TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

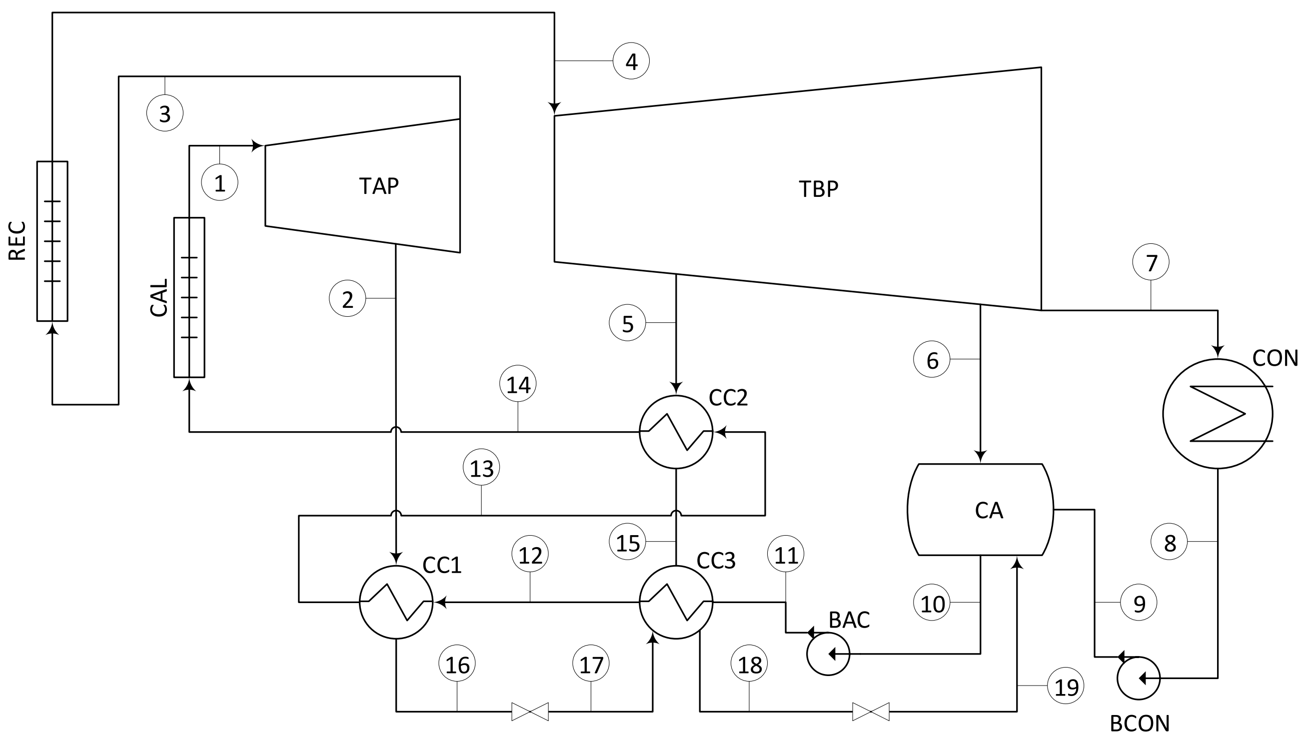
Problema – 1
(4 puntos)

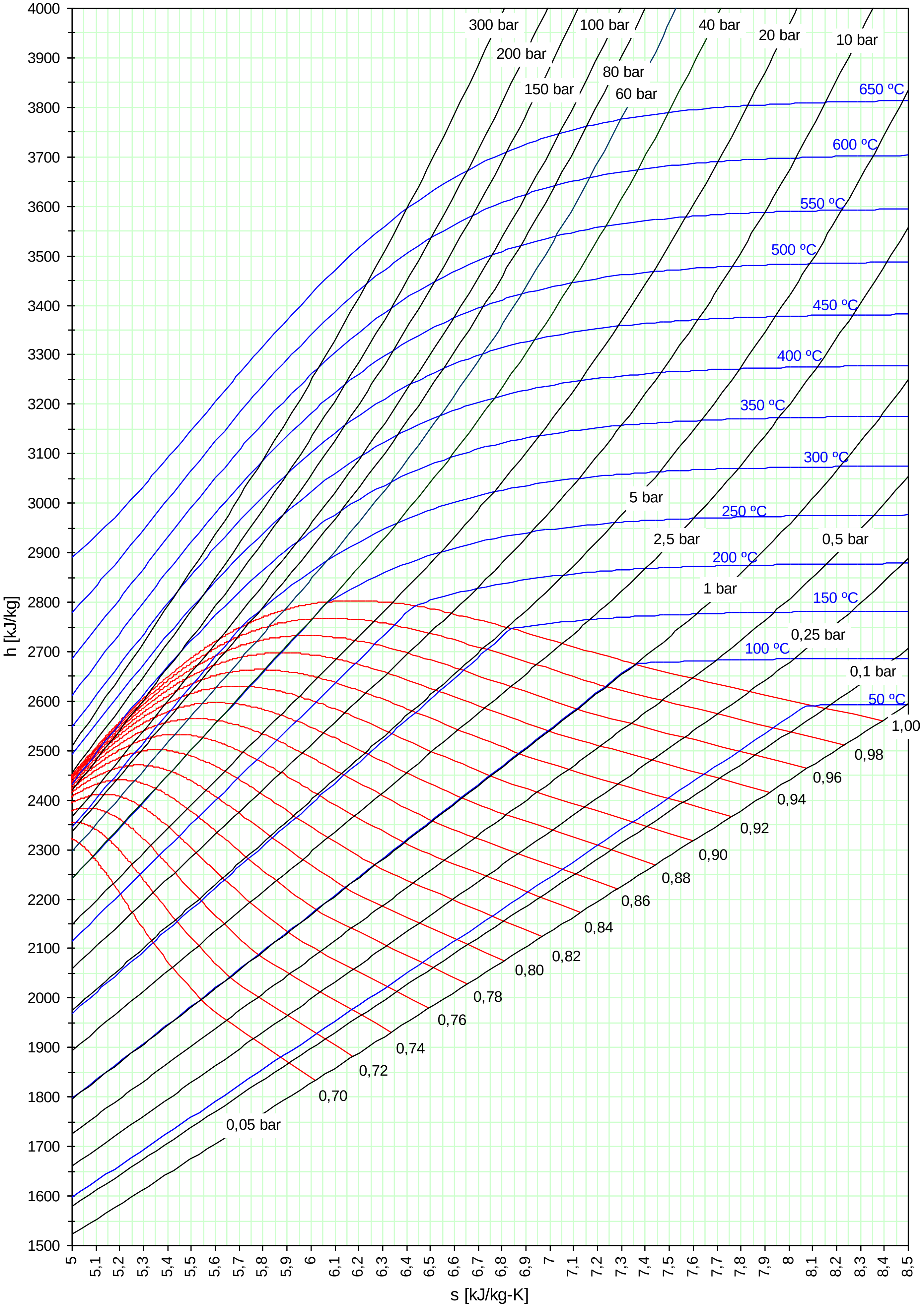
No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes "smartwatch" deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.

La figura adjunta muestra el diagrama de una central de ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración. El vapor entra a la turbina de alta presión (TAP) a 150 bar y 550 °C, saliendo de la misma a 40 bar. Dicha turbina TAP presenta una extracción a 50 bar. El vapor que abandona la turbina de alta se dirige al recalentador (REC), saliendo del mismo a 550 °C, entrando así a la turbina de baja (TBP). Dicha turbina presenta dos extracciones, una a 30 bar y otra a 5 bar. La salida de la turbina de baja se encuentra a 5 kPa. El agua sale del condensador como líquido saturado, así como del calentador abierto (CA) y de los drenajes de los calentadores cerrados CC1 y CC3.

El agua de alimentación sale del calentador CC2 a 280 °C y de los calentadores CC1 y CC3 a la temperatura de saturación del vapor entrante. Las bombas se consideran adiabáticas con rendimiento 100%. Se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos. El rendimiento isentrópico de la turbina de alta, definido entre su entrada y su salida es 90%, mientras que el de la de baja es de 85%, definido también entre su entrada y su salida. En ambas turbinas la línea de expansión en un diagrama de Mollier es una línea recta.

Determinar el rendimiento del ciclo.



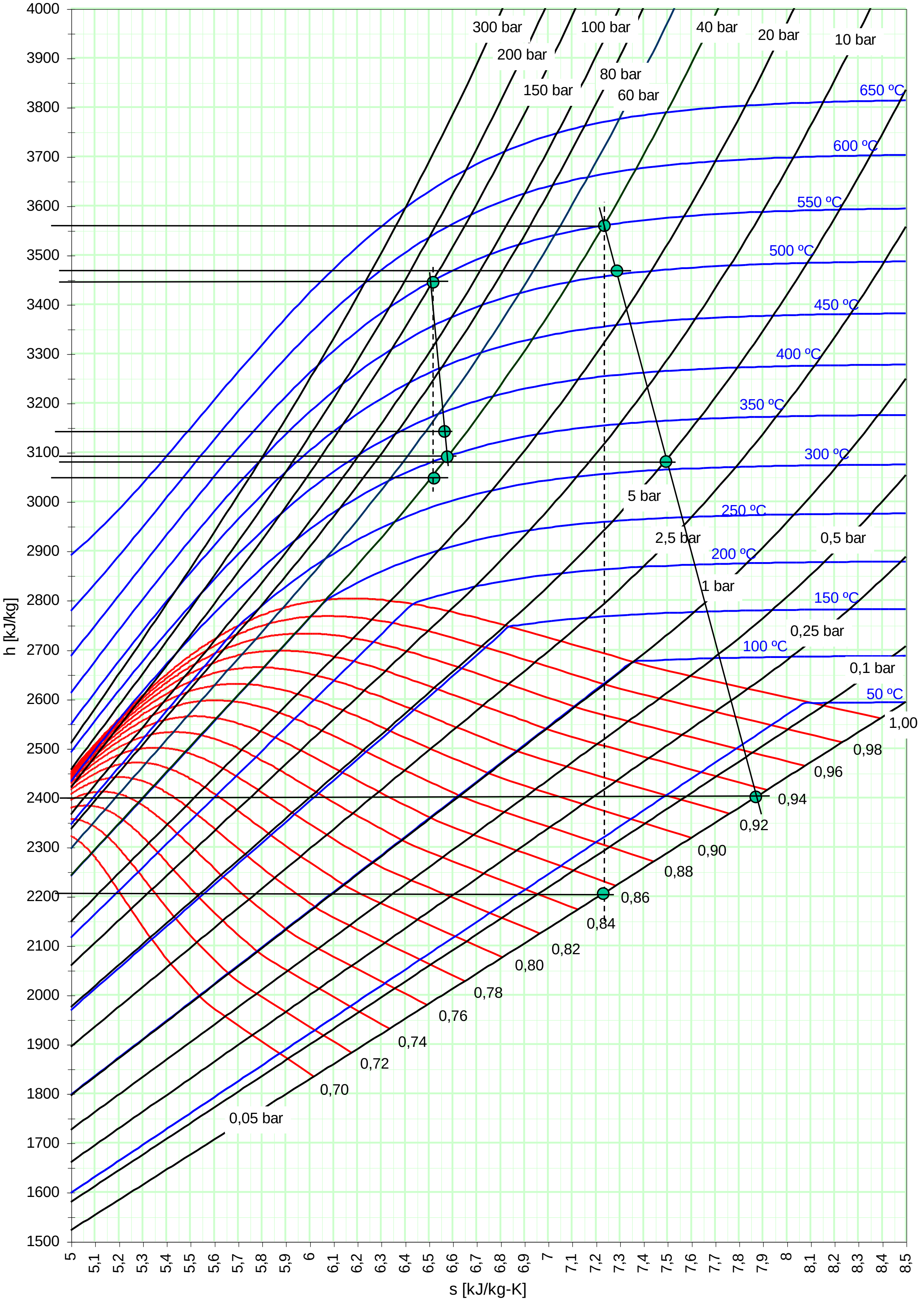


h [kJ/kg]
s [kJ/kg-K]
4000
3900
3800
3700
3600
3500
3400
3300
3200
3100
3000
2900
2800
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
1900
1800
1700
1600
1500
5
5,1
5,2
5,3
5,4
5,5
5,6
5,7
5,8
5,9
6
6,1
6,2
6,3
6,4
6,5
6,6
6,7
6,8
6,9
7
7,1
7,2
7,3
7,4
7,5
7,6
7,7
7,8
7,9
8
8,1
8,2
8,3
8,4
8,5
300 bar
200 bar
150 bar
100 bar
80 bar
60 bar
40 bar
20 bar
10 bar
5 bar
2,5 bar
1 bar
0,5 bar
0,25 bar
0,1 bar
0,05 bar
650 ºC
600 ºC
550 ºC
500 ºC
450 ºC
400 ºC
350 ºC
300 ºC
250 ºC
200 ºC
150 ºC
100 ºC
50 ºC
1,00
0,98
0,96
0,94
0,92
0,90
0,88
0,86
0,84
0,82
0,80
0,78
0,76
0,74
0,72
0,70

Tablas de saturación del agua (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
0,1	46	0,00101028	14,67	192	2580	0,649191	8,14881
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
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
30	230	0,00121661	0,06667	1010	2800	2,64543	6,18561
40	250	0,00125241	0,04978	1090	2800	2,79657	6,06961
50	260	0,00128618	0,03945	1150	2790	2,92073	5,97370
60	280	0,00131900	0,03245	1210	2780	3,02747	5,89015
70	290	0,00135154	0,02738	1270	2770	3,12204	5,81475
80	300	0,00138430	0,02352	1320	2760	3,20769	5,74496
90	300	0,00141772	0,02049	1360	2740	3,28658	5,67908
100	310	0,00145219	0,01803	1410	2730	3,36027	5,61587
110	320	0,00148812	0,01599	1450	2710	3,42991	5,55441
120	320	0,00152596	0,01426	1490	2690	3,49643	5,49389
130	330	0,00156627	0,01278	1530	2660	3,56060	5,43359
140	340	0,00160972	0,01149	1570	2640	3,62315	5,37282
150	340	0,00165722	0,01034	1610	2610	3,68474	5,31080
160	350	0,00171003	0,009312	1650	2580	3,74612	5,24660
170	350	0,00177002	0,008374	1690	2550	3,80815	5,17905
180	360	0,00184017	0,007504	1730	2510	3,87202	5,10635

Diagrama de Mollier del agua



Leyendo del diagrama: [todas las entalpías en KJ/Kg]

$h_1 = 3450$
$h_{3s} = 3050$ $\Big\}$ $0.9 = \dfrac{3450 - h_3}{3450 - 3050} \rightarrow h_3 = 3090$

$h_2 = 3150$

$h_4 = 3550$
$h_{7s} = 2200$ $\Big\}$ $0.85 = \dfrac{3550 - h_7}{3550 - 2200} \rightarrow h_7 = 2402{,}5$

$h_5 = 3460$

$h_6 = 3070$

Leyendo ya de las tablas:

$h_8 = 138$

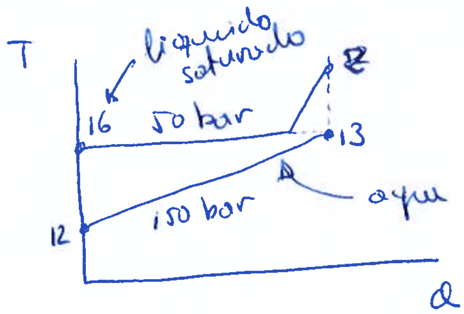
$h_9 = 138 + 0{,}00100533 (5 - 0.05) 100 = 138{,}5$

$h_{10} = 640$

$h_{11} = 640 + 0{,}0010 9255 (150 - 5) 100 = 655{,}84$

$h_{12} = 1010 = h_{18} = h_{19}$
$h_{13} = 1150 = \cancel{h_{16}}\ h_{16} = h_{17}$ $\Big\}$ hay coincidencia entre la entalpía del agua de alimentación que sale

y el drenaje porque ambas corrientes están a la misma temperatura y son líquidos, de ahí que aunque tengan diferentes presiones la entalpía del agua de alimentación se aproxima como valor exacto para el drenaje h_f [Tdrenaje], T aproximado para el agua de alimentación:



agua presurizada (líquido comprimido)

$h_{14} = 1210$

Regenerador CC1:

$$\alpha_1\, 3150 + 1010 = \alpha_1\, 1150 + 1150 \longrightarrow \alpha_1 = 0{,}07$$

Regenerador CC2:

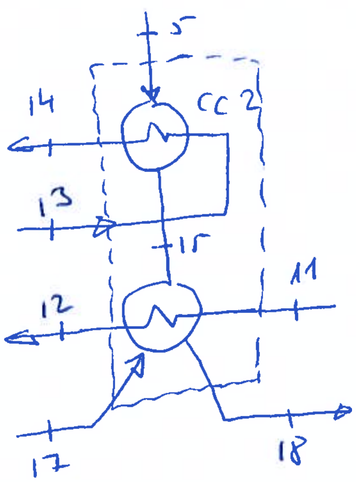
desconocido

$$\alpha_2\, 3460 + 1150 = 1210 + \alpha_2\, h_{15}$$

Regenerador CC3:

$$\alpha_2\, h_{15} + 655{,}84 + 0{,}07 \times 1150 = (0{,}07 + \alpha_2)\, 1010 + 1010$$

Nótese que se podría haber tomado como volumen de control:



$$\alpha_2\, 3460 + 1150 + 0{,}07 \times 1150 + 655{,}84 = 1210 + 1010 + (0{,}07 + \alpha_2)\, 1010$$

Esta ecuación es la misma que restar las 2 anteriores de CC2 y CC3, es decir, "desaparece" la entalpía de 15, resultando

$$\alpha_2 = 0{,}165$$

Entrando en CC2 o CC3: $h_{15} = 3096,46$

Finalmente CA:

$$\alpha_3\,3070 + (1-0{,}07-0{,}165-\alpha_3)\,138{,}5 + (0{,}07+0{,}165)\cdot$$

$$\cdot 1010 = 640 \longrightarrow \alpha_3 = 0{,}1012$$

Estableciendo los balances energéticos:

$$W_{TAP} = 3040 - 0{,}07 \times 3150 - (1-0{,}07)\,3090 =$$
$$= 355{,}8 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{TBP} = (1-0{,}07)\,3550 - 0{,}165 \times 3460 - 0{,}1012 \times 3070 -$$
$$-(1-0{,}07-0{,}165-0{,}1012)\,2402{,}5 = 825{,}14 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{BCON} = (1-0{,}07-0{,}165-0{,}1012)\,(138{,}5-138) = 0{,}332 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{BAC} = 655{,}84 - 640 = 15{,}84 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{cal} = 3450 - 1210 = 2240 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{rec} = (1-0{,}07)\,(3550-3090) = 427{,}8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{355{,}8 + 825{,}14 - 0{,}332 - 15{,}84}{2240 + 427{,}8} = 43{,}66\ \%$$

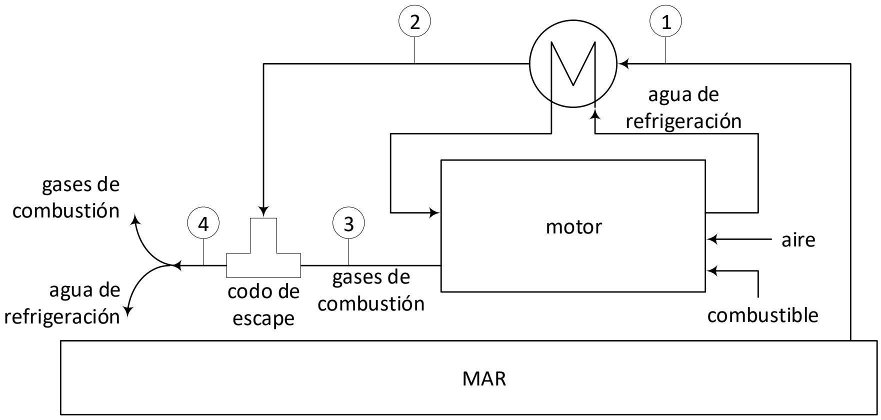
TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 2
(3 puntos)

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 Betamarine Beta 30, empleado para la propulsión de embarcaciones de recreo, es un motor tricilíndrico de cuatro tiempos de encendido por compresión, con un diámetro de pistón de 78 mm, una carrera de 78,4 mm y una relación de compresión de 24. Desarrolla una potencia efectiva a plena carga de 19,5 kW a 3600 rpm, con una relación aire-combustible de 23:1, y consumiendo 5,8 dm^3/h de gasóleo con poder calorífico inferior (PCI) de 43 MJ/kg, densidad 835 kg/m^3. El aire entra en el motor a 20 °C y 1 bar, considerándose estas condiciones las del estado muerto.



Para refrigerar el motor se emplea, tal como se indica en la figura, un caudal de 17,5 dm^3/min de agua de mar, que se conduce a un intercambiador de calor, en el que extrae calor del fluido refrigerante del motor; a continuación, el agua de mar se inyecta en el llamado "codo de escape", un mezclador encargado de disminuir la temperatura de los gases de combustión. La temperatura del agua de mar a la entrada (1) y a la salida (2) del intercambiador es 17 °C y 23 °C, respectivamente, y la de los gases de combustión a la salida del motor (3), 600 °C.

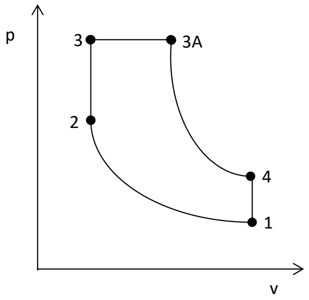
La presión a la salida del motor y en el circuito de agua de mar es 1 bar. Se desprecian las pérdidas de presión.

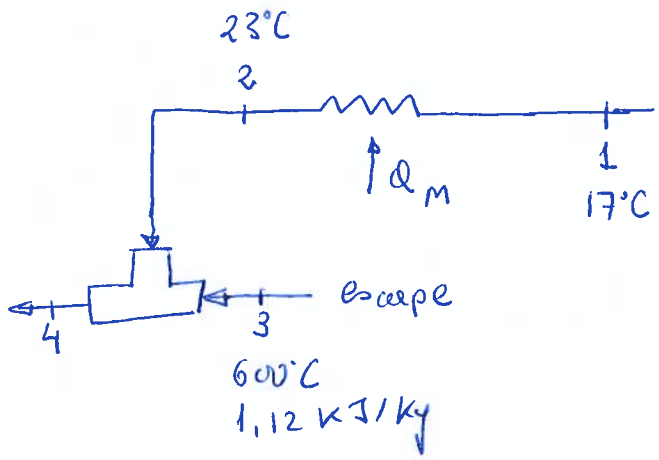
Puede admitirse que los gases de combustión se comportan como gas perfecto de calor específico 1,12 kJ/kg- K, y que el agua de mar se comporta como líquido incompresible con calor específico 4,18 kJ/kg-K y densidad 1000 kg/m^3. El aire se considera gas perfecto con R = 287 J/kg-K.

Determinar:

a) Cilindrada y volumen de la cámara de combustión
b) Consumo específico efectivo
c) Par efectivo
d) Presión media efectiva
e) Rendimiento volumétrico
f) Temperatura a la salida del codo de escape (4)
g) Calor retirado del motor en el intercambiador
h) Exergía destruida en el codo de escape

Formulario:

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



4,18 KJ/Kg ; ρ_W = 1000 Kg/m³

$\dot{V}_W$ = 17,5 dm³/min

$$V_T = 3 \times \frac{\pi \times 0{,}078^2}{4} \times 0{,}0784 = \underline{\underline{1123{,}871\ cm^3}}$$

$$\begin{cases} r = 24 = \dfrac{V_D + V_{CC}}{V_D} \\ V_D = 1123{,}871/3\ cm^3 \end{cases} \longrightarrow \underline{\underline{V_{CC} = 16{,}29\ cm^3}}$$

$$\dot{m}_f = \frac{5'8 \times 10^{-3}\ m^3}{3600\ s} \times 835\ \frac{kg}{m^3} = 1{,}3453\ g/s$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = 23 = \frac{\dot{m}_a}{1{,}3453} \longrightarrow \dot{m}_a = 30{,}9414\ g/s$$

$$\underline{\underline{g_e}} = \frac{1{,}3453\ g/s \times 3600\ s/h}{19{,}5\ kW} = \underline{\underline{248{,}36\ g/kWh}}$$

$$\underline{\underline{M_e}} = \frac{19{,}5 \times 10^3}{3600 \times \frac{2\pi}{60}} = \underline{51{,}725\ mN}$$

$$\underline{\underline{p_{me}}} = \frac{19{,}5\ kPa \cdot m^3}{1 \times 1123{,}871 \times 10^{-6}\ m^3 \times \frac{1\ ciclo}{2\ rev} \times \frac{3600}{60} \times \frac{rev}{s}} = \underline{\underline{578{,}36\ kPa}}$$

$$\eta_v = \frac{30,9414 \times 10^{-3}}{\frac{100}{0,287 \times 293} \times 1123,871 \times 10^{-6} \times \frac{3600}{60} \times \frac{1}{2}} = \underline{\underline{77,17\ \%}}$$

$$\dot{m}_w = \frac{17,5 \times 10^{-3}}{60} \times 1000 = 0,2917 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_w h_{w2} + \dot{m}_g h_3 = \dot{m}_w h_4 + \dot{m}_g h_4$$

$$\dot{m}_w C_w (T_{w2} - T_4) = \dot{m}_g C_{pg} (T_4 - T_3)$$

$$\underbrace{0,2917 \times 4,18}_{1,2193} (23 - T_4) = (30,9414 + 1,3453) \times 1,12 \times (T_4 - 600)$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{T_4 = 39,62\,°C}$$

$$\underline{\dot{Q}_m} = 0,2917 \times 4,18 (23 - 17) = \underline{\underline{7,3158 \text{ kW}}}$$

$$\dot{m}_w s_2 + \dot{m}_g s_3 + \dot{S}_{gen}^{cardo} = \dot{m}_w s_{w4} + \dot{m}_g s_{g4}$$

$$\dot{S}_{gen}^{cardo} = \dot{m}_w C_w \, L\left(\frac{T_4}{T_2}\right) + \dot{m}_g C_{pg} \, L\left(\frac{T_4}{T_3}\right) =$$

$$= 0,2917 \times 4,18 \, L\left(\frac{39,62 + 273}{23 + 273}\right) +$$

$$+ 0,0361611 \, L\left(\frac{39,62 + 273}{600 + 273}\right) = 0,0294735 \text{ kW/K}$$

$$\underline{\underline{\dot{I}_{cardo}}} = T_0 \cdot \dot{S}_{gen}^{cardo} = \underline{\underline{8,6357 \text{ kW}}}$$

TERMODINÁMICA

Nombre____ Grupo______

Problema – 3
(3 puntos)

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.

La Figura 1 muestra el esquema de una bomba de calor geotérmica (el evaporador toma calor del terreno, TERRENO) para producir calor para calefacción (CAL) en el condensador y agua caliente sanitaria (ACS) en el desrecalentador. La Figura 2 muestra el diagrama T-s del fluido que recorre el ciclo termodinámico de la bomba. Todos los procesos elementales se modelarán como rectas en dicho diagrama (nótese que el 4-5 se ha representado con línea discontinua al ser un proceso no estático). La Tabla 1 muestra algunas de las propiedades de los puntos representativos del ciclo.

El terreno se considera un foco a 16 °C. El calor para el ACS lo recoge una corriente de agua que llega a la bomba de calor a 16 °C y sale, sin perder presión, a 60 °C. El calor para la calefacción (CAL) lo recoge otra corriente de agua que llega a la bomba a 40 °C y sale a 50 °C, también sin perder presión. El compresor es adiabático.

La temperatura del ambiente exterior es de 0 °C, tomándose como coordenada del estado muerto. Las corrientes de agua de CAL y ACS se modelan como líquidos incompresibles (ρ = 1000 kg/m^3; c = 4,18 kJ/kg-K).

Para una producción de 20 kW de calor de calefacción, y considerando que el efecto buscado por la bomba es la producción conjunta de los calores CAL y ACS, se pide:

a) Gasto másico del fluido de trabajo que recorre la bomba
b) COP
c) Calor producido para ACS
d) Exergía destruida total en la instalación limitada por la línea discontinua
e) Eficiencia exergética del compresor
f) Exergía destruida en el desrecalentador debido al proceso de transferencia de calor desde la corriente 2-3 hasta el agua caliente sanitaria
g) Diagrama de Sankey de la instalación limitada por la línea discontinua, considerada ésta como "caja negra"

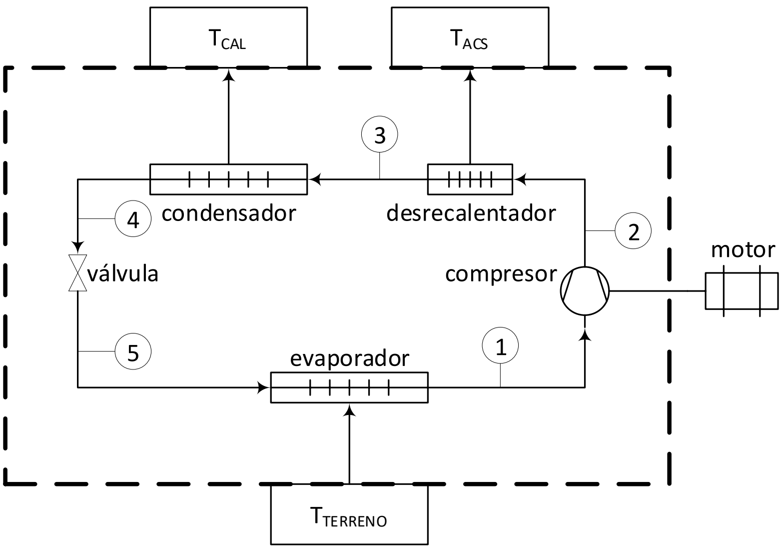


Fig. 1. Esquema de la bomba de calor.

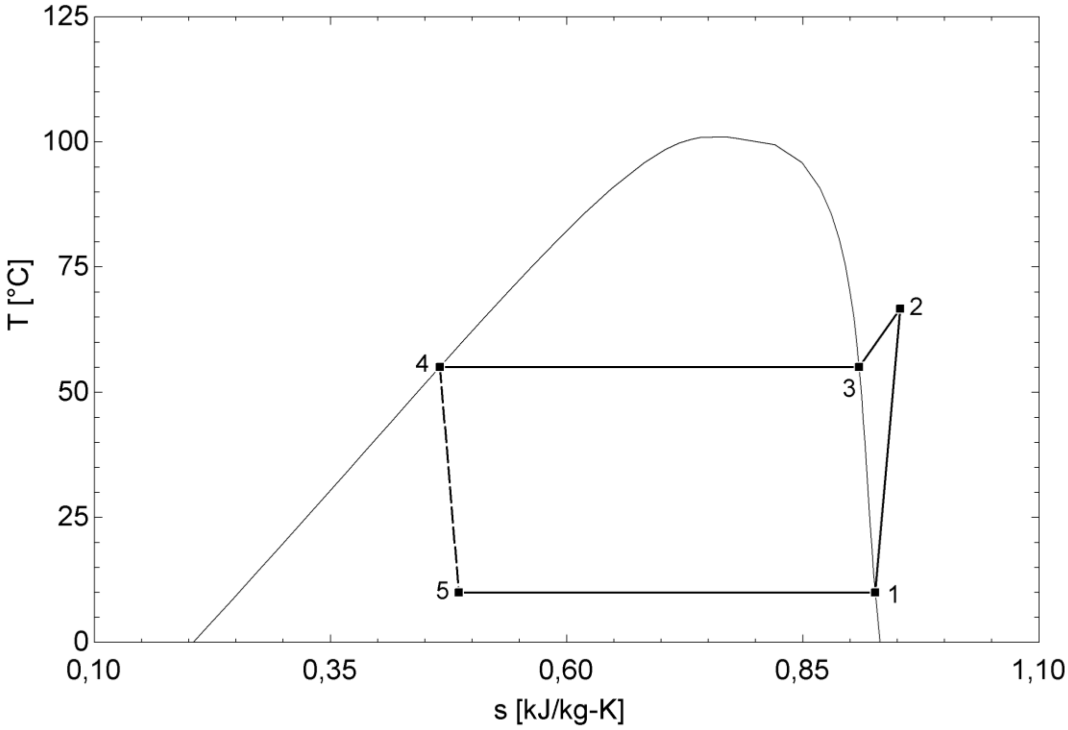


Fig. 2. Diagrama T-s del ciclo termodinámico que sigue la bomba de calor.

Tabla 1. Propiedades de los puntos representativos del ciclo termodinámico.

Punto	p [bar]	T [°C]	s [kJ/kg-K]
1	4,15	10,0	0,92641
2	14,9	66,7	0,95267
3	14,9	55,0	0,90929
4	14,9	55,0	0,46544
5	4,15	10,0	0,48555

Al no haber pérdidas de presión, el fluido de trabajo de la bomba experimenta un proceso internamente reversible en 2-3, 3-4 y 5-1. El resto de procesos son internamente irreversibles (1-2) o directamente no estáticos (4-5).

En los internamente reversibles, al haber intercambio de trabajo, el área del T-s representa el calor intercambiado.

$$\dot{Q}_{cal} = 20\,kW = \dot{m}\,\bar{T}_{34}\,(s_3 - s_4) =$$

$$= \dot{m}\,(55 + 273)(0{,}90929 - 0{,}46554)$$

$$\hookrightarrow \boxed{\dot{m} = 0{,}1374\ kg/s}$$

$$q_{ACS} = \left[\frac{55 + 66{,}7}{2} + 273\right](0{,}95267 - 0{,}90929) =$$

$$= 14{,}4824\ \frac{kJ}{kg} \longrightarrow \dot{Q}_{ACS} = \dot{m}\,q_{ACS} = 1{,}99\ kW$$

$$q_{terreno} = (10 + 273)(0{,}92641 - 0{,}48555) = 124{,}763\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{terreno} = \dot{m}\,q_{terreno} = 17{,}14\ kW$$

$$\dot{W} + \dot{Q}_{terreno} = \dot{Q}_{ACS} + \dot{Q}_{cal}$$

$$\hookrightarrow \dot{W} = 4{,}8463\ kW$$

$$COP = \frac{20 + 1{,}99}{4{,}8463} = 4{,}5375$$

$$\frac{dS_u}{d\tau} = \frac{\dot{Q}_{CAL}}{\bar{T}_{cal}} + \frac{\dot{Q}_{ACS}}{\bar{T}_{ACS}} - \frac{\dot{Q}_{Terr}}{T_{terr}} = \frac{20}{317,97} + \frac{1,99}{310,48} -$$

$$- \frac{17,144}{289} = 0,009987 \text{ KW/K}$$

$$\bar{T}_{cal} = \frac{50-40}{L\left(\frac{50+273}{40+273}\right)} = 317,97 \text{ K}$$

$$\bar{T}_{ACS} = \frac{60-16}{L\left(\frac{60+273}{16+273}\right)} = 310,48 \text{ K}$$

$$\underline{\underline{\dot{I}_{TOT}}} = T_0 \times \frac{dS_u}{d\tau} = \underline{2,7265} \text{ KW}$$

$$\underline{\underline{\varepsilon_{comp}}} = \frac{\dot{W} - \dot{I}_{comp}}{\dot{W}} = \frac{4,8463 - 0,985}{4,8463} = \underline{\underline{79,67\%}}$$

$$\dot{I}_{comp} = 273 \times 0,1374\,(0,95263 - 0,42641) =$$

$$= 0,985 \text{ KW}$$

$$\bar{T}_{23} = \frac{55+67}{2} + 273 = 334 \text{ K}$$

$$\underline{\underline{\dot{I}_{des}}} = \dot{Q}_{ACS}\left(\frac{1}{310,48} - \frac{1}{334}\right) \times 273 = \underline{\underline{0,1232 \text{ KW}}}$$

(la irreversibilidad se debe sólo al paso de calor).

Alternativamente, se podría haber calculado como:

$$\dot{m}_{ACS}\, s^{e}_{ACS} + \dot{m}\, s_2 + \dot{S}_{gen} = \dot{m}_{ACS}\, s^{s}_{ACS} + \dot{m}\, s_3$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_{ACS}\left(s^{s}_{ACS} - s^{e}_{ACS} \right) + \dot{m}\left(s_3 - s_2 \right) =$$

$$= \frac{\dot{Q}}{h^{s}_{ACS} - h^{e}_{ACS}} \left[s^{s}_{ACS} - s^{e}_{ACS} \right] + \dot{m}\left(s_3 - s_2 \right) =$$

$$= \frac{\dot{Q}}{\bar{T}_{ACS}} + \frac{\dot{Q}}{-(h_3 - h_2)} \left(s_3 - s_2 \right) =$$

$$= \frac{\dot{Q}}{\bar{T}_{ACS}} - \frac{\dot{Q}}{\bar{T}_{23}}$$