

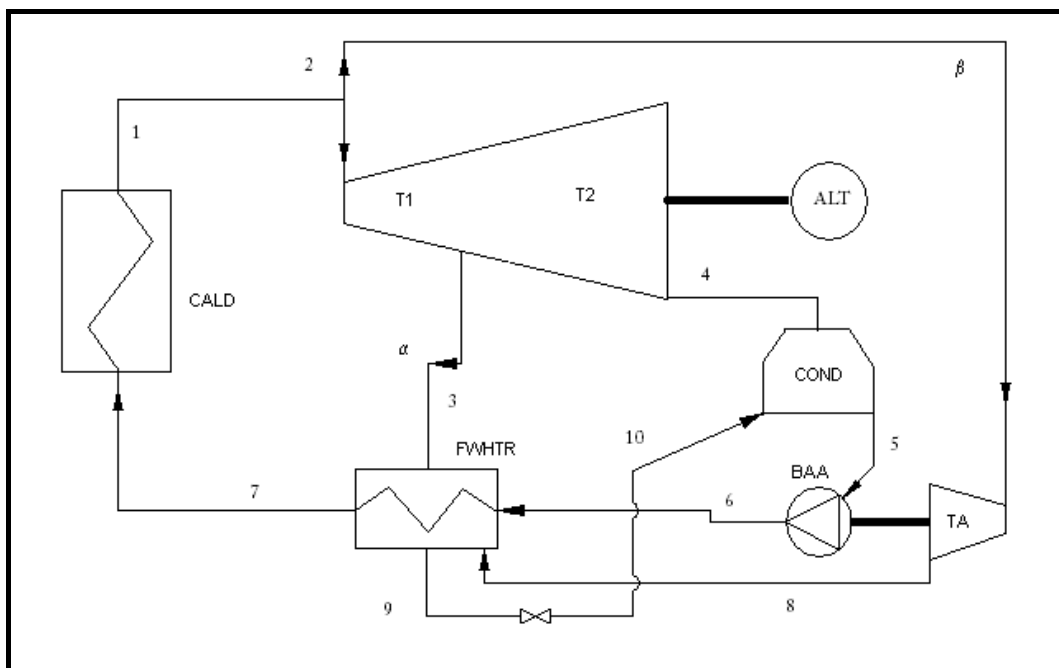
## TERMODINÁMICA

### Problema – 1 (4 puntos)

Nombre \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

El diagrama de la figura muestra la configuración de un ciclo Rankine en el que el vapor sale de la caldera a 80 bara y 3500 kJ/kg y se bifurca hacia la turbina principal y hacia una turbina auxiliar, esta última encargada de mover la bomba de agua de alimentación; es decir, esta turbina auxiliar, con un 75% de rendimiento adiabático-isentrópico, suministra única y exclusivamente la potencia requerida por la bomba (que se supone con rendimiento isentrópico 100%). El vapor se expandiona en esta turbina hasta la presión de operación del calentador de ciclo, cerrado, al cual se dirige. La turbina principal expandiona el vapor hasta el condensador, a una presión de 0,1 bara y tiene una extracción intermedia a 10 bara que se dirige a la carcasa del calentador de agua de alimentación. El agua de alimentación sale del condensador como líquido saturado. Del calentador el agua de alimentación sale a una temperatura 10° C superior a la de saturación correspondiente a la presión de carcasa y el drenaje sale a una temperatura 5° C superior a la de entrada del agua de alimentación al calentador. Las condiciones de la extracción intermedia son de 10 bara y 3000 kJ/kg. El rendimiento global del ciclo es del 37.13 % y el caudal de agua de alimentación es de 100 kg/s. Esta información se ve reflejada en la tabla adjunta, que se pide rellenar, solamente con los valores necesarios, para calcular:

- Caudal de vapor a la turbina auxiliar (TA)
- Caudal de vapor de extracción al calentador (FWHTR)
- Rendimiento adiabático isentrópico de los elementos de la turbina principal T1 y T2
- Calor evacuado en el condensador (COND)
- Calor aportado en la caldera (CALD)
- Potencia neta del ciclo (ALT)



No existen pérdidas de presión en tuberías ni intercambiadores. Debe usarse el diagrama de Mollier para los cálculos que sean necesarios realizar en relación con las turbinas y las tablas adjuntas para el resto de los cálculos.

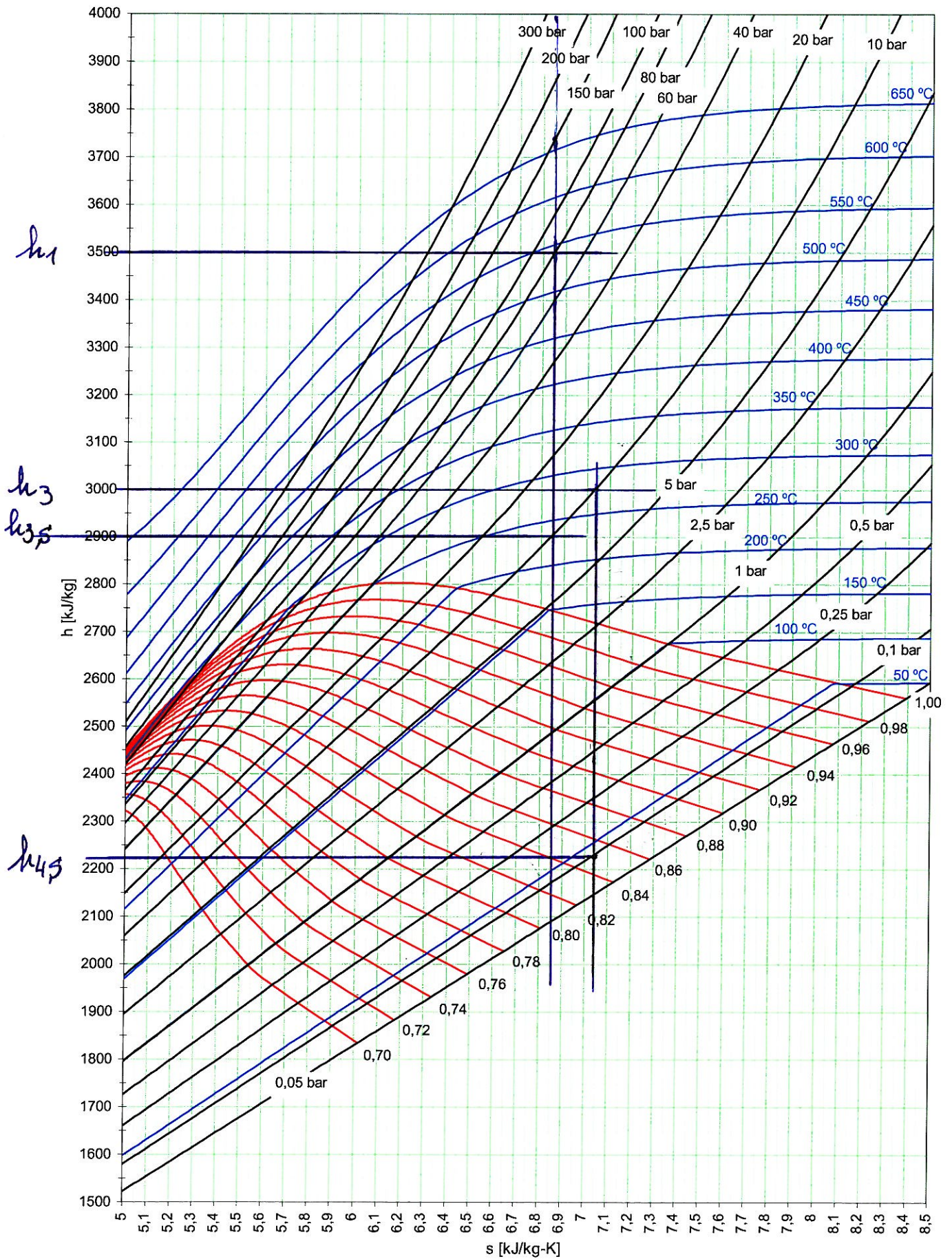
Punto	Caudal (kg/s)	Presión (bara)	Temp. (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg-K)	Vol. Específico (m <sup>3</sup> /kg)	Calidad del vapor
1	100	80		3500			
2	----	80		3500			
3		10		3000			
4		0,1					
5							
6							
7							
8							
9							
10							

**Tabla de saturación del agua (líquido-vapor)**

<b>P</b>	<b>T<sup>a</sup> sat.</b>	<b>v<sub>f</sub></b>	<b>v<sub>fg</sub></b>	<b>v<sub>g</sub></b>	<b>u<sub>f</sub></b>	<b>u<sub>fg</sub></b>	<b>u<sub>g</sub></b>	<b>h<sub>f</sub></b>	<b>h<sub>fg</sub></b>	<b>h<sub>g</sub></b>	<b>s<sub>f</sub></b>	<b>s<sub>fg</sub></b>	<b>s<sub>g</sub></b>
<i>bara</i>	<i>°C</i>	<i>m<sup>3</sup>/kg</i>	<i>m<sup>3</sup>/kg</i>	<i>m<sup>3</sup>/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg</i>	<i>kJ/kg-K</i>	<i>kJ/kg-K</i>	<i>kJ/kg-K</i>
0,1	45,81	0,0010103	14,66955	14,67056	191,802	2245,38	2437,18	191,812	2392,07	2583,89	0,64922	7,49968	8,14889
0,15	53,97	0,0010140	10,01935	10,02036	225,920	2222,08	2448,00	225,935	2372,37	2598,30	0,75484	7,25228	8,00712
0,2	60,06	0,0010171	7,64713	7,64815	251,379	2204,61	2455,98	251,400	2357,55	2608,95	0,83195	7,07528	7,90724
0,5	81,32	0,0010299	3,23912	3,24015	340,425	2142,78	2483,21	340,476	2304,74	2645,21	1,09101	6,50196	7,59296
0,75	91,76	0,0010372	2,21604	2,21708	384,288	2111,82	2496,10	384,365	2278,02	2662,39	1,21296	6,24270	7,45566
1	99,61	0,0010432	1,69298	1,69402	417,332	2088,22	2505,55	417,436	2257,51	2674,95	1,30256	6,05625	7,35881
5	151,84	0,0010926	0,37371	0,37480	639,639	1921,07	2560,71	640,185	2107,92	2748,11	1,86060	4,95998	6,82058
10	179,89	0,0011272	0,19322	0,19435	761,556	1821,22	2582,77	762,683	2014,44	2777,12	2,13843	4,44655	6,58498
15	198,30	0,0011539	0,13055	0,13170	842,986	1750,47	2593,46	844,717	1946,29	2791,01	2,31468	4,12837	6,44305
20	212,38	0,0011768	0,09840	0,09958	906,268	1692,95	2599,22	908,622	1889,76	2798,38	2,44702	3,89214	6,33916
40	250,36	0,0012526	0,04852	0,04978	1082,416	1519,38	2601,79	1087,426	1713,47	2800,90	2,79665	3,27306	6,06971
80	295,01	0,0013847	0,02214	0,02353	1306,002	1264,39	2570,39	1317,080	1441,53	2758,61	3,20765	2,53720	5,74485

0

Diagrama de Mollier del agua





No existen pérdidas de presión en tuberías ni intercambiadores. Debe usarse el diagrama de Mollier para los cálculos que sean necesarios realizar en relación con las turbinas y las tablas adjuntas para el resto de los cálculos.

ORDEN POR EL QUE VOY RESOLVIENDO

- ①
- ②
- ⑤
- ④
- ③

Punto	Caudal (kg/s)	Presión (bara)	Temp. (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg-K)	Vol. Específico (m³/kg)	Calidad del vapor
1	100	80		3500			
2	----	80		3500			
3	20.028	10		3000			
4	78.1786	0.1		2349.2			
5	100	0.1	45.81	191.812		0.0010103	
6	100	80	47.74	199.884			
7	100	80	189.89	807.242			
8	1.7938	10	52.74	3050			
9		10	52.74	220.7927			
10	21.8214	0.1		220.7927			

$$h_6 = h_5 + (80 - 0.1) 100 \times 0.0010103 = 199.884 \text{ kJ/kg}$$

$$T_6 = 45.81 + \frac{53.97 - 45.81}{225.935 - 191.812} (199.884 - 191.812) = 47.74^\circ\text{C}$$

$$h_9 = 191.812 + \frac{225.935 - 191.812}{53.97 - 45.81} (52.74 - 45.81) = 220.7927 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{8s} = h_{3s} = 2900 \text{ kJ/kg}$$

$$0.75 = \frac{3500 - h_8}{3500 - 2900} \Rightarrow h_8 = 3050 \text{ kJ/kg}$$

$$\beta [3500 - 3050] = 1 [199.884 - 191.812] \Rightarrow \beta = 0.017938$$

$$\dot{m}_8 = 1.7938 \text{ kg/s}$$

$$T_7 = T_{\text{sat}}(10 \text{ bara}) + 10 = 179.89 + 10 = 189.89^\circ\text{C}$$

$$h_7 = 762.683 + \frac{844.717 - 762.683}{198.3 - 179.89} 10 = 807.242 \text{ kJ/kg}$$

(2)

Balance en FWATR

$$\alpha \cdot h_3 + \beta h_8 - (\alpha + \beta) h_9 = h_7 - h_6$$

$$\alpha \cdot 3000 + 0,017938 \cdot 3050 - (\alpha + 0,017938) 220,7927 = 807,242 - 199,884$$

$$\alpha = 0,20028$$

$$\dot{m}_3 = 20,028 \text{ kg/s}$$

$$\dot{q}_{\text{CALD}} = h_1 - h_7 = 3500 - 807,242 = 2692,758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$0,3713 = \frac{\dot{W}_T}{\dot{q}_{\text{CALD}}} \quad \dot{W}_T = 999,821 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{q}_{\text{COND}} = 2692,758 - 999,821 = 1692,937 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} =$$

$$= (1 - \alpha - \beta) h_4 + (\alpha + \beta) h_{10} - h_5 =$$

$$= (1 - 0,20028 - 0,017938) h_4 + (0,20028 + 0,017938) 220,7927 - 191,812$$

$$h_4 = 2349,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{4s} = 2225$$

$$\eta_{T1} = \frac{3500 - 3000}{3500 - 2900} = 0,833$$

$$\eta_{T2} = \frac{3000 - 2349,2}{3000 - 2225} = 0,8397$$

$$\dot{Q}_{\text{COND}} = 169294 \text{ kW} \quad | \quad \dot{Q}_{\text{CALD}} = 269276 \text{ kW}$$

$$\dot{W} = 99982 \text{ kW}$$

## TERMODINÁMICA

### Problema – 2 (3 puntos)

Nombre \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

La figura adjunta representa una planta de producción de aire líquido a partir de aire atmosférico. El aire es aspirado por el compresor a 1 bar y 20°C, elevando su presión hasta 35 bar. El compresor está refrigerado y el proceso en su interior se puede modelar por una politrópica de índice 1,25. La energía disipada por irreversibilidades internas ( $\epsilon$ ) en el mismo asciende a 61 kJ por cada kg de aire aspirado.

La cámara de separación opera a 1 bar y de la misma el aire sale como líquido saturado por la sección (5) y como vapor saturado por la sección (6).

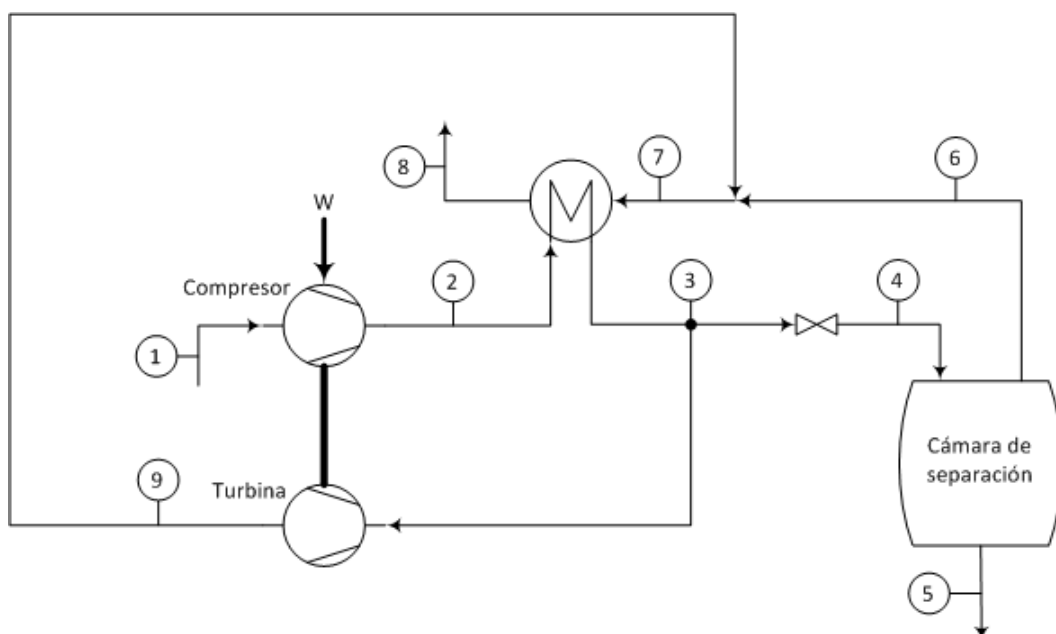
La turbina produce un 5% del trabajo demandado por el compresor, aportándose el resto ( $W$ ) desde el exterior. La turbina es adiabática con un rendimiento isentrópico del 80%. La entrada a la turbina (3) se encuentra a -144°C.

El aire **en el compresor** se modelará como gas perfecto con  $C_p = 1,051$  kJ/kg-K y  $\gamma = 1,393$ . En el resto de la instalación se modelará como nitrógeno, considerado como sustancia pura según las tablas adjuntas.

Se desprecian las pérdidas de presión en intercambiadores y conductos.

Se pide:

- Determinar el calor disipado por el compresor por cada kg de aire aspirado
- Calcular la masa de aire líquido producido por cada kg de aire aspirado por el compresor
- Determinar el consumo de la instalación (kWh por cada kg de aire líquido producido)
- Si la corriente (8) se dirigiese a una caldera de recuperación de la que saliese a 20°C y el calor así recuperado se aplicase a un ciclo de potencia que viese como foco frío el ambiente a 20°C, determinar el mínimo consumo de la instalación que se obtendría si el trabajo producido por el ciclo se entregase al compresor



**Tabla del nitrógeno saturado (líquido-vapor)**

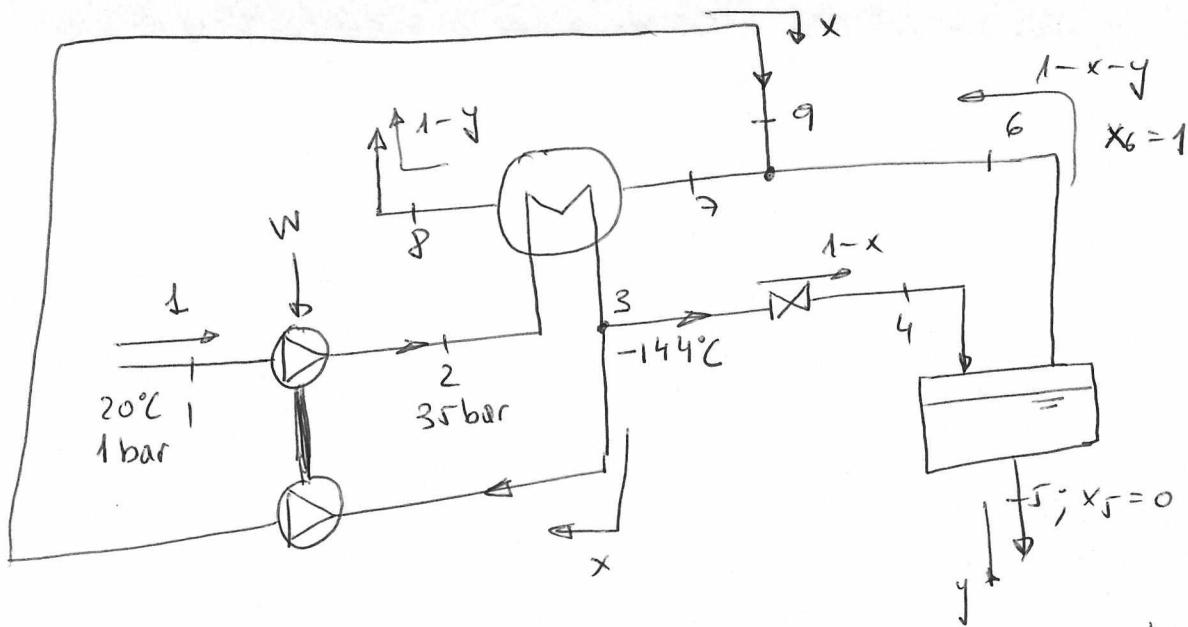
p	t	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>g</sub>
[bar]	[°C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg-K]	[kJ/kg-K]
0,5	-201,3	0,001204	0,41529	-133,28	72,7	2,68401	5,55150
1	-195,9	0,001240	0,21947	-122,25	77,1	2,83126	5,41167
2	-189,5	0,001287	0,11545	-109,04	81,5	2,99393	5,27263
15	-162,8	0,001606	0,01567	-47,63	87,1	3,60864	4,82870
25	-153,2	0,001892	0,00806	-18,31	74,6	3,84792	4,62291

**Tabla del nitrógeno como vapor sobrecalentado**

1 bar (sat = -195,9°C)					35 bar				
T	v	u	h	s	T	v	u	h	s
[°C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg-K]	[°C]	[m <sup>3</sup> /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg-K]
sat	0,21947	55,1	77,1	5,41167	-155	0,00174	-33,9	-27,8	3,75312
-195	0,22240	55,8	78,1	5,42474	-150	0,00196	-17,1	-10,2	3,89880
-190	0,23839	59,8	83,6	5,49358	-145	0,00508	45,3	63,1	4,47827
-185	0,25416	63,7	89,1	5,55754	-140	0,00684	62,1	86,0	4,65430
15	0,85500	213,4	298,9	6,80370	-135	0,00792	71,3	99,0	4,75047
20	0,86987	217,1	304,1	6,82162	-130	0,00881	78,6	109,4	4,82440
25	0,88475	220,8	309,3	6,83923	-125	0,00959	84,9	118,5	4,88680
30	0,89962	224,5	314,5	6,85655	-120	0,01031	90,7	126,8	4,94185
35	0,91450	228,2	319,7	6,87358	-115	0,01098	96,1	134,5	4,99167
40	0,92937	232,0	324,9	6,89034	-110	0,01161	101,2	141,9	5,03750
45	0,94424	235,7	330,1	6,90684	-105	0,01223	106,2	149,0	5,08017
50	0,95911	239,4	335,3	6,92308	-100	0,01282	110,9	155,8	5,12023
55	0,97398	243,1	340,5	6,93908	285	0,04805	413,6	581,7	6,43623
290	1,67216	420,3	587,5	7,50610	290	0,04848	417,4	587,1	6,44586
295	1,68701	424,1	592,8	7,51554	295	0,04891	421,3	592,5	6,45541
300	1,70185	428,0	598,2	7,52491	300	0,04934	425,2	597,9	6,46488
305	1,71670	431,9	603,5	7,53420	305	0,04977	429,1	603,3	6,47427
310	1,73155	435,7	608,9	7,54343	310	0,05020	433,0	608,7	6,48360
315	1,74639	439,6	614,3	7,55258	315	0,05063	436,9	614,2	6,49284
320	1,76124	443,5	619,6	7,56166	320	0,05106	440,9	619,6	6,50202
325	1,77609	447,4	625,0	7,57068	325	0,05149	444,8	625,0	6,51113
325	1,77609	447,4	625,0	7,57068	325	0,05149	444,8	625,0	6,51113
330	1,79094	451,3	630,4	7,57963	330	0,05192	448,7	630,4	6,52017
340	1,82063	459,1	641,1	7,59734	340	0,05278	456,6	641,3	6,53804

Condiciones críticas: - 147°C & 33,96 bar





### Compresor

refrigerado

$$n = 1.25$$

$$E_{12} = +61 \text{ kJ/kg}$$

$$c_p = 1.051 \text{ kJ/kg-K}; \gamma = 1.393$$

$$W_T = 0.05 W_C$$

$$W = 0.95 W_C$$

$$\eta_T = 0.8$$

### Turbina

a) Balance energético al compresor

$$h_1 + W_C = h_2 + q_c$$

Balance de entropía al ser gas perfecto:

$$\int_1^2 T ds = c_n (T_2 - T_1) = \underbrace{-q_c}_0 + E_{12}$$

$$\gamma = c_p / c_v \Rightarrow c_v = 0.7545 \text{ kJ/kg-K}$$

$$c_n = c_v \frac{n-\gamma}{n-1} = 0.7545 \times \frac{1.25-1.393}{1.25-1} = -0.4316 \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}}$$

$$\underline{q_c} = - \left[ -0.4316 (323.60 - 20) - 61 \right] = \underline{192.034 \text{ kJ/kg}}$$

$$T_2 = 293 \left( \frac{35}{1} \right)^{\frac{0.25}{1.25}} - 273 = 323.60^\circ\text{C}$$

$$b) \quad w_c = (h_2 - h_1) + q_c = 1,051(323,60 - 20) + 192,039 = 511,12 \text{ kJ/kg}$$

$$w_T = 0,05 \times 511,12 = 25,556 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 0,95 \times 511,12 = 485,56 \text{ kJ/kg}$$

Turbine

$$h_3 = 67,68 \text{ kJ/kg} = h_4$$

$$\Delta_3 = 4,513476 \text{ kJ/kg} - K$$

$$4,513476 = 2,83126 + x_{qs} (5,41167 - 2,83126) \rightarrow x_{qs} = 0,651918$$

$$h_{qs} = -122,25 + (77,1 + 122,25) 0,651918 = 7,709874 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_9}{h_3 - h_{qs}} = \frac{67,68 - h_9}{67,68 - 7,709874} \approx 0,8$$

$$\hookrightarrow h_9 = 19,7039 \text{ kJ/kg}$$

$$w_T = x(h_3 - h_9) \Leftrightarrow 25,556 = x(67,68 - 19,7039)$$

$$\hookrightarrow x = 0,5327$$

Comara de separaci3n

$$(1-x)h_4 = y h_5 + (1-x-y)h_6$$

$$h_5 = h_f(1 \text{ bar}) = -122,25 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = h_g(1 \text{ bar}) = 77,1 \text{ kJ/kg}$$

$$(1 - 0,5327) \times 67,68 = y(-122,25) + (1 - 0,5327 - y) 77,1$$

$$\hookrightarrow y = 0,022082 \frac{\text{kg al}}{\text{kg l}}$$

$$c) \quad W = 485,56 \frac{\text{KW} \cdot \text{s}}{\text{kg}_L} \times \frac{1 \text{ kg}_L}{0,022082 \text{ kg a.l.}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = \underline{\underline{6,1082 \text{ kWh/kg}_L}}$$

d) Intercambiador

$$(1-y)(h_8 - h_7) = (h_2 - h_3)$$

Punto de mezcla

$$x h_9 + (1-x-y) h_6 = (1-y) h_7$$

$$0,5327 \times 19,7039 + (1-0,5327-0,022082) \times 77,1 =$$

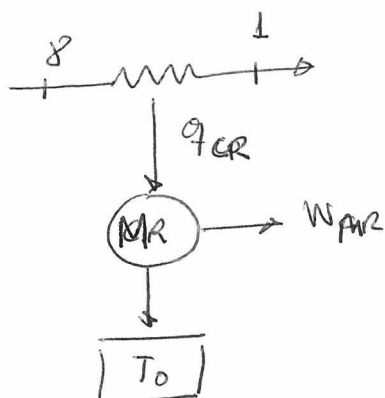
$$= (1-0,022082) h_7 \Rightarrow h_7 = 45,8347 \text{ KJ/kg}$$

$$(1-0,022082)(h_8 - 45,8347) = 623,49 - 67,68$$

$$h_2 = 623,49 \text{ KJ/kg}$$

$$h_8 = 614,19 \text{ KJ/kg}$$

Caldera de recuperación y ciclo reversible



$$\bar{T}_{81} = \frac{h_8 - h_1}{\Delta_8 - \Delta_1} = 424,34 \text{ K}$$

$$\Delta_8 = 7,552394 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\Delta_1 = 6,82162 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_1 = 304,1 \text{ KJ/kg}$$

$$\eta_{MR} = 1 - \frac{293}{424,34} = 30,95\%$$

$$\begin{aligned}
 w_{MR} &= (h_8 - h_1) (1 - \eta) \dot{Q}_{MR} = \\
 &= (644,19 - 304,1) (1 - 0,022082) 0,3095 = 93,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

Aplicando dicho trabajo al compresor resulta un nuevo consumo de la instalación de:

$$w' = 6,1082 - \frac{93,85}{0,022082 \times 3600} = \underline{\underline{4,9276 \text{ kWh/kg a.l.}}}$$

## TERMODINÁMICA

### Problema 3 (3 puntos)

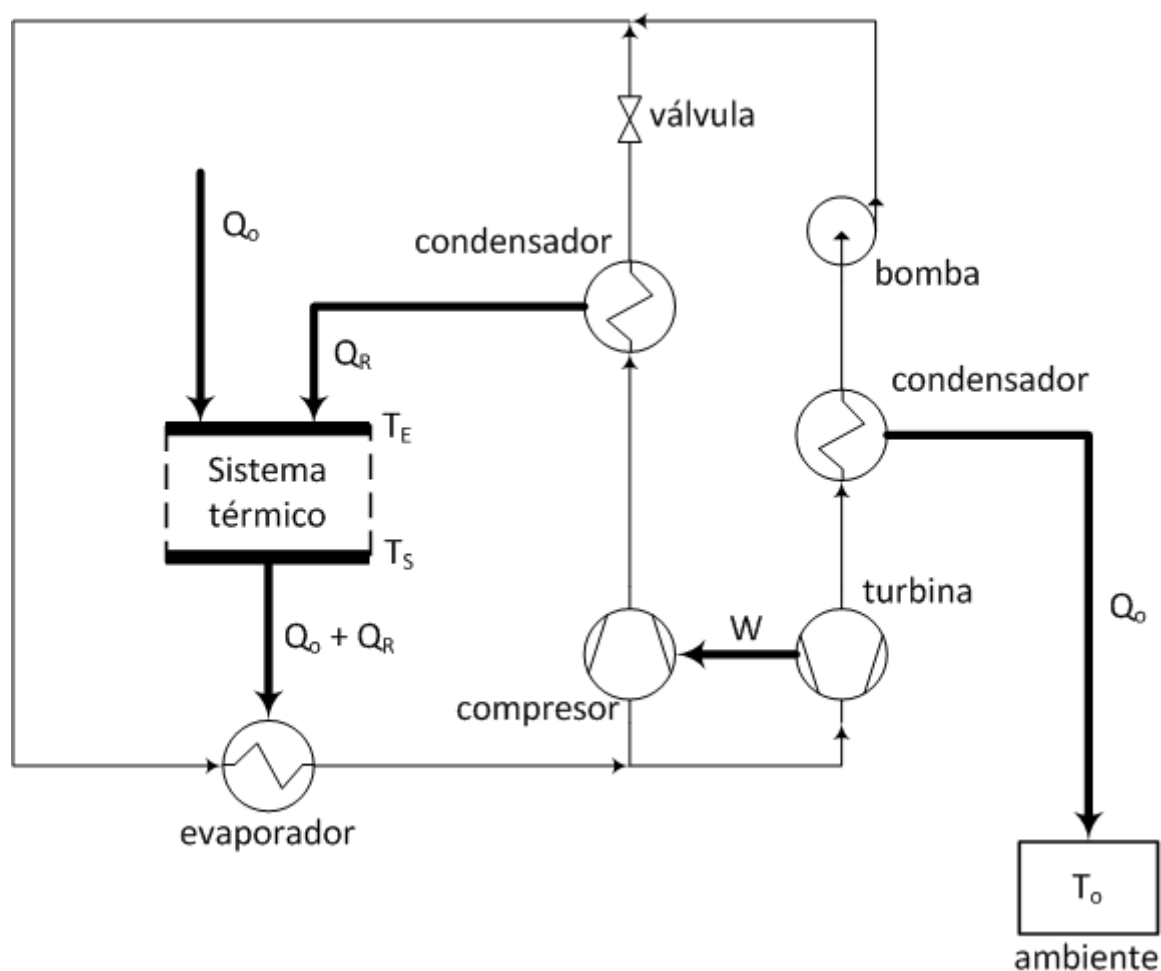
Nombre \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

Un *transformador de calor* es un dispositivo que, mediante un ciclo de refrigeración y otro de potencia, absorbe un calor de media temperatura y lo divide en dos, uno de alta y otro de baja. Se puede emplear para reducir el consumo de calor de procesos térmicos.

La figura inferior representa un cierto *sistema térmico* que recibe calor a alta temperatura  $T_E$  y lo rechaza a temperatura media  $T_S$ . Dicho sistema no intercambia trabajo y opera en régimen permanente. El calor que abandona el *sistema térmico* se dirige a un *transformador de calor*, que disipa parte del mismo al ambiente y el resto lo devuelve al *sistema térmico* a la temperatura  $T_E$ .

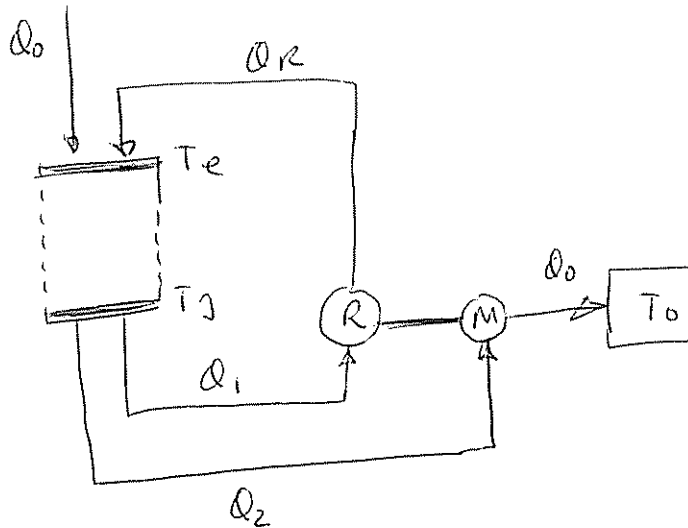
Asumiendo que las únicas irreversibilidades del Universo se sitúan en el interior del *sistema térmico*, determinar el ahorro energético que produce el *transformador de calor*, definido como:

$$AE = \frac{Q_o}{Q_o + Q_R}$$





La configuración puede ser descrita mediante un conjunto de motores y máquinas de Carnot:



Dado que  $R$  y  $M$  son reversibles:

$$\frac{Q_1}{T_s} = \frac{Q_R}{T_e} \quad ; \quad \frac{Q_2}{T_s} = \frac{Q_0}{T_0}$$

Por el balance energético al sistema térmico:

$$Q_0 + Q_R = Q_1 + Q_2$$

Es decir:

$$Q_0 + Q_R = \frac{T_s}{T_e} Q_R + \frac{T_s}{T_0} Q_0$$

$$Q_0 \left( 1 - \frac{T_s}{T_0} \right) = Q_R \left( \frac{T_s}{T_e} - 1 \right)$$

$$Q \frac{\frac{T_0 - T_s}{T_0}}{\frac{T_s - T_e}{T_e}} = \frac{Q_R}{Q_0}$$

$$\left( \frac{T_0 - T_s}{T_s - T_e} \right) \left( \frac{T_e}{T_0} \right) = \frac{Q_R}{Q_0}$$

Por tanto, el ahorro viene dado como:

$$\begin{aligned}
 AE &= \frac{1}{1 + Q_R/Q_0} = \frac{1}{1 + \left( \frac{T_0 - T_S}{T_S - T_E} \right) \left( \frac{T_E}{T_0} \right)} = \\
 &= \frac{1}{\frac{T_0 T_S - T_E T_0 + T_0 T_E - T_S T_E}{T_0 T_S - T_0 T_E}} = \frac{T_0 (T_S - T_E)}{T_S (T_0 - T_E)} = \\
 &= \left( \frac{T_0}{T_S} \right) \left( \frac{T_E - T_S}{T_E - T_0} \right)
 \end{aligned}$$

Método alternativo

Como hay irreversibilidades internas en el sistema térmico

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_u}{dE} &= (Q_0 + Q_R) \left( \frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_E} \right) = \frac{dS_{ST}}{dE} + \frac{dS_{TC}}{dE} + \frac{dS_{amb}}{dE} + \\
 &+ \frac{dS_{IE}}{dE}
 \end{aligned}$$

La IE es un foco del que ha de proceder el calor que llega externamente al sistema térmico, como no puede haber irrev. en esa transferencia

de calor, dicho flujo es el  $Q_e$ . Por tanto:

$$(Q_0 + Q_R) \left( \frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_e} \right) = 0 + 0 + \frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_0}{T_e}$$

$$\frac{Q_0}{T_S} - \frac{Q_0}{T_e} + \frac{Q_R}{T_S} - \frac{Q_R}{T_e} = \frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_0}{T_e}$$

$$Q_0 \left( \frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_0} \right) = Q_R \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_S} \right)$$

que coincide con las expresiones anteriores.

### Curiosidad

Para:  $T_e = 250^\circ\text{C} = 523\text{ K}$

$T_S = 100^\circ\text{C} = 373\text{ K}$

$T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$

se obtiene:

$$AE = \left( \frac{293}{373} \right) \left( \frac{523 - 373}{523 - 293} \right) = \underline{\underline{0,5123}}$$