; 1288,10 \rightarrow \dot m = 388,17 \text{ kg/s}$

$\dot Q_{con} = 674976,73 \text{ kW}$

$$\boxed{\dot{I}_{con}} = 293 \times 674976{,}73 \left[\frac{1}{297{,}49} - \frac{1}{305{,}87} \right] =$$

$$= 18213{,}41 \text{ kW} \simeq \boxed{18{,}2 \text{ MW}}$$

Alternativamente:

$$\dot{Q}_{cond}\left(1 - \frac{T_0}{T_{67}}\right) = \dot{Q}_{cond}\left(1 - \frac{T_0}{T_{eu,su}}\right) + \dot{I}_{con}$$

o inclusio:

$$\dot{m}(1-\alpha-\beta)\,s_6 + \dot{m}_w s_{ea} + \dot{S}_{gen} = \dot{m}(1-\alpha-\beta)\,s_7 +$$

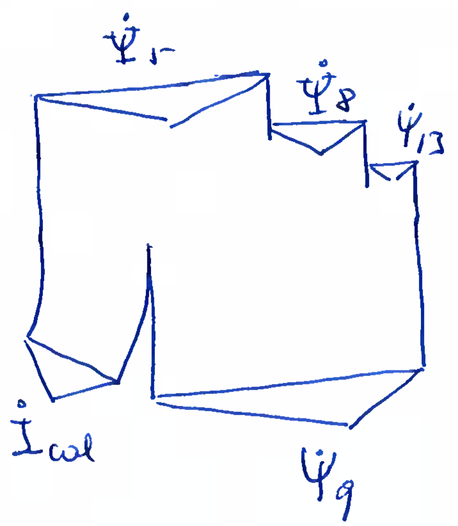
$$+ \dot{m}_w s_{sa}$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(1-\alpha-\beta)(s_7 - s_6) + \dot{m}_w(s_{sa} - s_{ea}) =$$

$$= \frac{\dot{Q}_{con}}{h_6 - h_7}(s_7 - s_6) + \frac{\dot{Q}_{con}}{h_{sa} - h_{ea}}(s_{sa} - s_{ea}) =$$

$$= \dot{Q}_{cond}\left[\frac{1}{T_{ea,sa}} - \frac{1}{T_{67}}\right] \quad \checkmark\checkmark$$

d)



TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 2
(40 %)

No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes "smartwatch" deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.

El motor monocilíndrico de gas natural de cuatro tiempos de un equipo doméstico de cogeneración (destinado a producir electricidad y suministrar calor simultáneamente) tiene las siguientes características:

Diámetro del pistón: 90 mm
Carrera: 90 mm
Relación de compresión: 12

Cuando opera a 2350 rpm, con un dosado relativo del 100%, su balance de energías es el siguiente:

Potencia térmica entregada por el combustible: 20,5kW
Potencia eléctrica generada: 5,5kW

El rendimiento del generador eléctrico acoplado al motor es de un 96%. La presión de la mezcla al comienzo de la compresión es de 0,9 bar, y su temperatura, 47 ºC. La presión media indicada real es un 40% de la presión media indicada del ciclo Otto de aire equivalente.

Se pide:

- Rendimiento volumétrico del motor, tomando como referencia las condiciones del ambiente [3 puntos]
- Rendimiento efectivo del motor [2 puntos]
- Rendimiento mecánico del motor [3 puntos]

Para entregar el calor a la calefacción un circuito de agua refrigera el cilindro, los gases de escape y el alternador, saliendo del motor a 80 °C y dirigiéndose a un intercambiador de calor, en el que cede 12,5 kW al circuito de calefacción, saliendo a 70 °C. En cuanto al agua de calefacción, entra al intercambiador a 61 °C y sale a 68 °C. No se producen pérdidas de presión en el intercambiador.

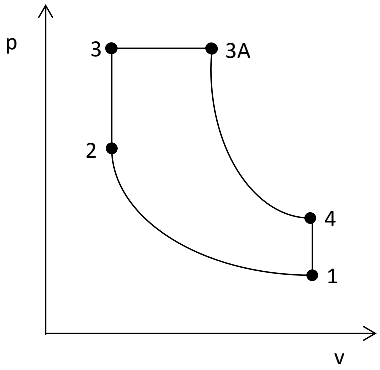
Se pide:

- Máximo trabajo que podría obtenerse hipotéticamente del calor que recoge el agua del circuito de calefacción [2 puntos]

Propiedades de los fluidos de trabajo:

- Gas natural: PCI= 48 MJ/kg; densidad = 737 kg/m^3; dosado estequiométrico = 0,058
- Aire, gas perfecto (γ = 1,4; R = 0,287 kJ/kg-K)
- Agua (calefacción y refrigeración del motor): líquido incompresible (ρ = 969 kg/m^3; c = 4,2 kJ/kg-K)
- El ambiente se considera un foco a 25 ºC y 1 bar. Dichas condiciones se consideran también las coordenadas del estado muerto.

Formulario:



$$\alpha = \frac{p_3}{p_2} \qquad \beta = \frac{v_{3A}}{v_3}$$

$$q_{23A} = \frac{R \cdot T_1 \cdot r^{\gamma-1}}{\gamma-1}\left[\alpha - 1 + \alpha \cdot \gamma \cdot (\beta - 1)\right]$$

$$pmi = p_1 \cdot \left(\frac{r}{r-1}\right) \frac{r^{\gamma-1}\{1 - \alpha \cdot [1 + \cdot \gamma \cdot (\beta - 1)]\} + \alpha \cdot \beta^{\gamma} - 1}{1-\gamma}$$

4T

$z = 1$ $\qquad N = 2350$ rpm

$D = 90$ mm $\qquad F_r = 1$

$L = 90$ mm $\qquad \dot{Q}_f = 20{,}5$ kW

$r = 12$ $\qquad \dot{W}e = 5{,}5/0{,}96$ kW

$pmi_M = 0{,}4\ pmi_{ciclo}$ $\qquad ① \begin{cases} 90 \text{ kPa} \\ 47°C \end{cases}$

Otto $(\beta = 1)$

d) $$\boxed{\eta_v} = \frac{\dot{m}a}{\rho_{ref}\ V_T\ \frac{N}{60}\ i} = \frac{7'3635 \cdot 10^{-3}}{\frac{100}{0{,}287(25+273)} \times 572{,}5553 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2350}{60} \cdot \frac{1}{2}} =$$

$$= \boxed{56{,}71\%}$$

$20{,}5 = \dot{m}f \times 48000 \longrightarrow \dot{m}f = 0{,}4271$ g/s

$F = 0.058 = \frac{\dot{m}f}{\dot{m}a} \longrightarrow \dot{m}a = 7{,}3635$ g/s

$V_T = 1 \times \frac{\pi \times 0{,}09^2}{4}\ 0{,}09 = 572{,}5553\ cm^3$

b) $$\boxed{\eta_e} = \frac{\dot{W}e}{\dot{m}f\ PCI} = \frac{5'5/0{,}96}{20{,}5} = \boxed{27{,}95\%}$$

c) $$q_{23A} = \frac{48000}{1 + \frac{1}{0{,}058}} = 2631{,}38\ kJ/kg =$$

$$= \frac{0{,}287 \times (47+273) \times 12^{0{,}4}}{0{,}4}\left[\alpha - 1 + \cancel{\alpha \cdot 1{,}4(1-1)}\right]$$

$\hookrightarrow \alpha = 5{,}2417$

$$p_{mi\,ciclo} = 90 \times \frac{12}{11} \times \frac{12^{0,4}\{1-5{,}2417\} + 5{,}2417 - 1}{1-1{,}4} =$$

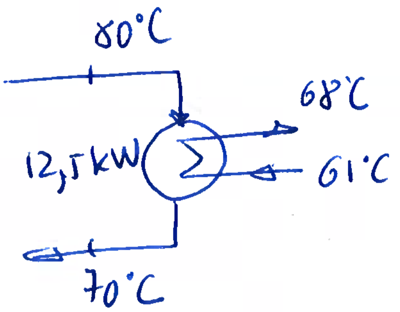
$$= 1771{,}9448 \text{ kPa}$$

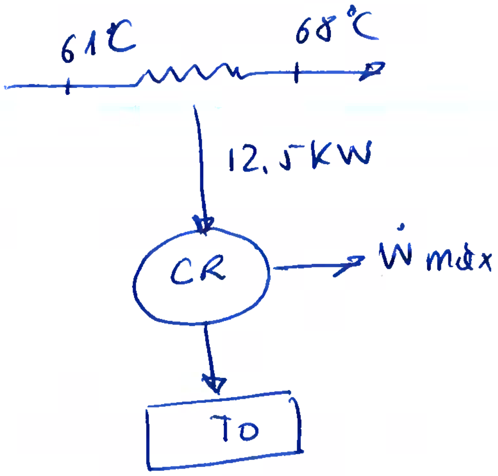
$$p_{mi\,mot} = 0{,}4 \times 1771{,}9448 = 708{,}78 \text{ kPa}$$

$$\dot{W}_i = 708{,}78 \times 572{,}5553 \times 10^{-6} \times \frac{2350}{60} \times \frac{1}{2} = 7{,}9472 \text{ kW}$$

$$\boxed{\eta_m} = \frac{\dot{W}e}{\dot{W}i} = \frac{5{,}5/0{,}96}{7{,}9472} = \boxed{72{,}09\%}$$

d)





$$\boxed{\dot{W}_{máx}} = 12{,}5\left(1-\frac{T_0}{T_a}\right) = 12{,}5\underbrace{\left(1-\frac{298}{337{,}49}\right)}_{11{,}70\%} = \underline{1{,}46 \text{ kW}}$$

$$T_a = \frac{c\,(68-61) + \cancel{\Delta P/\rho}}{c\,L\left(\frac{68+273}{61+273}\right)} = 337{,}49 \text{ K}$$