TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 1
(50 %)

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 esquema adjunto representa una central térmica termosolar que trabaja con un ciclo de Rankine. El campo solar calienta un aceite térmico (líquido incompresible) que se dirige en paralelo al generador de vapor (GV) y al recalentador (REC) para ceder calor al ciclo de Rankine. La temperatura del aceite a la salida del campo solar es de 410 ºC, y a la entrada de 290ºC. No hay pérdida de presión en ningún momento en el circuito de aceite.

Las turbinas de alta (TA) y baja presión (TB) son adiabáticas, con un rendimiento isentrópico del 90%. En TB tal rendimiento se define entre la entada (3) y la salida (6), asumiendo que la línea de expansión es una recta en el diagrama de Mollier. Las bombas (Bcon y BAC) se consideran adiabáticas e internamente reversibles. El agua a la salida del condensador (7) y del calentador abierto (CA, 10) está en estado de líquido saturado. El agua de alimentación a la salida del calentador cerrado (CC) se encuentra a la temperatura de saturación del vapor de extracción. El agua en el drenaje del calentador cerrado se encuentra como líquido saturado.

El vapor entra en la turbina de alta presión a 400ºC y 100 bar y en la de baja presión a 400ºC y 40 bar. La extracción de la turbina de baja de mayor presión se realiza a 10 bar y la de menor a 0,5 bar. El condensador trabaja a 10 kPa y cede el calor a una corriente de agua (líquido incompresible) que entra a 30 ºC y sale a 35 ºC, sin pérdida de presión. No hay pérdidas de presión en las tuberías e intercambiadores del circuito del agua/vapor.

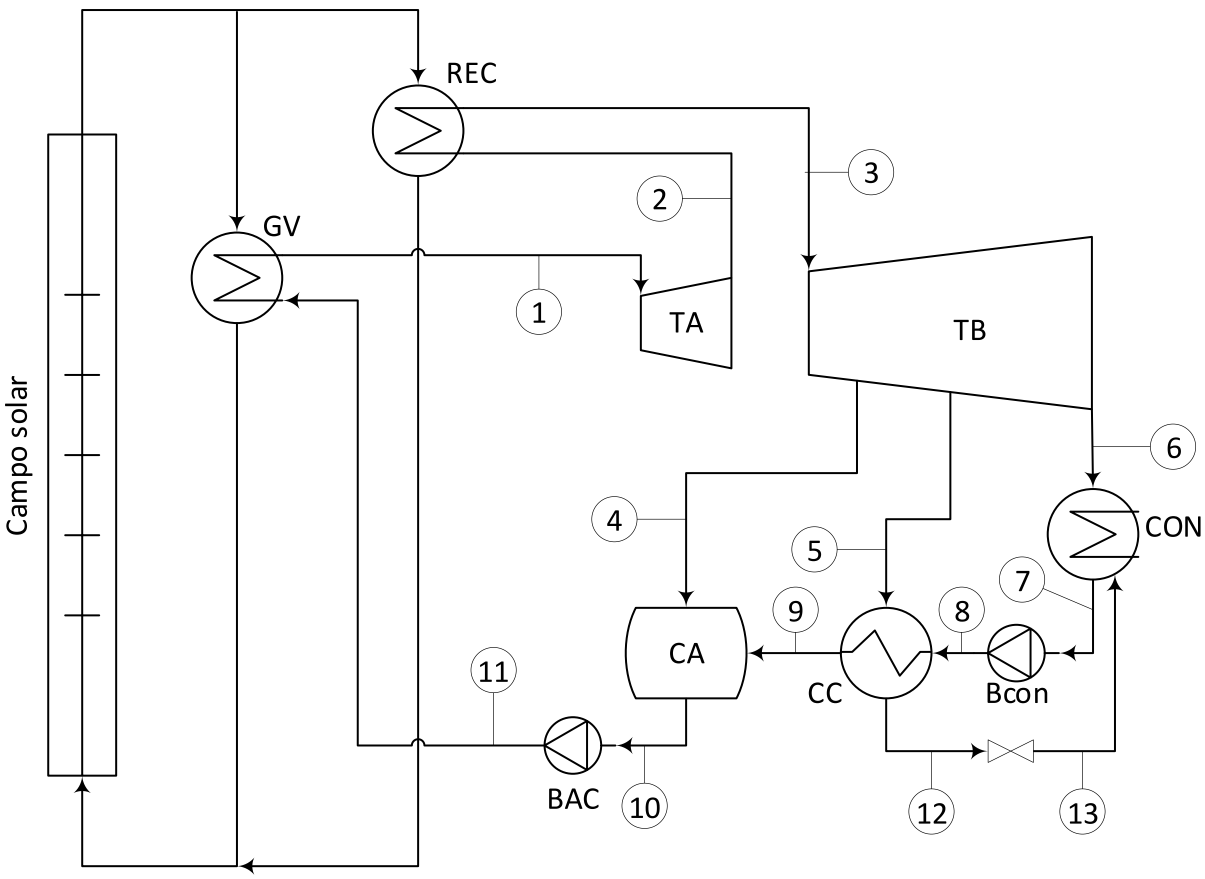
El trabajo neto del ciclo es de 50 MW. Las coordenadas del estado muerto se toman a 15 ºC y 1 bar.

Se pide:

- [1 p] a) Representar el diagrama T-s del ciclo
- [4 p] b) Rendimiento del ciclo
- [1 p] c) Flujo másico del vapor que entra en la turbina de alta presión
- [2 p] d) Exergía destruida total
- [2 p] e) Eficiencia exergética del ciclo

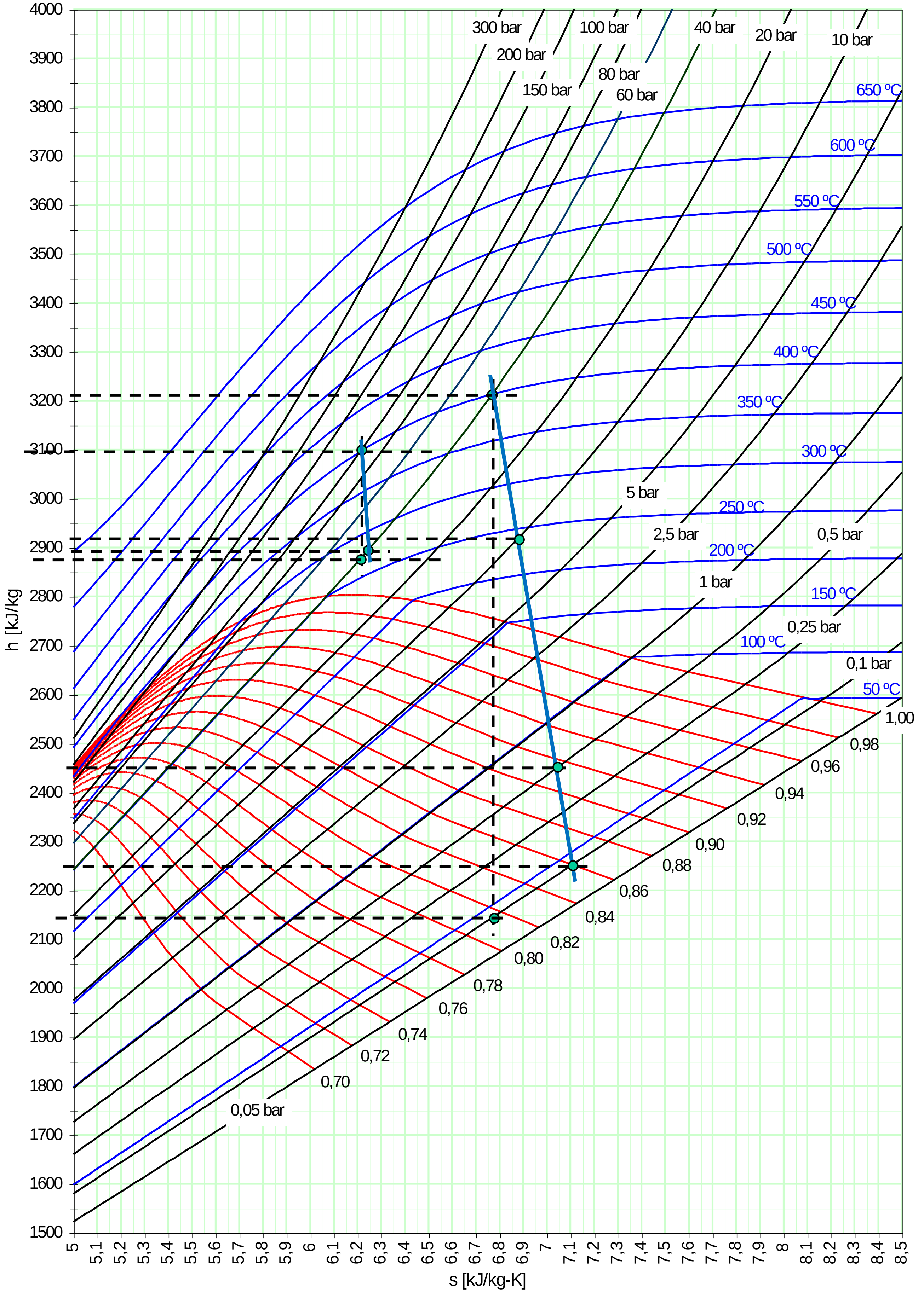
Tablas del agua saturada (líquido – vapor)

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
0,2	60,06	0,00101716	7,648	251,42	2608,9	0,832015	7,90723
0,25	64,96	0,00101985	6,203	271,96	2617,4	0,893187	7,83018
0,5	81,32	0,00102993	3,240	340,54	2645,2	1,09120	7,59304
5	151,8	0,00109255	0,3748	640,09	2748,1	1,86038	6,82069
10	179,9	0,00112723	0,1944	762,51	2777,1	2,13806	6,58502
20	212,4	0,00117672	0,09959	908,47	2798,3	2,44670	6,33902
40	250,4	0,00125241	0,04978	1087,4	2800,8	2,79657	6,06961
100	311,0	0,00145219	0,01803	1407,8	2725,4	3,36027	5,61587

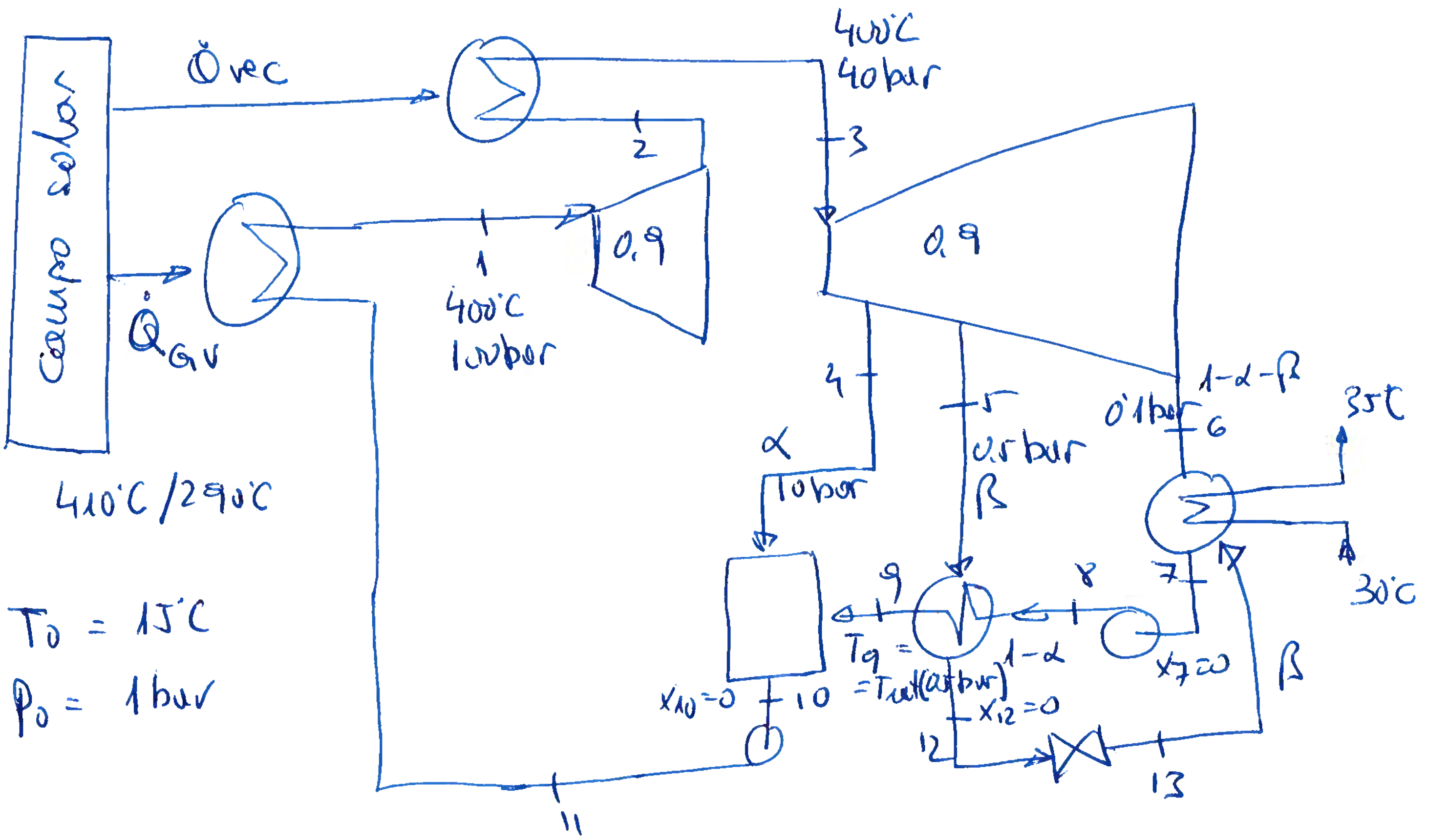


REC
GV
Campo solar
1
2
3
TA
TB
4
5
6
CON
7
8
9
CA
CC
Bcon
11
BAC
10
12
13

Diagrama de Mollier del agua



Problema - 1



410°C / 290°C

$T_0 = 15°C$

$P_0 = 1\,bar$

Focos equivalentes

$$T_c = \frac{\cancel{c}(410-290)}{\cancel{c}\,Ln\left[\frac{410+273}{290+273}\right]} = 621{,}07\,K$$

$$T_F = \frac{c(35-30)}{c\,Ln\left[\frac{35+273}{30+273}\right]} = 305{,}49\,K$$

$h_1 = 3100\ KJ/Kg$

$h_{2s} = 2900\ KJ/Kg$

$$\left.\right\}\ 0{,}9 = \frac{3100-h_2}{3100-2900} \rightarrow h_2 = 2920\ \frac{KJ}{Kg}$$

$h_3 = 3200\ KJ/Kg$

$h_{6s} = 2150$ "

$$\left.\right\}\ 0{,}9 = \frac{3200-h_6}{3200-2150} \rightarrow h_6 = 2255\ KJ/Kg$$

$h_4 = 2900$ KJ/Kg

$h_5 = 2450$ "

$h_7 = 191.80$ KJ/Kg $\quad v_7 = 0.0010 1028$ m^3/Kg

$h_8 = 191.8 + 0.00101028(10 - 0.1)100 = 192.8$ KJ/Kg

$h_9 = 340.54$ KJ/Kg

$h_{12} = 340.54$ KJ/Kg $= h_{13}$

$h_{10} = 762,51$ KJ/Kg $\quad v_{10} = 0.00112723$ m^3/Kg

$h_{11} = 762,51 + 0,00112723(100 - 10)100 = 772,66 \frac{KJ}{Kg}$

$\alpha h_4 + (1-\alpha) h_9 = h_{10} \longrightarrow \alpha = 0,1649$

$\beta h_5 + (1-\alpha) h_8 = \beta h_{12} + (1-\alpha) h_9 \longrightarrow \beta = 0,0585$

$w_{TA} = h_1 - h_2 = 180$ KJ/Kg

$w_{TB} = h_3 - \alpha h_4 - \beta h_5 - (1-\alpha-\beta) h_6 = 827,23 \frac{KJ}{Kg}$

$w_{Bcon} = (1-\alpha)(h_8 - h_7) = 0,8351$ KJ/Kg

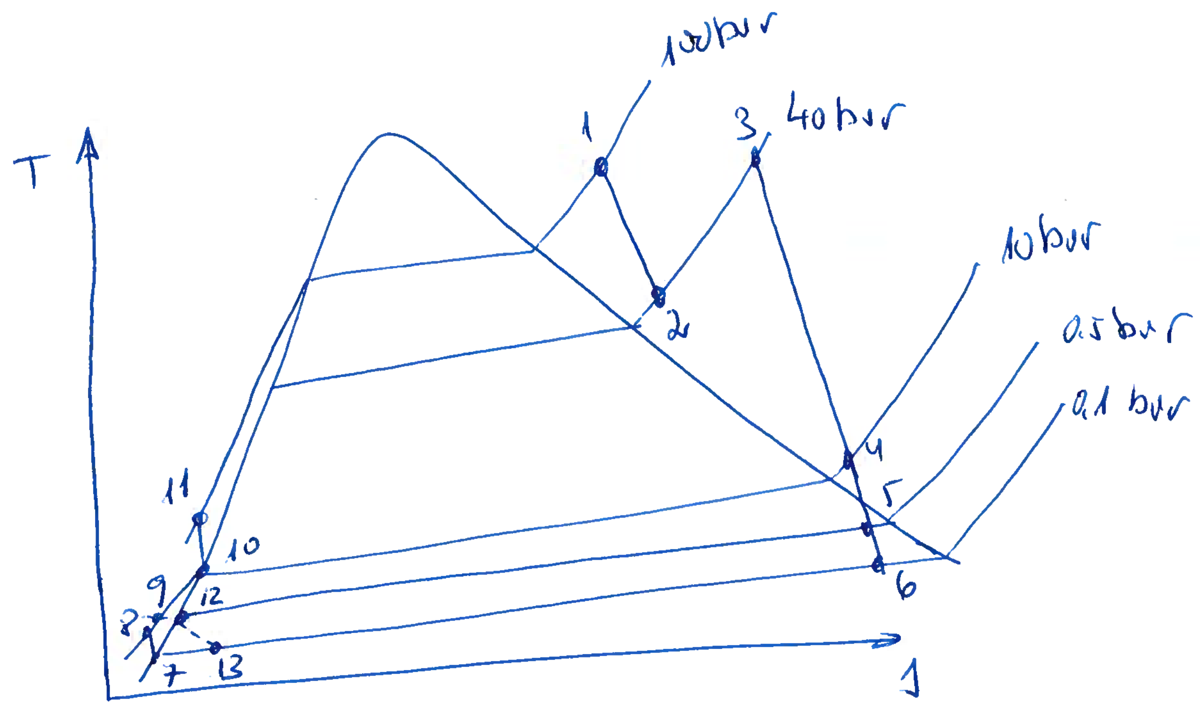
$w_{BAC} = h_{11} - h_{10} = 10.15$ KJ/Kg

$w_{neto} = 996,25$ KJ/Kg

$q_{GV} = h_1 - h_{11} = 2327,34$ KJ/Kg

$q_{rec} = h_3 - h_2 = 280$ KJ/Kg

$$\boxed{\eta_{ciclo}} = \frac{996,25}{2327,34 + 280} = \boxed{38,21\,\%}$$



$$50 \cdot 10^3 = \dot{m}\ 996{,}25 \longrightarrow \boxed{\dot{m} = 50{,}19\ kg/s}$$

$$\frac{dS_u}{dz} = \frac{-\dot{Q}_{GV} - \dot{Q}_{rec}}{T_C} + \frac{\dot{Q}_{con}}{T_F}$$

$$\dot{Q}_{GV} + \dot{Q}_{rec} = 50{,}19\left(2327{,}34 + 280\right) = 130857{,}72\ kW$$

$$\dot{Q}_{con} = 50{,}19 \times \left[(1-\alpha-\beta)h_6 + \beta h_{13} - (1-\alpha)h_7\right] =$$

$$= 80855{,}21\ kW$$

$$\frac{dS_u}{dz} = \frac{-130857{,}72}{621{,}07} + \frac{80855{,}21}{305{,}49} = \cancel{134{,}70}\ 53{,}98\ kW/K$$

$$\boxed{\dot{I}_{tot}} = 288 \times \cancel{134{,}70}\ 53{,}98 = \underline{15545{,}27\ kW}$$

$$\boxed{\varphi_{ciclo} = \frac{\dot{W}}{\dot{W} + I_{nr}} = \frac{5000}{5000 + 1545{,}27} = 76{,}28\%}$$

Ampliación:

Nótese que no es válido aplicar:

$$\varphi'_{ciclo} = \frac{\eta}{\eta_{carnot}}$$

dado que la temperatura media entrópica del agua excede a la del ambiente. Ahí habría otra irreversibilidad no contemplada.

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{305{,}49}{621{,}07} = 0{,}5081$$

$$\varphi'_{ciclo} = \frac{0{,}3821}{0{,}5081} = 0{,}7520 < \varphi_{ciclo}$$

$$\varphi^{ambiente}_{carnot} = 1 - \frac{288}{621{,}07} = 0{,}5363$$

$$\varphi''_{ciclo} = \frac{0{,}3821}{0{,}5363} = 0{,}7125 \ll \varphi_{ciclo}.$$

La φ''_{ciclo} está incluyendo la irreversibilidad del paso del calor del agua al ambiente, mientras que φ' no es correcta.

TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 2
(50 %)

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 diésel más grande del mundo es un Wärtsilä RT-flex96C que en 2006 se montó en el buque Emma Maersk, el mayor barco mercante en esa época (se adjunta foto del motor en el banco de pruebas). Se trata de un motor de dos tiempos (i = 1) sobrealimentado, con 14 cilindros y 25,48 m^3 de cilindrada total, con una relación de compresión de 18.

En el punto de máxima potencia el cigüeñal gira a 100 rpm, siendo la velocidad lineal media de pistón de 8,5 m/s, el consumo específico efectivo de 185 g/kWh y el dosado relativo de 0,8. En dicho punto las condiciones del aire al inicio de la carrera de compresión son de 45 ºC y 2 bar, saliendo los gases de escape a 350 ºC y 1 bar. El rendimiento mecánico es del 85%.

El combustible es fuelóleo pesado, con un dosado estequiométrico de 1/14,94 y un poder calorífico inferior de 43,2 MJ/kg. El aire y los gases de escape se pueden tratar como gas perfecto, ambos con las mismas propiedades (γ = 1,4; M = 28,97).

El ciclo termodinámico del motor se puede asimilar a un diésel puro (diésel lento), siendo la presión media indicada del motor en el punto de máxima potencia del 74,7% de la presión media indicada de dicho ciclo.

Tómense como coordenadas del estado muerto 20 ºC y 1 bar.

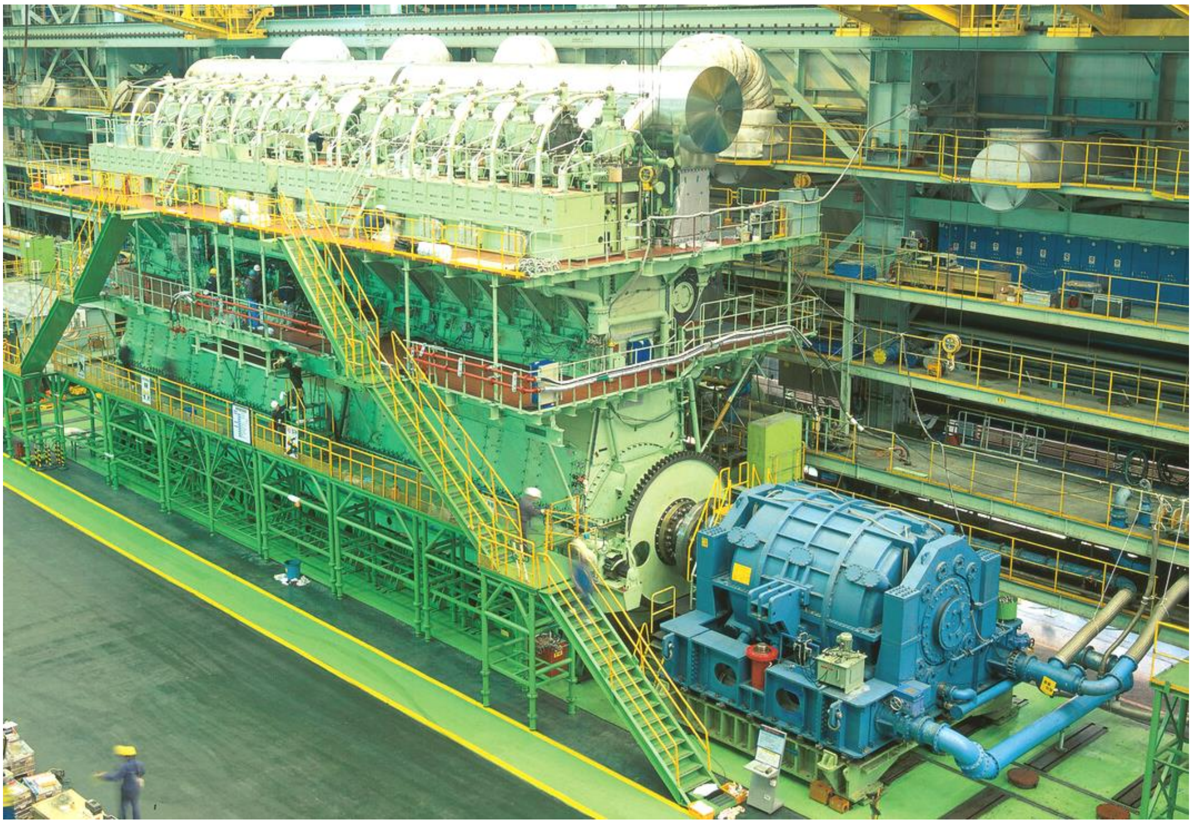
Se pide:

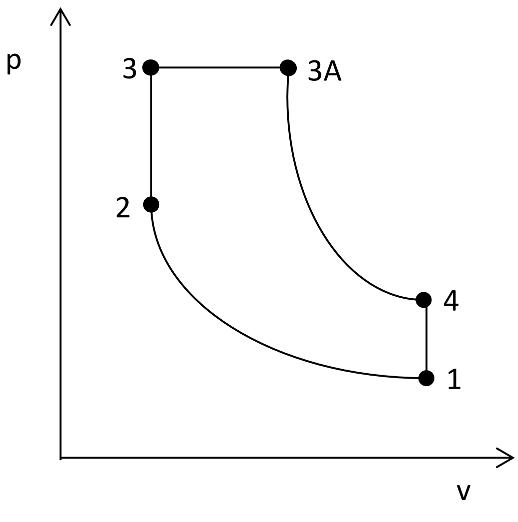
[2 p] a) Diámetro, carrera y volumen de la cámara de combustión.

[5 p] b) Potencia efectiva máxima.

[1 p] c) Rendimiento efectivo en el punto de máxima potencia.

[2 p] d) Se quiere producir electricidad a partir de los gases de escape del motor para consumos auxiliares del barco. Para ello se propone retirar calor de los mismos y cederlo a un ciclo Rankine. Determinar la máxima potencia mecánica que, desde un punto de vista teórico, podría obtenerse de este ciclo cuando el motor entrega su máxima potencia en el cigüeñal.



MOTORES	
	$\alpha = \frac{p_3}{p_2} \quad \beta = \frac{v_{3A}}{v_3}$ $q_{23A} = \frac{R \cdot T_1 \cdot r^{\gamma-1}}{\gamma - 1} [\alpha - 1 + \alpha \cdot \gamma \cdot (\beta - 1)]$ $pmi = p_1 \cdot \left(\frac{r}{r-1} \right) \frac{r^{\gamma-1} \{1 - \alpha \cdot [1 + \gamma \cdot (\beta - 1)]\} + \alpha \cdot \beta^{\gamma} - 1}{1 - \gamma}$

Problema - 2

$2T\ (i=1)$ $\qquad z = 14$ $\qquad r = 18$

sobrealimentado $\qquad V_T = 25,48\ m^3$

$N = 100\ rpm$ $\qquad g_e = 185\ g/kWh$ $\qquad P_1 = 2\ bar$

$c_m = 8,5\ m/s$ $\qquad F_r = 0,8$ $\qquad T_1 = 45°C$

$\eta_m = 0,85$ $\qquad F_e = 1/14,94$ $\qquad T_e = 350°C$

$PCI = 43200\ kJ/kg$ $\qquad P_e = 1\ bar$

$\left.\begin{array}{l}\gamma = 1,4\\ M = 28,97\end{array}\right\}$

diesel puro

$\hookrightarrow \alpha = 1$

$pmi = 0,747\ pmi_{calc}$ $\qquad \left.\begin{array}{l}T_0 = 20°C\\ P_0 = 1\ bar\end{array}\right\}$

— o — o —

$$c_m = 2NL \Rightarrow 8,5 = 2 \cdot \frac{100}{60} \cdot L \rightarrow \boxed{L = 2,55\ m}$$

$$V_D = \frac{25,48}{14} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 2,55 \rightarrow \boxed{D = 0,9533\ m}$$

$\hookrightarrow V_D = 1,82\ m^3$

$$r = 18 = \frac{V_D + V_{cc}}{V_{cc}} \rightarrow \underline{\underline{V_{cc}}} = 0,1071\ m^3 = \underline{\underline{107,06\ dm^3}}$$

$$q_{23A} = \frac{\dot m_f\ PCI}{\dot m_f + \dot m_0} = \frac{PCI}{1 + \frac{1}{F}} = \frac{43200}{1 + 18,675} = 2195,68\ \frac{kJ}{kg}$$

$$F = F_r \cdot F_e = 0,8/14,94 = 1/18,675$$

$$2195,68 = \frac{0,287 \times (45+273) \times 18^{0,4} \left[1,4 \left(\beta - 1 \right) \right]}{0,4} \longrightarrow \beta = 3,1632$$

$$R = c_p - c_v = c_p \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8'314}{28,97} = 0,287 \frac{kJ}{kg\,K}$$

$$p_{mi\,a\,lo} = 2 \times \left(\frac{18}{17} \right) \frac{18^{0,4} \left\{ 1 - \left[1 + 1,4 \times 2,1632 \right\} + 3,1632^{1,4} - 1 \right.}{-0,4} =$$

$$= 29,6979 \text{ bar}$$

$$p_{mi} = 0,747 \times 29,6979 = 22,1843 \text{ bar}$$

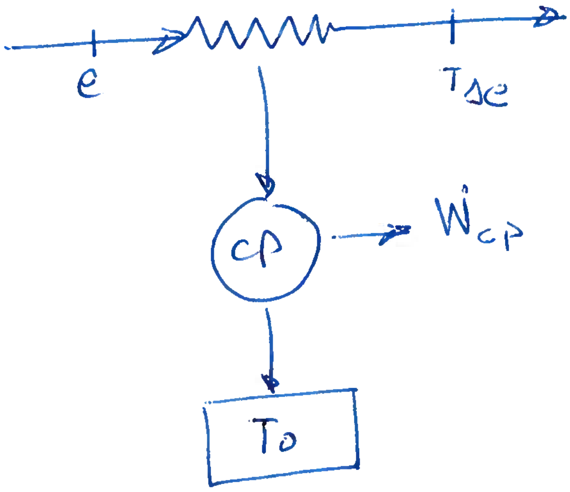
$$\eta_m = 0,85 = \frac{p_{me}}{p_{mi}} \longrightarrow p_{me} = 18,8567 \text{ bar}$$

$$1885,67 \text{ kPa} = \frac{\dot{W}_e}{25,48 \times 1 \times \frac{100}{60}} \longrightarrow \underline{\underline{\dot{W}_e}} = 80\,077,93 \text{ kW} =$$

$$= \boxed{80,08 \text{ MW}}$$

$$\boxed{\eta_e} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f \, PCI} = \frac{80077,93}{4,115 \times 43200} = \boxed{45,05\,\%}$$

$$g_e = \frac{185 \text{ g}}{\text{kWh}} = \frac{\dot{m}_f \,(g/s) \times 3600 \text{ s/h}}{80077,93} \longrightarrow \dot{m}_f = 4,115 \frac{kg}{s}$$



El máximo trabajo teórico que se puede obtener de una corriente en condiciones "e" es precisamente su exergía de corriente. Por tanto:

$$\dot W_{cp}^{máx} = (\dot m_f + \dot m_a)\left[\underbrace{h_e - h_o - T_o(s_e - s_o)}_{\psi_e}\right]$$

$$F = \frac{1}{18,675} = \frac{4,115}{\dot m_a} \rightarrow \dot m_a = 76,8476 \text{ kg/s}$$

$$c_p = \frac{0,287}{1 - 1/1,4} = 1,0045 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\psi_e = 1,0045\,(350 - 20) - 293 \times 1,0045 \, L\left(\frac{350+273}{293}\right) =$$

$$= 109,46 \text{ kJ/kg}$$

$$\boxed{\dot W_{cp}^{máx}} = (4,115 + 76,8476) \times 109,46 = \boxed{8862,07 \text{ kW}}$$

También se podría calcular a partir del esquema:

$$\dot{W}_{cp} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)\, \underbrace{c_p\,(T_e - T_{se})}_{q_e} \Bigg(\underbrace{1 - \frac{T_0}{\frac{h_e - h_{se}}{s_e - s_{se}}}}_{\eta_{carnot}} \Bigg) =$$

$$= (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \Big[\underbrace{h_e - h_{se} - T_0\,(s_e - s_{se})}_{\psi_e - \psi_{se}} \Big]$$

La expresión anterior se maximiza cuando "se" coincide con el estado muerto, con $\psi_{se} = \psi_0 = 0$ y por tanto, lo que

$$\dot{W}_{cp}^{max} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)\, \psi_e$$