

## 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.**

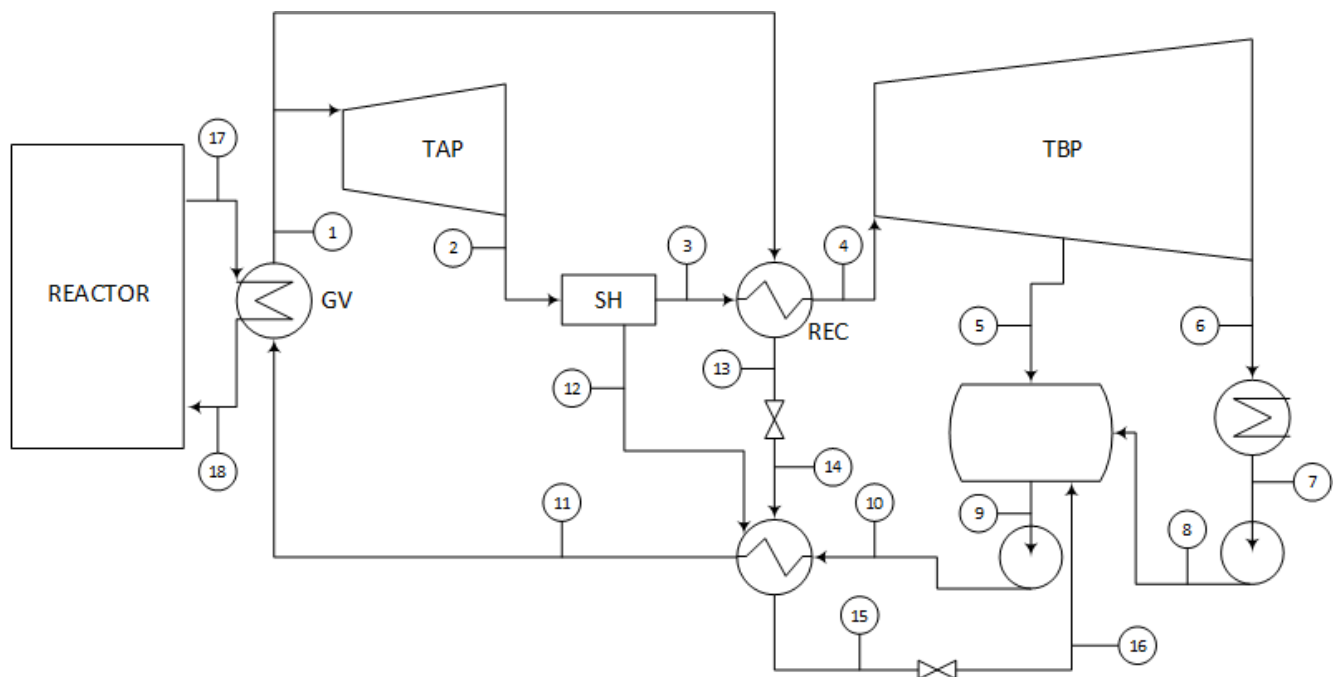
La instalación de la figura representa el ciclo de potencia de una central nuclear PWR. Las condiciones de salida del vapor (1) del generador de vapor (GV) son 60 bar y vapor saturado. El vapor sale de la turbina de alta presión (TAP) a 20 bar. Dicha turbina opera de forma adiabática con un rendimiento isentrópico del 90%.

El separador de humedad (SH) es un dispositivo que de forma adiabática y sin trabajo separa el flujo entrante de vapor húmedo en una corriente de vapor saturado (3) y otra de líquido saturado (12). El drenaje (13) del recalentador (REC) tiene un título del 70% y el vapor sale del mismo (4) a 270°C.

La presión de la extracción de la turbina de baja presión (5) es de 2,5 bar y la de salida de esta turbina de 0,1 bar. Dicha turbina es también adiabática, con un rendimiento isentrópico del 85% definido entre la entrada (4) y la salida (6). La línea de expansión de esta turbina en el diagrama de Mollier es una recta.

El agua sale del condensador (7) como líquido saturado, al igual que del calentador abierto (9). El agua de alimentación a la caldera sale del calentador cerrado (11) a 200°C. Los rendimientos isentrópicos de las bombas son del 100%. Se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos.

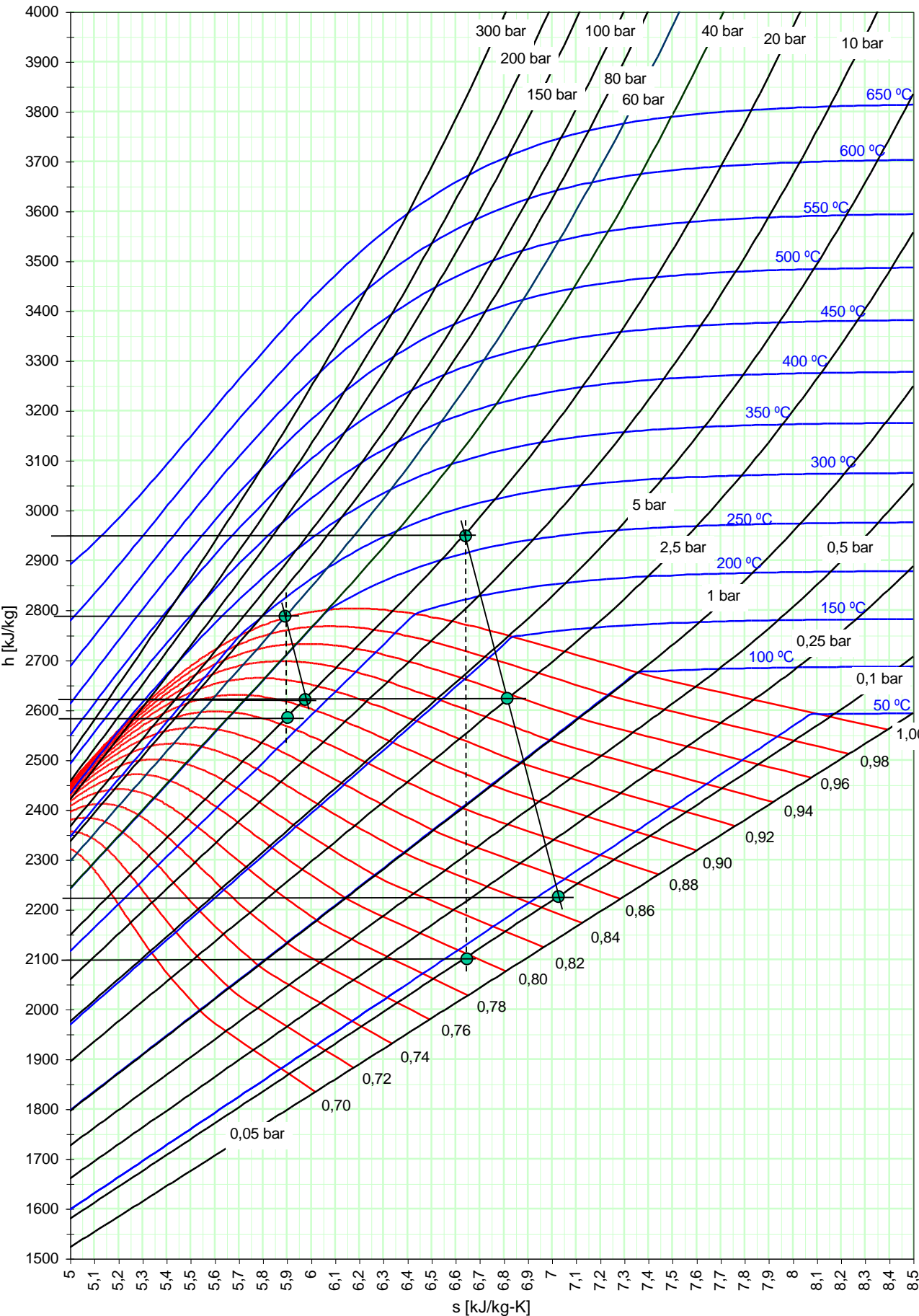
Hallar el rendimiento del ciclo.

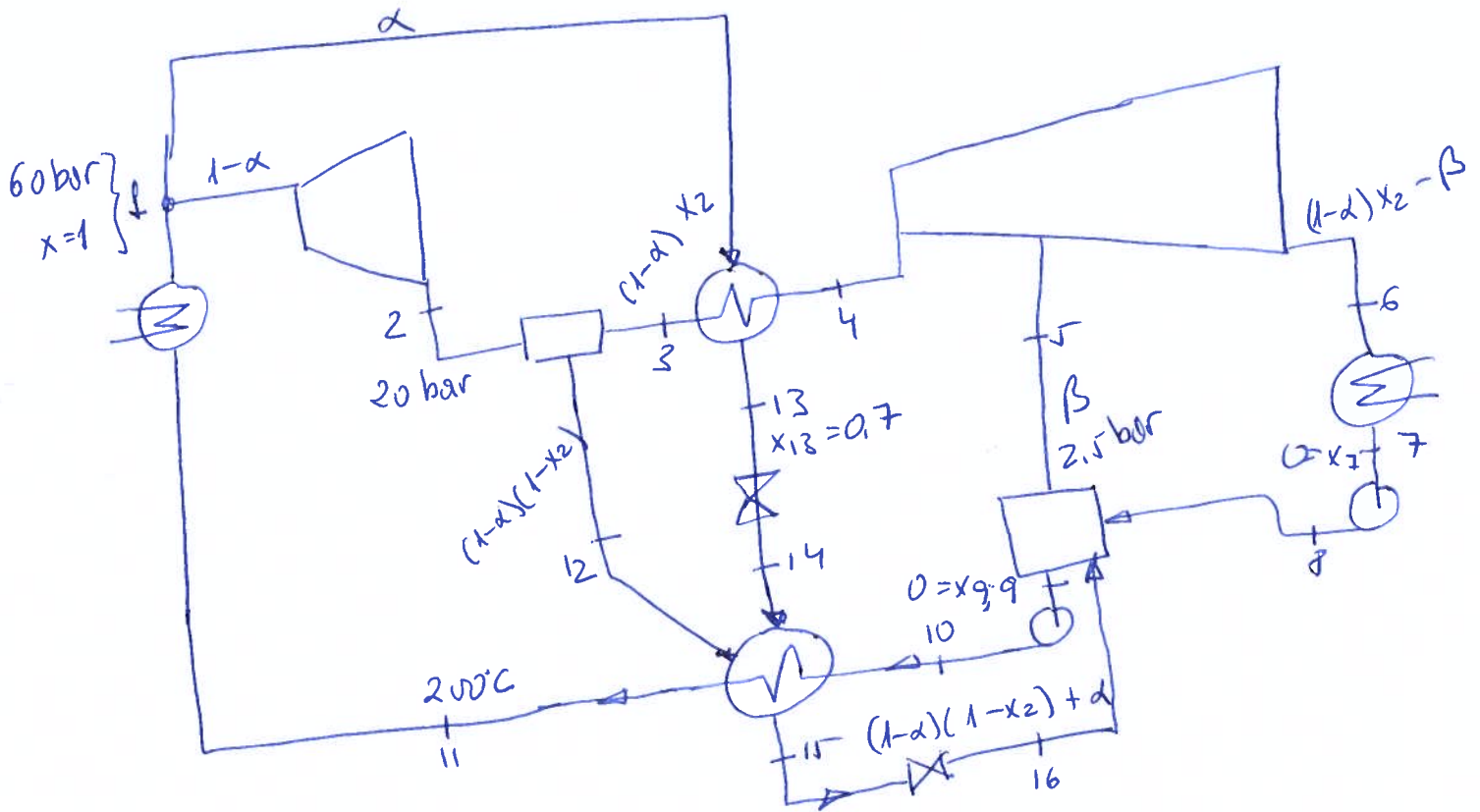


**Tablas del agua saturada (líquido – vapor)**

p [bar]	T [°C]	v <sub>f</sub> [m³/kg]	v <sub>g</sub> [m³/kg]	h <sub>f</sub> [kJ/kg]	h <sub>g</sub> [kJ/kg]	s <sub>f</sub> [kJ/kg-K]	s <sub>g</sub> [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
0,15	53,97	0,00101405	10,02	225,94	2598,3	0,754859	8,00708
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
0,3	69,09	0,00102224	5,229	289,27	2624,6	0,944067	7,76749
0,5	81,32	0,00102993	3,240	340,54	2645,2	1,09120	7,59304
1	99,61	0,00104316	1,694	417,51	2675,0	1,30276	7,35891
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
10	179,88	0,00112723	0,1944	762,51	2777,1	2,13806	6,58502
15	198,29	0,00115385	0,1317	844,54	2791,0	2,31431	6,44299
20	212,38	0,00117672	0,09959	908,47	2798,3	2,44670	6,33902
25	223,95	0,00119738	0,07995	961,86	2801,9	2,55417	6,25579
30	233,85	0,00121661	0,06667	1008,28	2803,2	2,64543	6,18561
35	242,56	0,00123486	0,05706	1049,71	2802,7	2,72525	6,12436
40	250,35	0,00125241	0,04978	1087,39	2800,8	2,79657	6,06961
45	257,44	0,00126947	0,04406	1122,13	2798,0	2,86128	6,01975
50	263,94	0,00128618	0,03945	1154,50	2794,2	2,92073	5,97370
55	269,96	0,00130266	0,03564	1184,93	2789,7	2,97588	5,93070
60	275,59	0,00131900	0,03245	1213,75	2784,6	3,02747	5,89015
65	280,86	0,00133527	0,02973	1241,19	2778,9	3,07604	5,85161
70	285,83	0,00135154	0,02738	1267,46	2772,6	3,12204	5,81475
75	290,54	0,00136786	0,02533	1292,72	2765,9	3,16582	5,77927
80	295,01	0,00138430	0,02352	1317,09	2758,7	3,20769	5,74496
85	299,27	0,00140091	0,02192	1340,71	2751,0	3,24787	5,71161
90	303,35	0,00141772	0,02049	1363,65	2742,9	3,28658	5,67908
95	307,25	0,00143480	0,01920	1386,00	2734,4	3,32400	5,64720
100	311,00	0,00145219	0,01803	1407,84	2725,4	3,36027	5,61587
105	314,60	0,00146994	0,01696	1429,23	2716,1	3,39553	5,58498
110	318,08	0,00148812	0,01599	1450,24	2706,3	3,42991	5,55441
115	321,43	0,00150677	0,01509	1470,90	2696,1	3,46350	5,52408
120	324,68	0,00152596	0,01426	1491,29	2685,4	3,49643	5,49389
125	327,81	0,00154577	0,01350	1511,44	2674,3	3,52876	5,46376
130	330,85	0,00156627	0,01278	1531,40	2662,7	3,56060	5,43359

Diagrama de Mollier del agua





$$h_1 = 2800 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 2600 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 2798.3 \text{ kJ/kg} = h_g(20 \text{ bar})$$

$$h_{12} = 908.47 \text{ kJ/kg} = h_f(20 \text{ bar})$$

$$h_4 = 2950 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{6s} = 2100 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = 2620 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = 191.8 \text{ kJ/kg}$$

$$v_7 = 0.00101028 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_8 = 191.8 + 0.00101028 (2.5 - 0.1) 100 = 192.04 \text{ kJ/kg}$$

$$0.9 = \frac{2800 - h_2}{2800 - 2600} \Rightarrow h_2 = 2620 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$0.85 = \frac{2950 - h_6}{2950 - 2100} \Rightarrow h_6 = 2227.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_9 = 535,35 \text{ kJ/kg}$$

$$v_9 = 0,00106722 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{10} = 535,35 + 0,00106722 (60 - 245) 1000 = 541,49 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{11} = 852,30 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{13} = 1213,75 + 0,7 (2784,6 - 1213,75) = 2313,35 \text{ kJ/kg} = h_{14}$$

Balance en el recalentador

$$\alpha h_1 + (1-\alpha) x_2 h_3 = (1-\alpha) x_2 h_4 + \alpha h_{13}$$

$$2620 = 908,47 + x_2 (2798,3 - 908,47) \Rightarrow x_2 = 0,9057$$

$$\alpha (h_1 - x_2 h_3 + x_2 h_4 - h_{13}) = x_2 (h_4 - h_3)$$

$$\hookrightarrow \alpha = 0,2202$$

Balance calentador cerrado

$$\alpha h_{14} + (1-\alpha)(1-x_2) h_{12} + h_{10} = h_{11} + [(1-\alpha)(1-x_2) + \alpha] h_{15}$$

$$\hookrightarrow h_{15} = h_{16} = 903,52 \text{ kJ/kg}$$

Balance calentador abierto

$$\beta h_5 + [(1-\alpha)x_2 - \beta] h_8 + [(1-\alpha)(1-x_2) + \alpha] h_{16} = h_9$$

$$\hookrightarrow \beta = 0,0553$$

$$w_{TAP} = (1-\alpha)(h_1 - h_2) = 140,364 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} w_{TBP} &= (1-\alpha)x_2 h_4 - \beta h_5 - [(1-\alpha)x_2 - \beta] h_6 = \\ &= 488,57 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w_{BCW} = [(1-\alpha)x_2 - \beta](h_8 - h_7) = 0,1562 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{BAC} = h_{10} - h_9 = 541,49 - 535,35 = 6,14 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{neto} = 622,64 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{av} = h_1 - h_{11} = 2800 - 852,3 = 1947,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\underline{\eta_{adv}} = \frac{622,64}{1947,7} = \underline{\underline{31,97\%}}$$

## 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.**

Un motor de gasoil de cuatro tiempos, con una relación de compresión de 19, presenta una presión media de pérdidas mecánicas que se puede estimar con la siguiente fórmula:

$$P_{mpm}[kPa] = 75 + 48 \cdot n[\text{rpm}]/1000 + 4,053 \cdot (n[\text{rpm}]/1000)^2$$

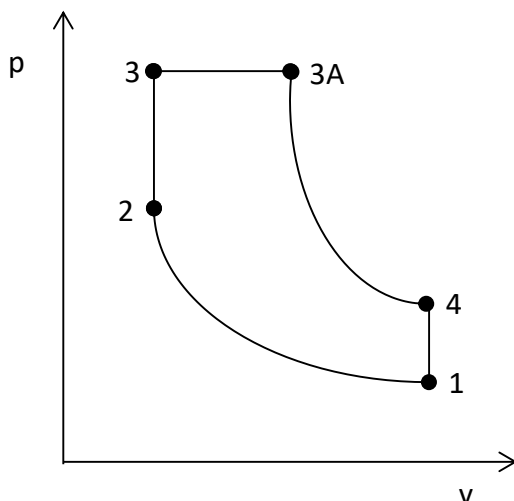
En un punto de trabajo el régimen es de 2600 rpm, la potencia efectiva de 22,4 kW, la presión media efectiva de 550 kPa y el consumo específico efectivo de 250 g/kWh. En esas condiciones el motor trabaja con un dosado relativo de 0,4, siendo las condiciones del cilindro al comienzo de la carrera de compresión de 180 kPa y 69°C. Así mismo, el grado de combustión a presión constante ( $\beta$ ) del ciclo dual equivalente realizado con aire ( $\gamma = 1,4$ ;  $R = 287 \text{ J/kg-K}$ ) tiene un valor de 1,2.

El dosado estequiométrico del combustible es 1/14,94 y su poder calorífico de 45,53 MJ/kg.

Se pide:

- Cilindrada del motor
- Presión máxima en el cilindro
- Relación entre las presiones medias indicadas del motor y ciclo equivalente en el punto estudiado
- Rendimiento volumétrico en dicho punto, referido a unas condiciones de aire de 0,95 bar y 20°C. Interpretar el valor obtenido.

Formulario:



$$\alpha = \frac{P_3}{P_2} \quad \beta = \frac{V_{3A}}{V_3}$$

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

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

P2

4T

$r = 19$

$$P_{\text{мощн [кВт]}} = 75 + 48 \times \frac{N}{1000} + 4,053 \left( \frac{N}{1000} \right)^2$$

$N = 2600 \text{ rpm}$

$F_r = 0,4$

$\beta = 1,2$

$\dot{W}_e = 22,4 \text{ kW}$

$p_{\text{мел}} = 550 \text{ kPa}$

①  $\left. \begin{array}{l} 180 \text{ kPa} \\ 69^\circ \text{C} \end{array} \right\}$

$q_e = 250 \text{ g/kWh}$

$$\dot{W}_e = p_{\text{мел}} \times \sqrt{V_T} \times \frac{N}{60} \times \frac{1}{2}$$

$$22,4 = 550 \times \sqrt{V_T} \times \frac{2600}{60} \times \frac{1}{2} \rightarrow \boxed{V_T = 1879,72 \text{ cm}^3}$$

$$q_{23A} = \frac{45530}{1 + \frac{1}{0,026774}} = 1187,22 \text{ kJ/kg}$$

$$F = F_r \times F_e = \frac{0,4}{14,94} = 0,026774$$

$$q_{23A} = \frac{0,287 \times 342 \times 19^{0,4}}{0,4} \left[ \underbrace{\alpha - 1 + \alpha \cdot 1,4 \times 0,2}_{1,28\alpha - 1} \right]$$

$$\hookrightarrow \alpha = 1,9453 = \frac{P_3}{P_2}$$

$$P_2 \alpha_2^r = P_1 \alpha_1^r$$

$$P_2 = 180 \times 19^{1,4} = 11105,23 \text{ kPa}$$

$$\boxed{P_3 = \alpha P_2 = 216,03 \text{ bar}}$$



$$P_{mpm} = 75 + 48 \times \frac{2600}{1000} + 4,053 \left( \frac{2600}{1000} \right)^2 = 227,198 \text{ kPa}$$

$$P_{mi}^{motor} = 550 + 227,198 = 777,1982 \text{ kPa}$$

$$P_{mi}^{ado} = 180 \left( \frac{19}{18} \right) \frac{19^{1,4} \{ 1 - 1,9453 [ 1 + 1,4 \cdot 0,2 ] \} + 1,9453 \cdot 1,2^{1,4}}{-0,4} =$$

$$= 1580,433 \text{ kPa}$$

$$\boxed{P_{mi}^{motor} / P_{mi}^{ado} = 0,4918}$$

$$P_{ref} = \frac{95}{0,287 \times 293} = 1,1297 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{0,25 \text{ kg} \cdot 1 \cancel{\text{h}} \times 22,4 \cancel{\text{kg}}}{\cancel{\text{kg}} \cancel{\text{h}} 3600 \text{ s}} = \dot{m}_f = 0,0015556 \text{ kg/s}$$

$$F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} ; \dot{m}_a = \frac{0,0015556}{0,026774} = 0,0581 \text{ kg/s}$$

$$\boxed{\eta_v = \frac{0,0581}{1,1297 \times 1879,72 \cdot 10^{-6} \times \frac{2600}{60} \times \frac{1}{2}} = 1,2628 \text{ p.u.}}$$

Se trata de un motor sobrealimentado, lo que es fácil de intuir al ser la presión al inicio de la cámara de combustión de 180 kPa ( $> 95 \text{ kPa}$ ). Para haber obtenido un  $\eta_v$  más representativo habría que haber usado como referencia  $P_1 = P_0$  en ese caso se obtendría  $\eta_v = 77,8\%$ .

## 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.**

En el ciclo Brayton Siemens SGT-8000H el aire ( $R = 287 \text{ J/kg-K}$ ) entra al compresor a  $17^\circ\text{C}$  y 1 bar (condiciones ambiente; estado muerto) y a la turbina a  $1430^\circ\text{C}$ , saliendo de la misma a  $627^\circ\text{C}$ . El gasto másico de aire es de  $935 \text{ kg/s}$ . El calor aportado en la cámara de combustión es de  $1052 \text{ MW}$  y se puede modelar como procedente de un foco a  $1500^\circ\text{C}$ . Determinar:

- Rendimiento del ciclo
- Eficiencia exergética del ciclo.

Se quiere convertir el ciclo Brayton anterior en uno combinado. Para ello se le acopla una caldera de recuperación de la que los gases salen a  $117^\circ\text{C}$  sin perder presión. La eficiencia exergética del ciclo de vapor es del 70%. El condensador disipa calor al ambiente (foco térmico a  $17^\circ\text{C}$ ). Determinar:

- Trabajo que produciría el ciclo de vapor.
- Máximo trabajo teórico que podría producir ciclo de vapor.

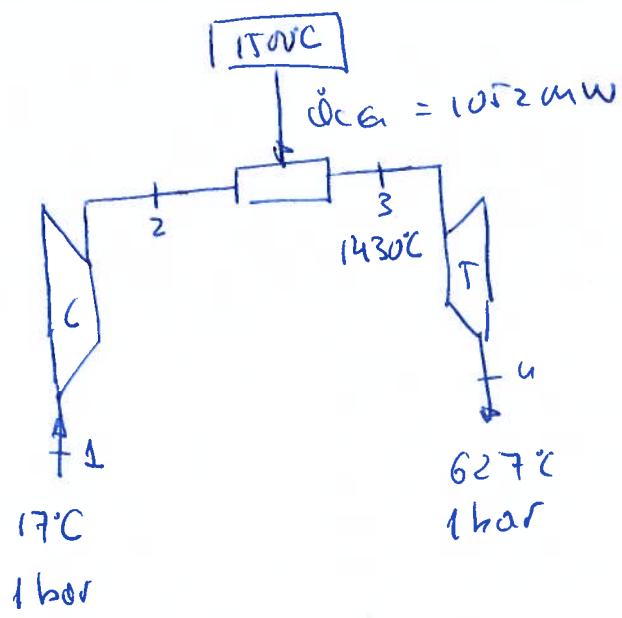
Assumiendo que el gasto másico de aire, las condiciones de entrada al compresor, el calor aportado en la cámara de combustión y la temperatura de salida de los gases de la caldera de recuperación se mantienen, determinar:

- Máximo trabajo que podría producir el ciclo combinado.
- Rendimiento máximo que tendría el ciclo combinado en la condiciones descritas.

### Tablas del aire como gas ideal

T [K]	h [kJ/kg]	$s^0$ [kJ/kg-K]	$p_r$ [-]
280	6,876	0,0248625	1,0905
285	11,90	0,0426330	1,1601
290	16,92	0,0600980	1,2329
295	21,94	0,0772680	1,3089
300	26,96	0,0941533	1,3882
380	107,6	0,332337	3,1831
385	112,6	0,345538	3,3329
390	117,7	0,358575	3,4877
395	122,7	0,371452	3,6478
400	127,8	0,384174	3,8131

T [K]	h [kJ/kg]	$s^0$ [kJ/kg-K]	$p_r$ [-]
890	648,6	1,22794	72,102
895	654,2	1,23421	73,694
900	659,8	1,24045	75,313
905	665,4	1,24666	76,961
910	671,0	1,25284	78,636
915	676,6	1,25900	80,341
1690	1595	1,98187	996,98
1695	1601	1,98550	1009,7
1700	1607	1,98912	1022,5
1705	1613	1,99273	1035,4



$$a) \dot{m} a h_1 + \dot{Q}_{C4} = \dot{W}_{C4} + \dot{m} a h_4$$

$$\dot{W}_{C4} = \dot{Q}_{C4} - \dot{m} a (h_4 - h_1) = 1052 - 935 \frac{659,8 - 165,9}{1000} =$$

$$= 450,9072 \text{ MW}$$

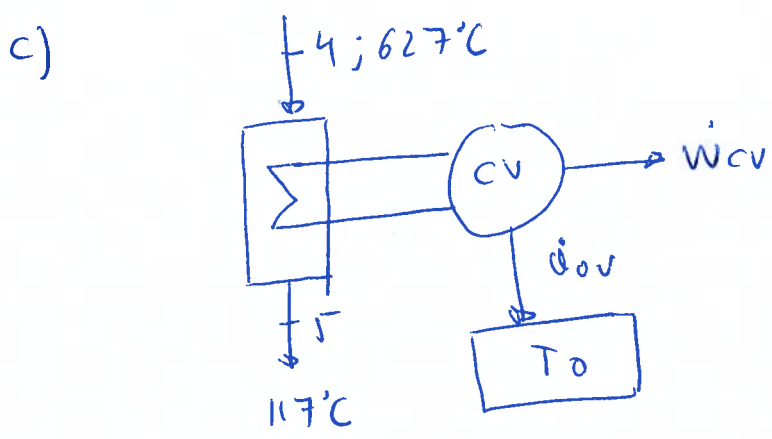
$$\underline{\underline{\eta_{C4} = \frac{450,9072}{1052} = 42,86\%}}$$

$$b) \dot{I}_{C4} = 290 \left[ -\dot{m} a \Delta_1 - \frac{\dot{Q}_{C4}}{1773} + \dot{m} a \Delta_4 \right] =$$

$$= 290 \left[ 935 (1,24045 - 0,060098) - \frac{1052 \times 10^3}{1773} \right] =$$

$$= 147,982,51 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\varphi_{C4} = \frac{450,9072}{450,9072 + 147,983} = 75,29\%}}$$



$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_a (h_4 - h_5) = 935 (659,8 - 117,7) = 506\,863,5 \text{ kW}$$

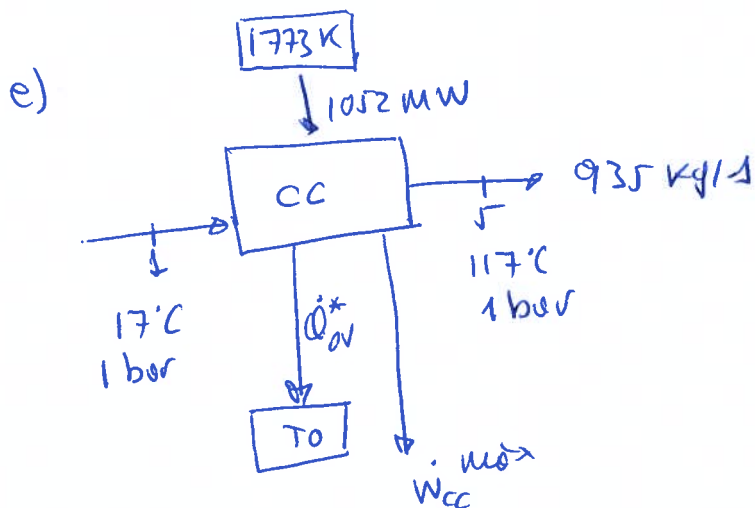
$$\eta_{cv}^{max} = 1 - \frac{290}{614,713} = 0,5282 \text{ p.u.}$$

$$\bar{T}_{45} = \frac{659,8 - 117,7}{1,24045 - 0,358575} = 614,713 \text{ K}$$

$$0,7 = \frac{\eta_{cv}}{\eta_{cv}^{max}} \rightarrow \eta_{cv} = 0,3698 \text{ p.u.}$$

$$\dot{W}_{cv} = 0,3698 \times 506\,863,5 = \underline{\underline{187\,420,67 \text{ kW}}}$$

$$d) \quad \dot{W}_{cv}^{max} = 0,5282 \times 506\,863,5 = \underline{\underline{267\,725,3 \text{ kW}}}$$



$$\frac{dS_u}{dz} = 0 = -\dot{m}_i \Delta_1 + \dot{m}_i \Delta_5 - \frac{\dot{Q}_{cv}}{1773} + \frac{\dot{Q}_{cv}^*}{290}$$

$$\dot{Q}_{ov}^* = 290 \left[ 935(0.060098 - 0.358575) + \frac{1052 \cdot 10^3}{1773} \right] =$$

$$= 91137,8994 \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\dot{W}_{cc}^{max}}} = 935(18,92 - 117,7) + 1052 \cdot 10^3 - 91137,8994 =$$

$$= \underline{\underline{866632,8 \text{ kW}}}$$

A ste resultado también se podría haber llegado:

$$a) \dot{W}_{cc}^{max} = \dot{Q}_{cc} - \dot{m}_a(h_4 - h_1) + T_0 \left[ \dot{m}_a(\lambda_4 - \lambda_1) - \right.$$

$$\left. - \frac{\dot{Q}_{cc}}{T_F} \right] = \dot{Q}_{cc} \left( 1 - \frac{T_0}{T_F} \right) - \dot{m}_a(\psi_4 - \psi_1)$$

$$\dot{W}_{cv}^{max} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_{4r}} \right) \dot{m}_a(h_4 - h_r) =$$

$$= \dot{m}_a(h_4 - h_r) - T_0 \dot{m}_a(\lambda_4 - \lambda_r) = \dot{m}_a(\psi_4 - \psi_r)$$

$$\text{Por tanto: } \dot{W}_{cc}^{max} + \dot{W}_{cv}^{max} = \underline{\underline{\dot{Q}_{cc} \left( 1 - \frac{T_0}{T_F} \right) + \dot{m}_a(\psi_1 - \psi_r)}}$$

La ecuación anterior no es más que el balance de exergía aplicado al VC del apartado e).

Se puede comprobar que:

$$\dot{Q}_{ov}^* = T_0 \left[ \dot{m}_a(\lambda_1 - \lambda_r) + \frac{\dot{Q}_{cc}}{T_F} \right]$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{Q}_{cc} = T_0 \left[ \dot{m}_a(\lambda_1 - \lambda_r) + \frac{\dot{Q}_{cc}}{T_F} \right] + \dot{W}_{cc}^{max} + \dot{m}_a h_r$$

$$\hookrightarrow \dot{m}_a(\psi_1 - \psi_r) + \dot{Q}_{cc} \left( 1 - \frac{T_0}{T_F} \right) = \dot{W}_{cc}^{max} \quad \checkmark \checkmark$$

$$f) \quad \underline{\underline{\eta_{cc}^{max}}} = \frac{866,6328}{1052} = \underline{\underline{82,38\%}}$$

El rendimiento real serio de:

$$\eta_{cc}^{real} = \frac{450,9072 + 187,42017}{1052} = \underline{\underline{60,68\%}}$$