

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 1 (4 puntos)

Una incineradora de residuos sólidos urbanos tiene una potencia en el horno de 135 MW. Para convertir ese calor en electricidad se decide acoplar al horno un ciclo de Rankine regenerativo en el que el vapor entra a la turbina a 60 bar y 450°C. La turbina tendrá 2 extracciones, una a 10 bar para un calentador abierto y otra a 1 bar para uno cerrado. El gasto másico de vapor que circula por la extracción de mayor presión es un 14% del que entra en la turbina. El vapor sale de la turbina con un título del 90% y se dirige al condensador que opera a 0,1 bar, del que el agua de alimentación sale como líquido saturado. El drenaje del calentador cerrado se dirige mediante una válvula hacia la carcasa del condensador. El agua de alimentación sale del calentador abierto como líquido saturado. Se sabe que tanto el agua de alimentación que sale del calentador cerrado como su drenaje están en condiciones de líquido comprimido.

La expansión de la turbina entre su entrada y su salida es una recta en el diagrama de Mollier. La potencia producida por la turbina (desde la entrada hasta la salida) es de 45 MW. Las bombas se consideran con rendimiento unidad y se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos.

Se pide:

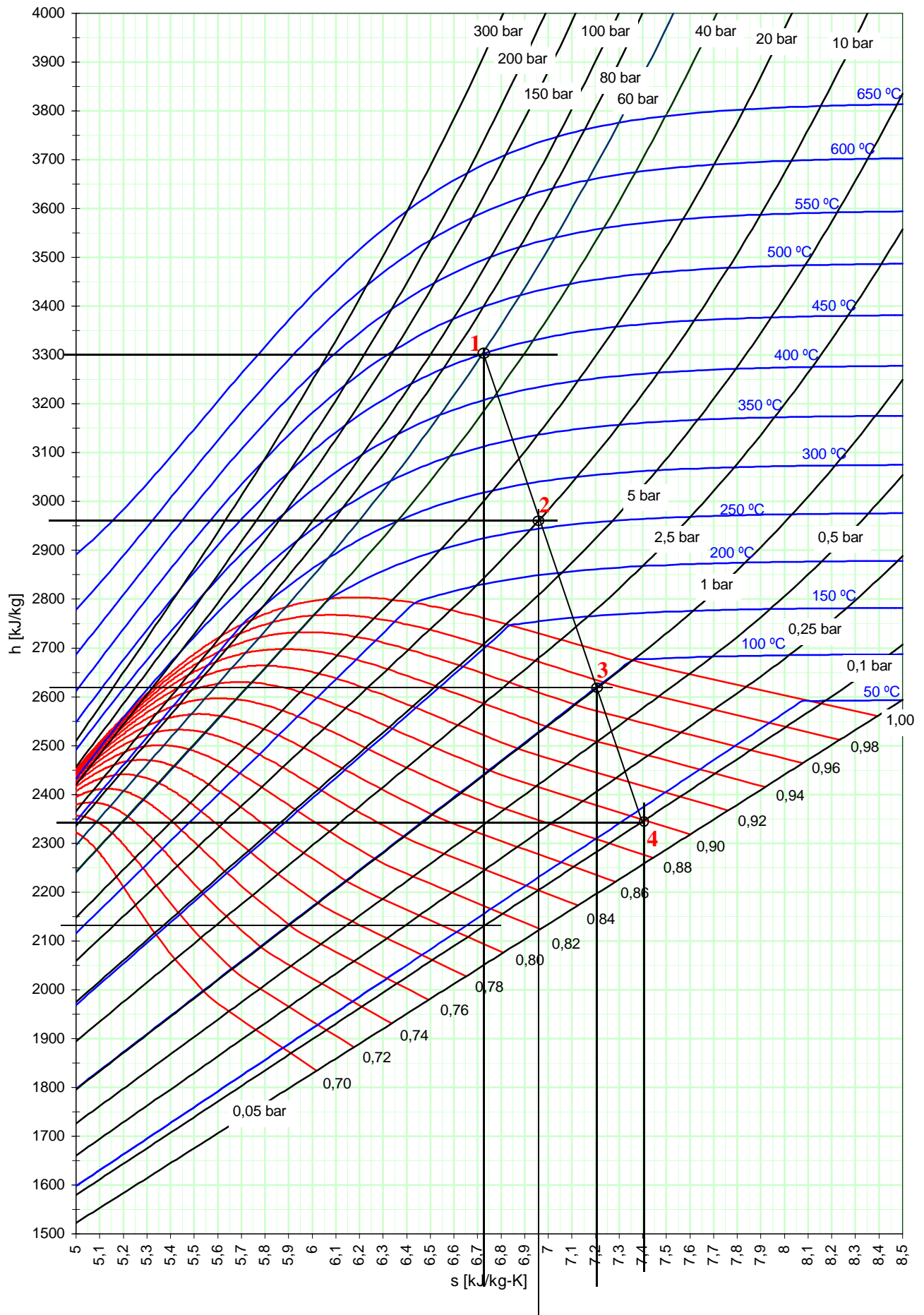
- Realizar un esquema de la planta con la indicación de todos los puntos representativos
- Rendimiento isentrópico de la turbina desde la entrada hasta la salida al condensador
- Gasto másico que circula por la extracción del calentador cerrado
- Temperatura del drenaje del calentador cerrado
- Potencia consumida por el conjunto de las bombas
- Exergía destruida en la turbina

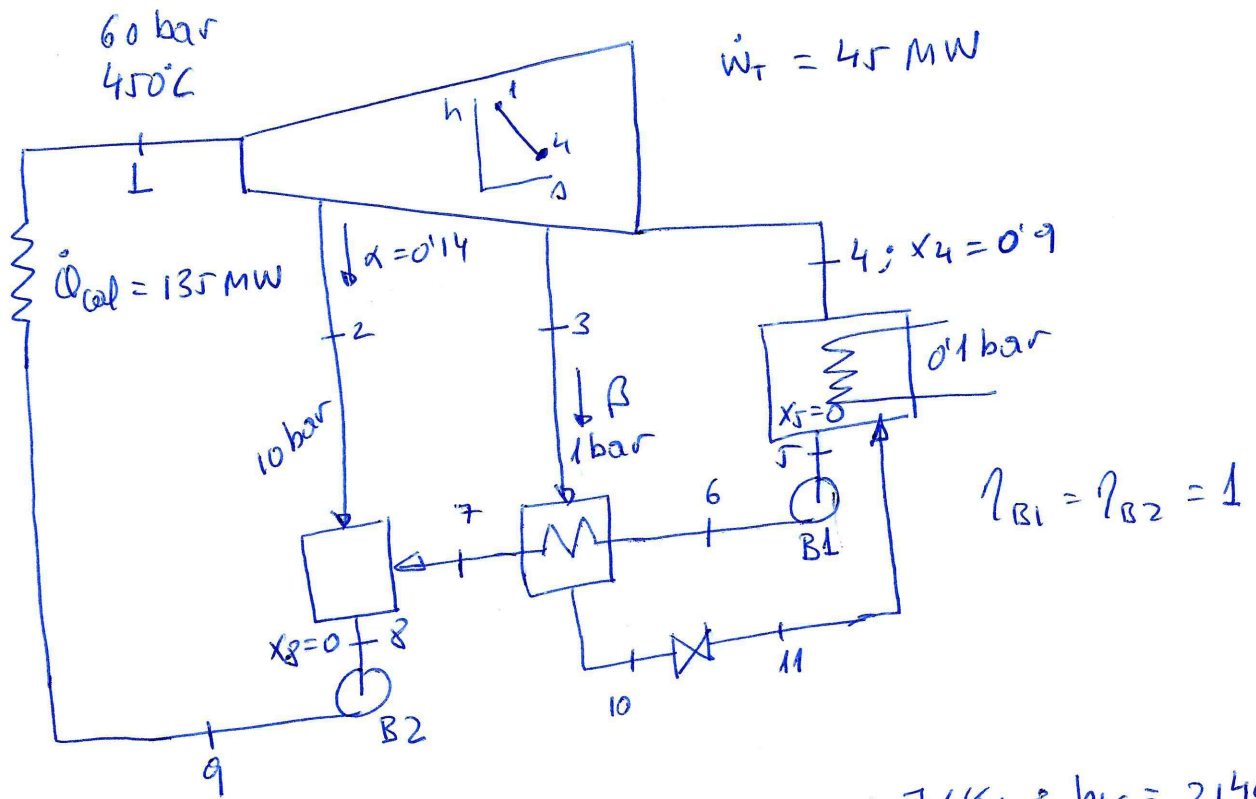
Tómese el estado muerto a 15°C y 100 kPa

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]
0,1	45,81	0,001010	14,670	191,8	2584	0,64919	8,14884
0,2	60,06	0,001017	7,6481	251,4	2609	0,83202	7,90725
0,4	75,86	0,001026	3,9933	317,6	2636	1,02607	7,66905
0,6	85,93	0,001033	2,7320	359,9	2653	1,14545	7,53121
0,8	93,49	0,001039	2,0873	391,7	2665	1,23305	7,43401
1,0	99,61	0,001043	1,6941	417,5	2675	1,30277	7,35893
1,2	104,8	0,001047	1,4285	439,4	2683	1,36094	7,29776
1,4	109,3	0,001051	1,2367	458,4	2690	1,41101	7,24614
1,6	113,3	0,001054	1,0915	475,4	2696	1,45507	7,20149
1,8	116,9	0,001058	0,9776	490,7	2701	1,49448	7,16215
2,0	120,2	0,001061	0,8858	504,7	2706	1,53018	7,12698
10	179,9	0,001127	0,1944	762,5	2777	2,13807	6,58505
60	275,6	0,001319	0,0324	1214	2785	3,02748	5,89017

Diagrama de Mollier del agua





$$h_1 = 3300 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_1 = 6.725 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_2 = 2950 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_2 = 6.95 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_4 = 2350 \text{ kJ/kg}; h_{4s} = 2140 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta_4 = 7.40 \text{ kJ/kg-K}$$

$$h_3 = 2620 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta_3 = 7.2 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\underline{\eta_T} = \frac{3300 - 2350}{3300 - 2140} = \underline{81.9\%}$$

$$h_5 = h_f(0.1 \text{ bar}) = 191.8 \text{ kJ/kg}$$

$$v_5 = 0.001010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_6 = 191.8 + 0.001010(10 - 0.1)1000 = 192.8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 = h_f(10 \text{ bar}) = 762.5 \text{ kJ/kg}$$

$$v_8 = v_f(10 \text{ bar}) = 0.001127 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_9 = 762.5 + 0.001127(60 - 10)1000 = 768.1 \text{ kJ/kg}$$

Balance energético en calentadores:

$$0,14 \times 2950 + (1-0,14) h_7 = 762,5 \rightarrow h_7 = 406,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\beta \cdot 2620 + (1-0,14) \times 192,8 = (1-0,14) \times 406,4 + \beta h_{10} \quad (1)$$

Balance energético en turbina:

$$45000 = \dot{m} (3300 - 0,14 \times 2950 - \beta \times 2620 - (1-0,14-\beta) \times 2350) \quad (2)$$

Balance energético en la caldera:

$$135 \times 10^3 = \dot{m} (3300 - 768,1) \rightarrow \dot{m} = 53'32 \text{ kg/s}$$

entrando en (2): $\beta = 0'08165$

y en (1): $h_{10} = 370'2 \text{ kJ/kg}$

$$370'2 = h_f(T_{10}) \rightarrow \underline{T_{10} = 88'38^\circ\text{C}}$$

$$\underline{\dot{m}_3} = \dot{m} \beta = 53'32 \times 0'08165 = \underline{4,3536 \text{ kg/s}}$$

$$\underline{\dot{W}_B} = 53'32 \times (1-0,14) \times (192,8 - 191,8) + 53'32 \times (768,1 - 762,5) = \underline{346,3 \text{ kW}}$$

$$\dot{m} \Delta_1 + \dot{S}_{gen}^T = \dot{m} \alpha \Delta_2 + \beta \dot{m} \Delta_3 + \dot{m} (1-\alpha-\beta) \Delta_4$$

$$\dot{S}_{gen}^T = 53'32 \left[0,14 \times 6,95 + 0'08165 \times 7'2 + (1-0,14-0,08165) \times 7,40 - 6,725 \right] = 31,7627 \text{ kW/K}$$

$$\underline{\dot{I}_T} = 288 \times 31,7627 = \underline{9147 \text{ kW}}$$

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 2 (3,5 puntos)

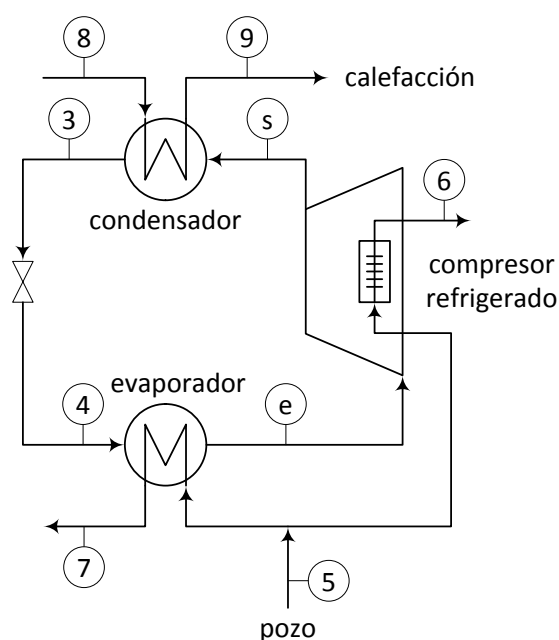
El diagrama de la figura representa una bomba de calor que opera con R290 y emplea como foco frío una corriente de agua que toma de un pozo y cuya finalidad es producir agua caliente para un circuito de calefacción. El condensador cede calor al agua del circuito de calefacción, que llega a 40°C y sale del condensador a 60°C. El agua que se toma del pozo llega a la bomba a 15°C y se divide en dos corrientes: una para ceder calor al evaporador, del que sale a 10°C y otra para refrigerar el compresor, del que sale a 20°C. El R-290 abandona el condensador como líquido saturado a 19 bar y el evaporador como vapor saturado a 5,5 bar. Se desprecian las pérdidas de presión en todos los intercambiadores y conductos. La potencia cedida por el condensador al agua de calefacción es de 20 kW.

El compresor está refrigerado por un caudal procedente del pozo de 5 dm³/min y tiene un espacio perjudicial del 6%. La pérdida de carga tanto en la válvula de aspiración como en la de impulsión es de 20 kPa. La potencia de accionamiento (absorbida) es de 6 kW.

El R-290 se tratará como sustancia pura (tablas al dorso) en toda la instalación, salvo en el compresor, donde se considerará gas perfecto con $R = 188,5 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y $\gamma = 1,25$. Las condiciones de la aspiración del compresor se obtendrán de las tablas de sustancia pura. El agua se tratará como líquido incompresible con $C = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ y $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Tómese el estado muerto a 5°C y 100 kPa.

Se pide:

- Temperatura de impulsión del compresor
- Exergía destruida en el evaporador
- COP que alcanzaría una bomba totalmente reversible operando entre los mismos focos (se mantienen constantes las temperaturas de los 3 circuitos de agua) en la que la potencia absorbida por el compresor coincidiese con el calor retirado del mismo.
- Cilindrada que ha de tener el compresor si gira a 1450 rpm



Tablas del R-290 saturado (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]
3	-14,18	0,001827	0,1496	165,1	558,7	0,86987	2,38975
3,5	-9,593	0,001847	0,1292	176,2	563,9	0,91217	2,38322
4	-5,476	0,001865	0,1138	186,3	568,6	0,94996	2,37793
4,5	-1,728	0,001883	0,1016	195,7	572,7	0,98422	2,37355
5	1,721	0,001900	0,0918	204,3	576,6	1,01566	2,36983
5,5	4,923	0,001916	0,0836	212,5	580,1	1,04476	2,36664
6	7,916	0,001932	0,0768	220,2	583,3	1,07190	2,36385
6,5	10,73	0,001947	0,0710	227,5	586,3	1,09737	2,36138
7	13,39	0,001962	0,0660	234,4	589,1	1,12140	2,35918
7,5	15,91	0,001976	0,0616	241,1	591,7	1,14417	2,35718
8	18,31	0,001990	0,0578	247,4	594,1	1,16584	2,35536
8,5	20,6	0,002004	0,0544	253,6	596,5	1,18652	2,35369
9	22,8	0,002018	0,0513	259,5	598,6	1,20631	2,35213
9,5	24,91	0,002032	0,0486	265,3	600,7	1,22532	2,35066
10	26,94	0,002045	0,0461	270,9	602,6	1,24360	2,34928
10,5	28,89	0,002058	0,0438	276,3	604,5	1,26123	2,34796
11	30,78	0,002071	0,0418	281,5	606,3	1,27826	2,34670
11,5	32,61	0,002084	0,0399	286,7	607,9	1,29475	2,34548
12	34,38	0,002097	0,0381	291,7	609,5	1,31073	2,34429
12,5	36,09	0,002110	0,0365	296,5	611,0	1,32624	2,34313
13	37,76	0,002123	0,0350	301,3	612,4	1,34132	2,34200
13,5	39,38	0,002136	0,0336	306,0	613,8	1,35600	2,34087
14	40,96	0,002149	0,0323	310,6	615,1	1,37031	2,33976
14,5	42,49	0,002162	0,0311	315,1	616,3	1,38426	2,33864
15	43,99	0,002174	0,0300	319,5	617,5	1,39789	2,33753
15,5	45,45	0,002187	0,0289	323,9	618,6	1,41122	2,33641
16	46,88	0,002200	0,0279	328,1	619,7	1,42426	2,33529
16,5	48,28	0,002213	0,0270	332,3	620,7	1,43702	2,33415
17	49,64	0,002226	0,0261	336,5	621,7	1,44954	2,33300
17,5	50,98	0,002239	0,0252	340,6	622,6	1,46182	2,33183
18	52,28	0,002252	0,0244	344,6	623,4	1,47387	2,33064
18,5	53,56	0,002265	0,0237	348,6	624,2	1,48571	2,32943
19	54,82	0,002279	0,0230	352,5	625,0	1,49735	2,32819
19,5	56,05	0,002292	0,0223	356,4	625,7	1,50880	2,32693
20	57,26	0,002305	0,0216	360,2	626,4	1,52007	2,32563

Formulario:

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

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

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

Compresor

$$\dot{W}_a = 6 \text{ kW} \quad ; \quad \dot{m}_{wcp} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} =$$
$$= 0.0833 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_{cp} = 0.0833 \times 4.18 (20 - 15) = 1.7417 \text{ kW}$$

Balance energético al condensador + compresor:

$$\dot{m}_r h_e + \dot{W}_a = \dot{Q}_{cp} + \dot{Q}_{con} + \dot{m}_r h_3$$

$$h_e = h_g (5.5 \text{ bar}) = 580.1 \text{ kJ/kg} \quad ; \quad T_e = 4.923^\circ\text{C}$$

$$h_3 = h_f (19 \text{ bar}) = 352.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_r = \frac{1.7417 + 20 - 6}{580.1 - 352.5} = 0.069164 \text{ kg/s}$$

Balance energético al compresor:

$$\dot{m}_r h_e + \dot{W}_a = \dot{m}_r h_s + \dot{Q}_{cp}$$

$$\frac{6 - 1.7417}{0.069164 \times 0.9425} = T_s - 4.923^\circ\text{C}$$

$$\downarrow$$
$$\underline{\underline{T_s = 70.2473^\circ\text{C}}}$$

$$R = c_p - c_v = c_p \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)$$

$$c_p = 0.9425 \text{ kJ/kg-K}$$

Evaporador

$$h_4 = h_3 = 352,5 \text{ kJ/kg} = 212,5 + x_4(580,1 - 212,5)$$

$$x_4 = 0,38085$$

$$h_4 = 1,04476 + 0,38085(2,36664 - 1,04476) = 1,548196 \text{ kJ/kg-h}$$

$$h_e = 2,36664 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_r (h_e - h_4) = 0,069164 (-352,5 + 580,1) =$$

$$= 15,7417 \text{ kW} = \dot{m}_{we} \times 4,18(15 - 10) \rightarrow$$

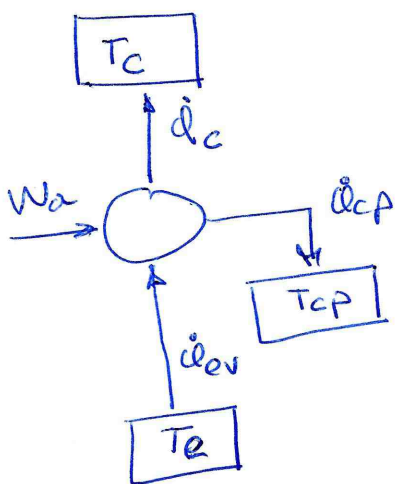
$$15,7417 + 6 = 1,7417 + 20 \checkmark \quad \dot{m}_{we} = 0,7532 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_r h_4 + \dot{m}_{we} h_7 + \dot{S}_{gen}^{ev} = \dot{m}_r h_e + \dot{m}_{we} h_7$$

$$\underline{\underline{\dot{I}_{ev}}} = 278 \times [0,069164(2,36664 - 1,548196) +$$

$$+ 0,7532 \times 4,18 \ln\left(\frac{273}{288}\right)] = \underline{\underline{0,408 \text{ kW}}}$$

Operación totalmente reversible



$$\frac{dS_u}{dz} = 0 = \frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \frac{\dot{Q}_{cp}}{T_{cp}} - \frac{\dot{Q}_{ev}}{T_e}$$

$$\dot{W}_a = \dot{Q}_{cp}$$

$$\dot{W}_a + \dot{Q}_{ev} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{cp}$$

$$0 = \frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \frac{\dot{W}_a}{T_{cp}} - \frac{\dot{Q}_c}{T_e}$$

$$0 = \dot{Q}_c \left[\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_e} \right] + \frac{\dot{W}_a}{T_{cp}} ; \quad \dot{Q}_c \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_c} \right] = \frac{\dot{W}_a}{T_{cp}}$$

$$COP_{rev} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_a} = \frac{\left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_c} \right)^{-1}}{T_{cp}} = \frac{\frac{T_e T_c}{T_c - T_e}}{T_{cp}}$$

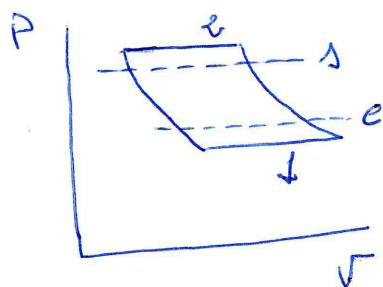
$$T_e = \frac{\phi (T_7 - T_5)}{\phi L \left(\frac{T_7}{T_5} \right)} = \frac{10 - 15}{L \left(\frac{283}{288} \right)} = 285,49 \text{ K}$$

$$T_c = \frac{60 - 40}{L \left(\frac{333}{313} \right)} = 322,897 \text{ K}$$

$$T_{cp} = \frac{20 - 15}{L \left(\frac{293}{288} \right)} = 290,49 \text{ K}$$

$$\underline{COP_{rev}} = \frac{\left(\frac{1}{285,49} - \frac{1}{322,897} \right)^{-1}}{290,49} = \underline{8,48}$$

Compresor como máquina



$$P_1 = 5,5 - 0,2 = 5,3 \text{ bar}$$

$$P_2 = 19 + 0,2 = 19,2 \text{ bar}$$

$$T_1 = T_e ; T_2 = T_s \text{ (válvulas)}$$

$$\frac{70,2473 + 273}{4,923 + 273} = \left(\frac{19,2}{5,3} \right)^{\frac{n-1}{n}} \rightarrow n = 1,1962$$

$$\eta_{vi} = 1 - 0.06 \left[\left(\frac{19.2}{5.3} \right)^{\frac{1}{1.962}} - 1 \right] = 0.88401 =$$

$$= \frac{\dot{m}_r v_1}{V_D \cdot \frac{N}{60}} = \frac{0.069164 \times 0.098846}{V_D \times \frac{1450}{60}} \rightarrow \boxed{V_D = 320.01 \text{ cm}^3}$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0.1885 \times (4.923 + 273)}{530} = 0.09885 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Nótese que al ser $P_1 < P_e$ y mantenerse la temperatura el punto 1 es vapor sobrecalentado, del que no hay tablas y ya está dentro del compresor. Se ahí que se tomen propiedades de gas perfecto.

TERMODINÁMICA

Nombre _____ Grupo _____

Problema – 3 (2,5 puntos)

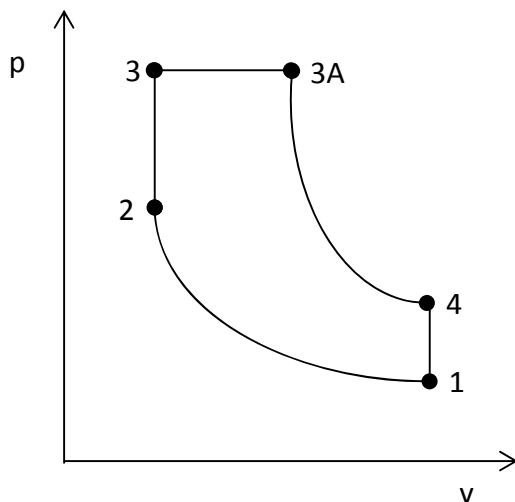
Un motor de encendido provocado tiene una relación de compresión de 9,5 y cuatro cilindros de 89,2 mm de diámetro y 60 mm de carrera. En un punto de trabajo produce una presión media efectiva de 8 bar y presenta una velocidad lineal media de pistón de 12 m/s operando con dosado relativo de 1. En esas condiciones la presión media indicada es el 65% de la del ciclo Otto equivalente, cuyas condiciones en el inicio de la compresión son de 90 kPa y 45°C.

La gasolina tiene un dosado estequiométrico de 1/14,9 y un poder calorífico inferior de 43,7 MJ/kg. El aire se considera gas perfecto con $R = 287 \text{ J/kg-K}$ y $\gamma = 1,4$.

Determinar, para el punto de trabajo dado:

- Potencia efectiva
- Rendimiento mecánico

Formulario:



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

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

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

$$\Gamma = 9.5$$

$$z = 4$$

$$D = 89.2 \text{ mm}$$

$$L = 60 \text{ mm}$$

$$C_m = 12 \text{ m/s}$$

$$p_{me} = 8 \text{ bar}$$

$$Fr = 1$$

$$p_{mi}^M = 0.65 p_{mi}^{cido}$$

$$P_1 = 90 \text{ kPa} ; T_1 = 45^\circ\text{C}$$

$$Fe = 1/14.9$$

$$PCI = 43.7 \text{ MJ/kg}$$

$$R = 287 \text{ J/kg K}$$

$$\gamma = 1.4$$

$$V_T = 4 \frac{\pi \times 0.0892 \times 0.06}{4} = 1499.79 \text{ cm}^3$$

$$C_m = 12 = 2 \times 0.06 \times \frac{N}{60} \rightarrow N = 6000 \text{ rpm}$$

$$\underline{W_e} = 800 \times 1499.79 \times 10^{-6} \times \frac{6000}{2 \times 60} = \underline{59.99 = 60 \text{ kW}}$$

$$q_{23A} = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \gamma^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} (\alpha - 1) = \frac{PCI}{1 + \frac{1}{Fe}}$$

$$\text{cido Otto} \Leftrightarrow \beta = 1$$

$$\frac{43700}{1 + 14.9} = \frac{0.287 \times 318 \times 9.5^{0.4} (\alpha - 1)}{1.4 - 1} \rightarrow \alpha = 5.8949$$

$$p_{mi}^{cido} = 90 \times \frac{9.5}{8.5} \times \frac{9.5^{0.4} (1 - 5.8949) + 5.8949 - 1}{1 - 1.4} =$$

$$= 1798.22 \text{ kPa} ; p_{mi}^{mot} = 1798.22 \times 0.65 = 1168.86 \text{ kPa}$$

$$\underline{\eta_m} = \frac{W_e}{W_i} = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \frac{800}{1168.86} = \underline{68.44\%}$$