FísicaUC

Ejercicio 01-I3

Considere una planta de potencia que opera en un ciclo de Rankine ideal con amonia, como muestra la figura. La planta usa diferencias de temperatura del agua de mar en la superficie y en profundidad. Opera en un lugar en que la temperatura en la suerficie es 25ºC, y a cierta profundidad es 5ºC. La tasa de flujo de masa de amonia es 1000 kg/s y la entrada de la turbina es vapor saturado a 20ºC. La entrada de la bomba es líquido saturado a 10ºC.

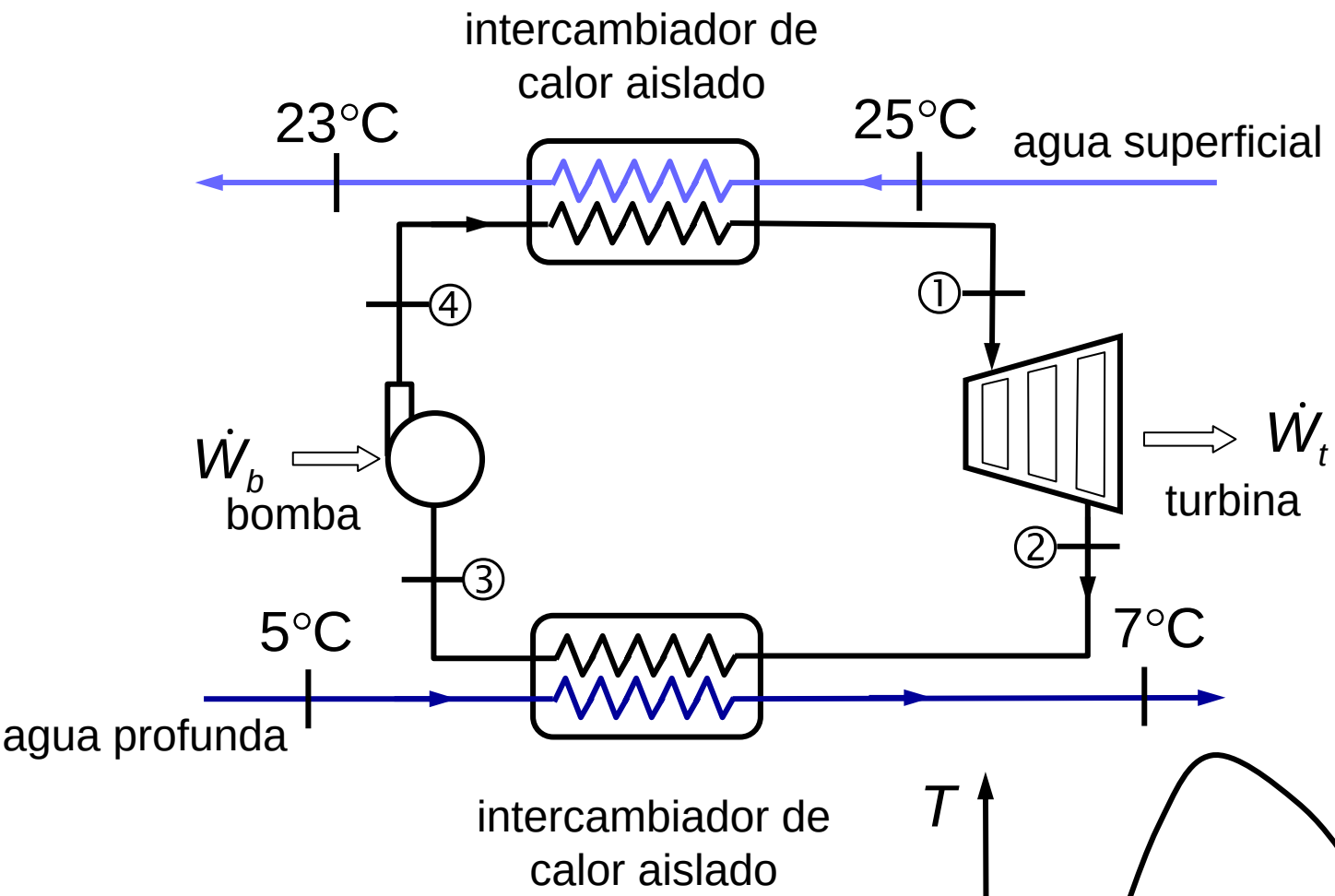
Determine:

a) La potencia de salida de la turbina y la potencia requerida en la bomba.

b) La tasa de flujo de agua en ambos intercambiadores de calor.

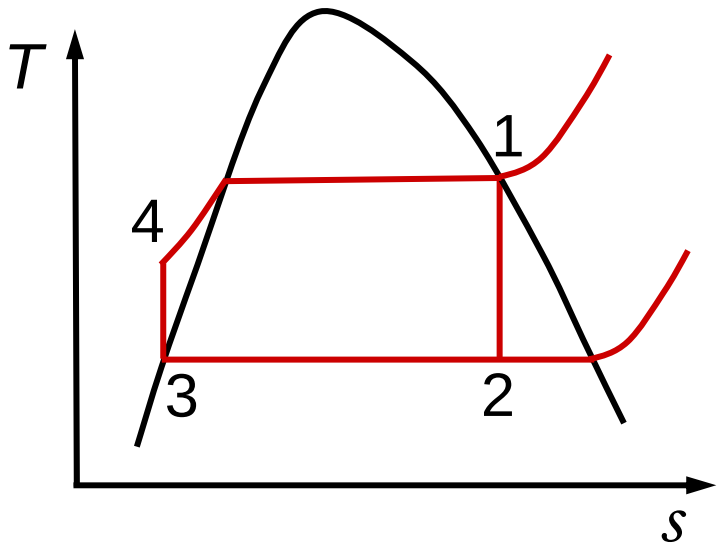
c) La eficiencia térmica de la planta.

FísicaUC



solución

Diagrama $T - s$ ⇨



a) La turbina $\Longrightarrow \dot{W}_t = \dot{m}_{NH_3} w_t = \dot{m}_{NH_3}(h_1 - h_2)$

$\dot{m}_{NH_3} = 1000 \text{ kg/s}$

La bomba $\Longrightarrow \dot{W}_b = \dot{m}_{NH_3} w_b = -\dot{m}_{NH_3} \int_3^4 v dP$

$\Longrightarrow T_1 = 20°\text{C}$ tabla $\Longrightarrow s_1 = 5.088 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$\Longrightarrow h_1 = 1460.2 \text{ kJ/kg}$

Ciclo ideal $\Longrightarrow$ turbina irreversible y adiabática

$\Longrightarrow s_2 = s_1 \Longrightarrow s_2 = 5.088 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$s_2 = s_{f2} + x_2 \cdot s_{fg2}$

$h_2 = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}$

$T_2 = T_3 = 10°\text{C}$ tabla $\Longrightarrow$

$s_{f2} = 0.8779 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$s_{fg2} = 4.3266 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$h_{f2} = 226.97 \text{ kJ/kg}$

$h_{gf2} = 1225.03 \text{ kJ/kg}$

FísicaUC

$$\Rightarrow \quad 5.088 = 0.8779 + x_2 \cdot 4.3266 \quad \Rightarrow \quad x_2 = 0.973$$

$$\Rightarrow \quad h_2 = 226.97 + 0.973 \cdot 1225.03 = 1418.92 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{W}_t = 1000(1460.2 - 1418.92) = 41280 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_b = -\dot{m}_{NH_3} \int_3^4 v dP \approx -\dot{m}_{NH_3} v_3 (P_4 - P_3)$$

$$P_4 = P_{sat\,@\,20°C} \quad \text{tabla} \quad \Rightarrow \quad P_4 = 857.5 \text{ kPa}$$

$$P_3 = P_{sat\,@\,10°C} \quad \text{tabla} \quad \Rightarrow \quad P_3 = 615.2 \text{ kPa}$$

$$v_3 = v_{sat\,@\,10°C} \quad \text{tabla} \quad \Rightarrow \quad v_3 = 0.0016 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{W}_b = -1000 \cdot 0.0016 \cdot (857.5 - 615.2) = -387.68 \text{ kW}$$

FísicaUC

b) Tasa de flujo de agua en intercambiadores

Intercambiador aislado de alta temperatura

$$\Rightarrow \dot{Q}_{NH_3\ c} = \left|\dot{Q}_{H_2O\ a}\right| \qquad \Rightarrow \dot{Q}_{NH_3\ c} = \dot{m}_{NH_3}\left(h_1 - h_4\right)$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{H_2O\ a} = \dot{m}_{H_2O\ a} c_{v\ H_2O}\left(T_s - T_e\right)$$

$c_{v\ H_2O} = 4.136\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ $\qquad T_e = 25°\text{C}$ $\qquad T_s = 23°\text{C}$

h_4 se obtiene de $w_b = \dfrac{\dot{W}_b}{\dot{m}_{NH_3}} = -\left(h_4 - h_3\right) \Rightarrow h_4 = h_3 - \dfrac{\dot{W}_b}{\dot{m}_{NH_3}}$

$T_3 = 10°\text{C}$ tabla $\Rightarrow h_3 = 226.97\ \text{kJ/kg}$

$$\Rightarrow h_4 = 226.97 + \frac{387.68}{1000} = 227.36\ \text{kJ/kg}$$

FísicaUC

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{H_2O\ a} = \frac{h_1 - h_4}{\left| c_{v\ H_2O}\left(T_s - T_e\right)\right|}\dot{m}_{H_2O}$$

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{H_2O\ a} = \frac{1460.2 - 227.36}{\left|4.135 \cdot \left(296 - 298\right)\right|}1000 = 149073\ \text{kg/s}$$

Intercambiador aislado de baja temperatura

$$\Longrightarrow \left|\dot{Q}_{NH_3\ f}\right| = \dot{Q}_{H_2O\ b}$$

$$\Longrightarrow \quad \dot{Q}_{NH_3\ f} = \dot{m}_{NH_3}\left(h_3 - h_2\right)$$

$$\Longrightarrow \quad \dot{Q}_{H_2O\ a} = \dot{m}_{H_2O\ a} c_{v\ H_2O}\left(T_s - T_e\right)$$

$T_e = 5°\text{C}$ $\qquad$ $T_e = 7°\text{C}$

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{H_2O\ b} = \frac{\left|h_3 - h_2\right|}{c_{v\ H_2O}\left(T_s - T_e\right)}\dot{m}_{H_2O}$$

FísicaUC

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{H_2O\ a} = \frac{|226.97 - 1418.92|}{4.135 \cdot (280 - 278)} 1000 = 144129 \text{ kg/s}$$

c) La eficiencia $\Longrightarrow \quad \eta = \dfrac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{NH_3\ c}}$

$$\dot{W}_{neto} = \dot{W}_t + \dot{W}_b = 41280 - 387.48 = 40892.5 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{NH_3\ c} = \dot{m}_{NH_3}(h_1 - h_4) = 1000 \cdot (1460.2 - 226.97) = 1233030 \text{ kW}$$

$$\Longrightarrow \quad \eta = \frac{40892.5}{1233030} = 0.033$$

Tabla Ej1-I3

$T_1 = 20°C$

vapor saturado

$\Downarrow$

$s_1 = 5.088\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$

$\Downarrow$

$h_1 = 1460.2\ \text{kJ/kg}$

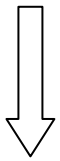
Saturated Ammonia --Temperature Table

deg-C	kPa	Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/kg*K	
Temp.	Sat. press.	Sat. liquid	Sat. vapor	Sat. liquid	Sat. vapor
T °C	p_sat@T	h_f	h_g	s_f	s_g
10	615.2	226.97	1452	0.8779	5.2045
15	728.6	250.54	1456.3	0.9598	5.1444
20	857.5	274.3	1460.2	1.0408	5.086
25	1003.2	298.25	1463.5	1.121	5.0293
30	1167	322.42	1466.3	1.2005	4.9738

$\Longrightarrow\ P_4 = P_{sat\ @\ 20°C} = 857.5\ \text{kPa}$

$T_2 = 10°C$

líquido saturado



$s_{f2} = 0.8779 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$s_{fg2} = 4.3266 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$



		Enthalpy		Entropy	
deg-C	kPa	kJ/kg		kJ/kg*K	
Temp.	Sat. press.	Sat. liquid	Sat. vapor	Sat. liquid	Sat. vapor
T °C	p_sat@T	h_f	h_g	s_f	s_g
0	429.6	180.36	1442.2	0.7114	5.3309
5	515.9	203.58	1447.3	0.7951	5.2666
10	615.2	226.97	1452	0.8779	5.2045
15	728.6	250.54	1456.3	0.9598	5.1444
20	857.5	274.3	1460.2	1.0408	5.086

$h_{f2} = 226.97 \text{ kJ/kg}$

$h_{gf2} = 1225.03 \text{ kJ/kg}$

$T_3 = 10°C \quad \Longrightarrow \quad h_3 = h_{f2} = 226.97 \text{ kJ/kg}$

FísicaUC

$T_3 = 10°C$

líquido saturado

		Spec. Volume	
deg-C	kPa	m^3/kg	
Temp.	Sat. press.	Sat. liquid	Sat. vapor
T °C	p_sat@T	v_f	v_g
0	429.6	0.001566	0.2892
5	515.9	0.001583	0.24299
10	615.2	0.0016	0.20541
15	728.6	0.001619	0.17462
20	857.5	0.001638	0.14922

$\Longrightarrow P_3 = P_{sat\,@\,10°C} = 615.2$ kPa

$\Longrightarrow v_3 = 0.0016\ \mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$

FísicaUC

Ejercicio 02-I3

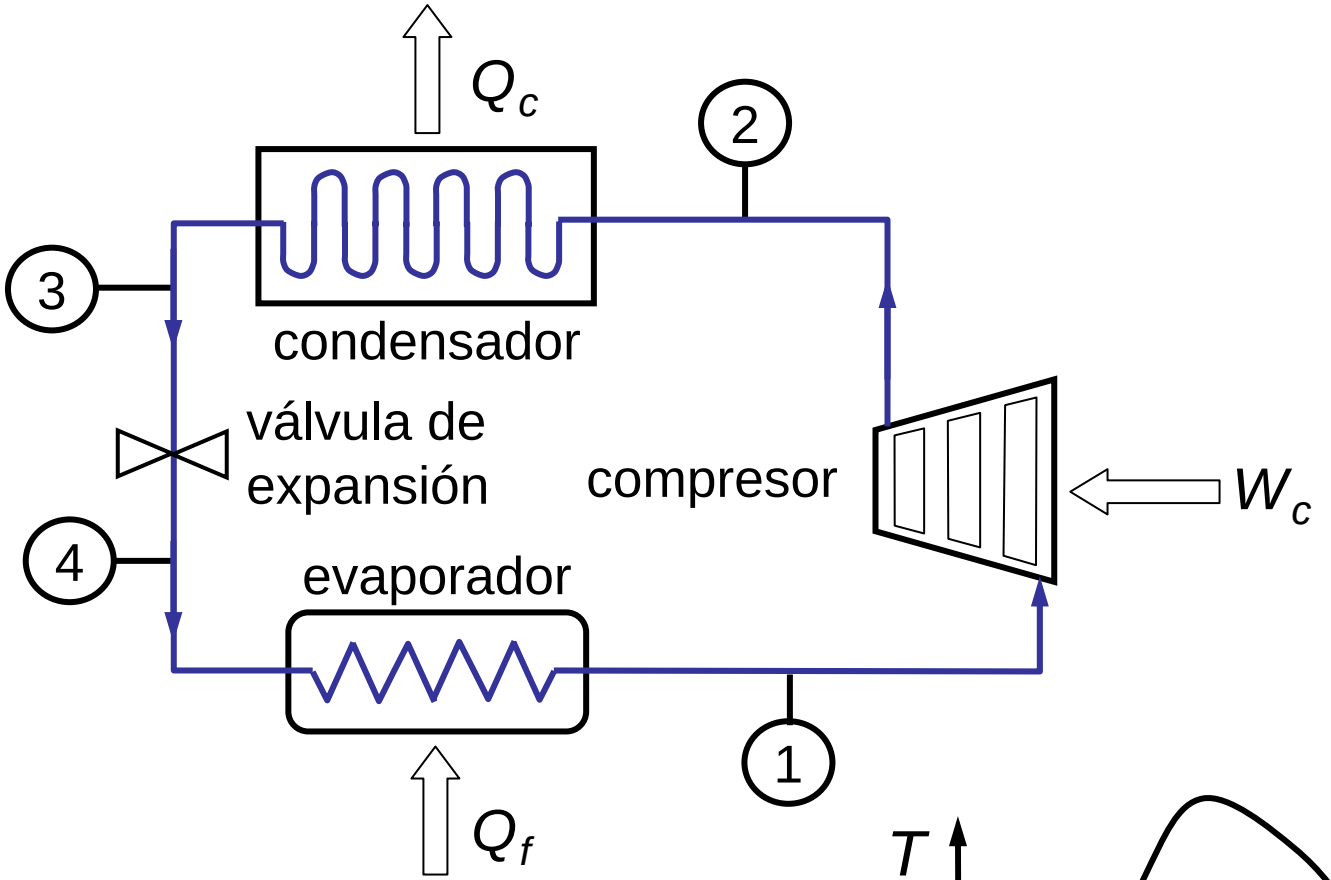
En el acondicionador de aire de un auto, que usa R-134a, el compresor, que tiene una potencia de entrada de 1.5 kW, eleva la presión del R-134a de 201.7 kPa a 1200 kPa. El espacio frío es un intercambiador de calor que enfría aire atmosférico exterior, que está a 30ºC, bajándole la temperatura a 10ºC, para inyectarlo en el interior del auto.

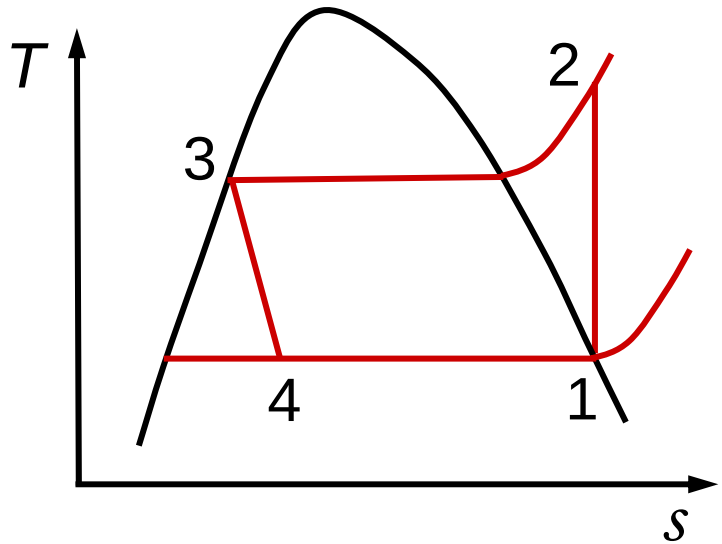
a) Encuentre la tasa de flujo de masa de R-134a.

b) Encuentre la tasa de transferencia de calor del intercambiador de calor de baja temperatura.

c) Encuentre el flujo de aire a 10ºC,

FísicaUC





Ciclo ideal de refrigeración

FísicaUC

solución

a) Tasa de flujo de masa $\Rightarrow$ $\dot{W}_c = \dot{m} w_c$

$\dot{W}_c = 1.5$ kW $\qquad w_c = h_2 - h_1$

Entrada del compresor

$P_1 = 201.7$ kPa tabla $\Rightarrow$ $s_1 = 0.9376$ kJ/kg·K

$\Rightarrow$ $h_1 = 244.58$ kJ/kg

Compresor isentrópico $\Rightarrow$ $s_2 = s_1$

$P_2 = 1200$ kPa

$s_2 = 0.9376$ kJ/kg·K

tabla $\Rightarrow$ $h_2 = 281.84$ kJ/kg

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_c}{h_2 - h_1} \Rightarrow \dot{m} = \frac{1.5}{281.84 - 244.58} = 0.0403 \text{ kg/s}$$

FísicaUC

b) La transferencia de calor a baja temperatura ocurre en el evaporador

$$\Longrightarrow \quad \dot{Q}_f = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

La válvula de expansión es isentálpica $\Longrightarrow \quad h_4 = h_3$

Condición en ③ es líquido saturado

$P_3 = P_2 = 1200$ kPa  $\Longrightarrow \quad h_4 = 117.77$ kJ/kg

$$\Longrightarrow \quad \dot{Q}_f = 0.0403 \cdot (244.58 - 117.77) = 5.11 \text{ kW}$$

c) El aire es enfriado al transferir calor en el evaporador

$$\Longrightarrow \quad \dot{Q}_f = \dot{m}_{aire} \Delta h_{aire} \qquad \text{con} \quad \Delta h \approx c_p \Delta T$$

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{aire} = \frac{\dot{Q}_f}{c_p \Delta T}$$

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ K}$$

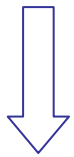
$$\text{aire} \quad \Longrightarrow \quad c_p = 1.004 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\Longrightarrow \quad \dot{m}_{aire} = \frac{5.11}{1.004 \cdot 20} = 0.25 \text{ kg/s}$$

FísicaUC

Tabla Ej2-I3

$P_1 = 201.7$ kPa



vapor saturado

interpolación

		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
180	−12.73	34.97	207.90	242.86	0.14139	0.79826	0.93965
200	−10.09	38.43	206.03	244.46	0.15457	0.78316	0.93773
240	−5.38	44.66	202.62	247.28	0.17794	0.75664	0.93458
280	−1.25	50.18	199.54	249.72	0.19829	0.73381	0.93210

$\Rightarrow \quad s_1 = 0.9376 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

$\Rightarrow \quad h_1 = 244.58 \text{ kJ/kg}$

$P_3 = 1200$ kPa

Líquido saturado

⇩

$h_3 = 117.77$ kJ/kg

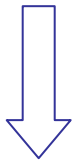
		Enthalpy, kJ/kg		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g
900	35.51	101.61	167.66	269.26
950	37.48	104.51	165.64	270.15
1000	39.37	107.32	163.67	270.99
1200	46.29	117.77	156.10	273.87
1400	52.40	127.22	148.90	276.12

FísicaUC

$P_2 = 1200$ kPa

$s_2 = 0.9376$ kJ/kg·K

interpolando



$h_2 = 281.84$ kJ/kg

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	P = 1.20 MPa (T_{sat} = 46.29°C)			
Sat.	0.016715	253.81	273.87	0.9130
50	0.017201	257.63	278.27	0.9267
60	0.018404	267.56	289.64	0.9614
70	0.019502	277.21	300.61	0.9938
80	0.020529	286.75	311.39	1.0248
90	0.021506	296.26	322.07	1.0546
100	0.022442	305.80	332.73	1.0836
110	0.023348	315.38	343.40	1.1118
120	0.024228	325.03	354.11	1.1394
130	0.025086	334.77	364.88	1.1664
140	0.025927	344.61	375.72	1.1930
150	0.026753	354.56	386.66	1.2192
160	0.027566	364.61	397.69	1.2449
170	0.028367	374.78	408.82	1.2703
180	0.029158	385.08	420.07	1.2954

FísicaUC

Ejercicio 03-I3

Entra aire al compresor de una turbina a gas, que opera con un ciclo de Brayton, a 300 K y 100 kPa, donde es comprimido a 700 kPa y 580 K. Se transfiere calor al aire en una cantidad de 950 kJ/kg antes que entra a la turbina, que tiene una eficiencia del 86%. Asumiendo valores variables del calor específico del aire, determinar

a) La fracción del trabajo de la turbina usado para operar el compresor.

b) La eficiencia térmica del ciclo.

solución

La turbina opera en forma estacionaria

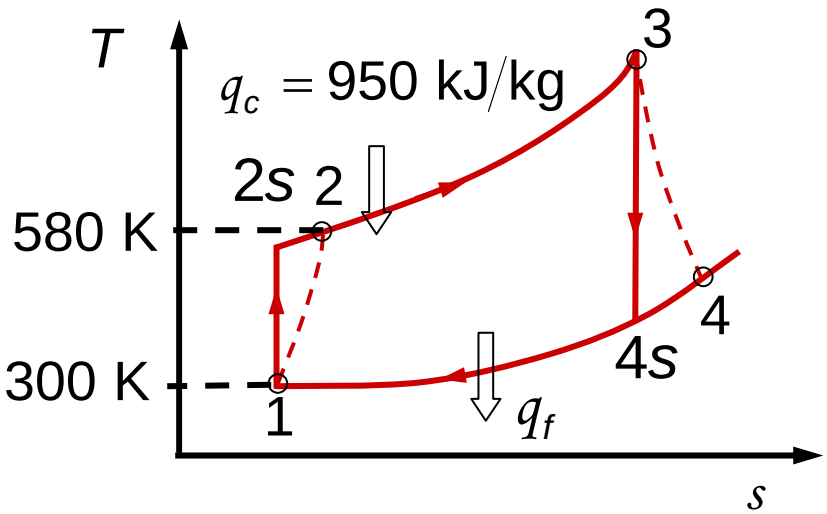
Cambios en energía cinética y potencial son irrelevantes

FísicaUC

Aire ⟹ Gas ideal con calores específicos variables

Ciclo de Brayton

Estados conocidos



a) r_{com} ⟹ fracción del trabajo de la turbina usado para operar el compresor ⟹ $r_{com} = \dfrac{w_{com}}{w_{tur}}$

$$w_{com} = h_2 - h_1$$

η_{tur} ⟹ eficiencia de la turbina ⟹ $w_{tur} = \eta_{tur}\left(h_3 - h_{4s}\right)$

FísicaUC

$1 \rightarrow 2_s$: proceso isentrópico

$1 \rightarrow 2$: proceso real

⇒ considerando el proceso como ideal

TABLA ⇒

Ideal-gas properties of air

T (K)	h (kJ/kg)	p_r	u (kJ/kg)	v_r	s^o (kJ/kg*K)
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140

⇒ $h_1 = 300.19 \text{ kJ/kg}$

$h_2 = 586.04 \text{ kJ/kg}$

⇒ $w_{com} = 586.04 - 300.19 = 285.85 \text{ kJ/kg}$

FísicaUC

$q_c = 950 \text{ kJ/kg} \rightarrow q_c = h_3 - h_2$

$\rightarrow h_3 = 950 + 586.04 = 1536.04 \text{ kJ/kg}$

TABLA →

Ideal-gas properties of air

T (K)	h (kJ/kg)	p_r	u (kJ/kg)	v_r	s^o (kJ/kg*K)
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586

interpolando → $T_3 = 1417.17 \text{ K}$

3→4_s: proceso isentrópico → $\frac{T_3}{T_{4s}} = \left(\frac{P_3}{P_{4s}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$

FísicaUC

$$P_3 = P_2 = 700 \text{ kPa}$$

$$P_{4s} = P_1 = 100 \text{ kPa} \Longrightarrow T_{4s} = T_3\left(\frac{P_{4s}}{P_3}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1417.17\left(\frac{100}{700}\right)^{(1.4-1)/1.4}$$

$$\gamma = 1.4$$

$$\Longrightarrow \quad T_{4s} = \frac{1417.17}{7^{0.2587}} = 856.6 \text{ K}$$

TABLA ⟹

Ideal-gas properties of air

T (K)	h (kJ/kg)	p_r	u (kJ/kg)	v_r	s° (kJ/kg*K)
840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783

interpolando ⟹ $h_{4s} = 884.5 \text{ kJ/kg}$

$$w_{tur} = \eta_{tur}\left(h_3 - h_{4s}\right)$$

$$\eta_{tur} = 0.86 \qquad w_{tur} = 0.86(1536.04 - 884.5) = 560.32 \text{ kJ/kg}$$

FísicaUC

b) $$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_c}$$

$$w_{neto} = w_{tur} - w_{com} \Longrightarrow w_{neto} = 560.32 - 285.85 = 274.47 \text{ kJ/kg}$$

$$\Longrightarrow \quad \eta_{ter} = \frac{274.47}{950} = 0.289$$

$$\Longrightarrow \eta_{ter} = 28.9\%$$

FísicaUC

Ejercicio 04-I3

En un motor de 6 cilindros, con razón de compresión 8 y máximo volumen 0.6 l por pistón, ingresa aire atmosféricos a 20ºC. La temperatura máxima en el ciclo es 1500ºC. Suponiendo que opera con un ciclo de Otto ideal, con valores constantes de calor específico, determine,

a) El calor absorbido por ciclo en cada pistón.

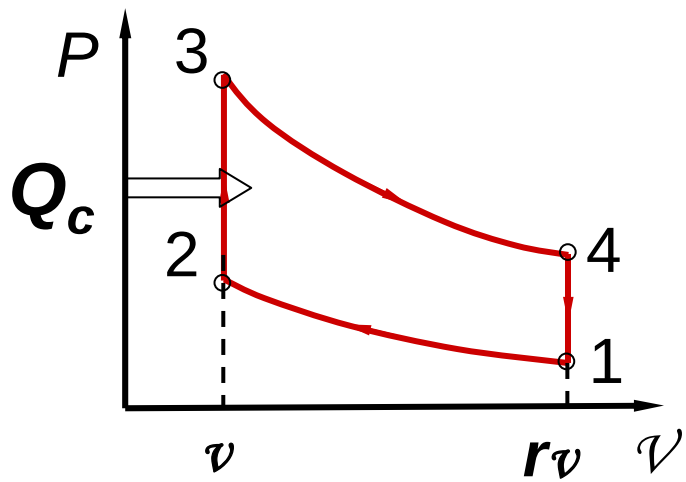
b) La eficiencia térmica.

c) La potencia de salida a 4000 *rpm*.

solución

a) $Q_c = m q_c \approx m c_v (T_3 - T_2)$

1→2: isentrópico $\Longrightarrow$ $T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}$



FísicaUC

$$T_1 = 293\ \text{K}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = r = 8 \quad \Longrightarrow \quad T_2 = 293 \cdot 8^{0.4} = 673.1\,\text{K}$$

$$\gamma = 1.4 \qquad\qquad T_3 = T_{\max} = 1773\ \text{K}$$

$$c_v = 0.717\ \text{kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad q_c = 0.717(1773 - 673.1) = 788.6\ \text{kJ/kg}$$

Ecuación de Estado $\Longrightarrow$ $Pv = \mathcal{R}T$ y $v = \frac{V}{m}$

$$\Longrightarrow \quad m = \frac{P_1 V_1}{\mathcal{R} T_1}$$

$$V_1 = 0.6 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$$

$$P_1 = 100\ \text{kPa} \quad \Longrightarrow \quad m = \frac{100 \times 0.6 \cdot 10^{-3}}{1000 \times 0.287 \times 293} = 0.00428\ \text{kg}$$

$$\mathcal{R} = 0.287\ \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

FísicaUC

$$\Longrightarrow \quad Q_c = m q_c = 0.00428 \cdot 788.6 = 3.375 \text{ kJ/kg}$$

b) $\eta_{ter} = 1 - r^{1-\gamma} \quad \Longrightarrow \quad \eta_{ter} = 1 - 8^{-0.4} = 0.5647$

$$\Longrightarrow \quad \eta_{ter} = 56.5\%$$

c) $W_{out} = n_p \eta_{ter} Q_c \quad \Longrightarrow \quad W_{out} = 6 \cdot 0.5647 \cdot 3.375 = 1.892 \text{ kJ}$

d) Suponiendo una revolución por ciclo

$$\Longrightarrow \quad \dot{W}_{out} = \frac{rpm}{60} W_{out} \quad \Longrightarrow \quad \dot{W}_{out} = \frac{4000}{60} 1.892 = 126 \text{ kW}$$

FísicaUC

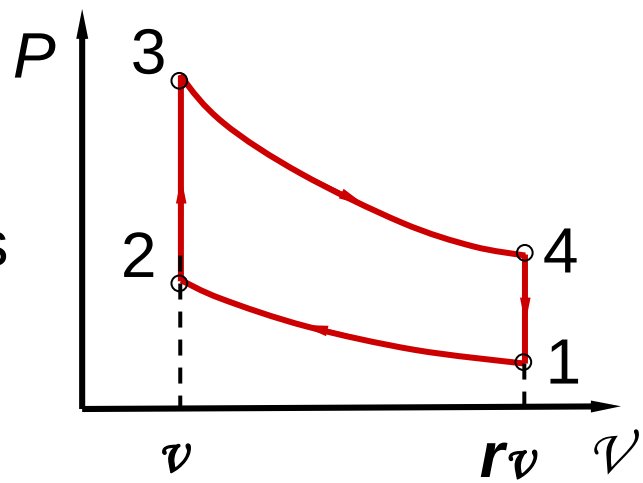
Ejercicio 05-I3

Un motor a bencina de 2.4 l funciona a 2500 *rpm*, con una razón de compresión 9:1. Al iniciar la compresión la presión es 40 kPa y la temperatura 280 K. Luego de la combustión la temperatura es 2000 K. Encontrar:

a) La temperatura más alta en el ciclo.
b) La presión más alta en el ciclo,
c) El calor transferido por unidad de masa en el ciclo.
d) La temperatura de salida de los gases.

solución

a) $1 \to 2$
$3 \to 4$
$\Longrightarrow$ adiabáticos



FísicaUC

$$\Longrightarrow \quad T v^{\gamma-1} = cte \quad \Longrightarrow \quad T_2 = T_1\left(\frac{r v}{v}\right)^{\gamma-1} = T_1 r^{\gamma-1}$$

$$\Longrightarrow \quad P v^{\gamma} = cte \quad \Longrightarrow \quad P_2 = P_1\left(\frac{r v}{v}\right)^{\gamma} = P_1 r^{\gamma}$$

$r = 9$

$T_1 = 280\ \text{K}$

$P_1 = 40\ \text{kPa}$

$\gamma = 1.4$

$$\Longrightarrow \quad T_2 = 280 \cdot 9^{0.4} = 674.3\ \text{K}$$

$$\Longrightarrow \quad P_2 = 40 \cdot 9^{1.4} = 867.96\ \text{kPa}$$

combustión $\Longrightarrow$ $2 \rightarrow 3$

$$\Longrightarrow \quad T_{max} = T_3 = 2000\ \text{K}$$

b) $P_{max} = P_3$

Aire como gas ideal $\Longrightarrow$ $P v = \mathcal{R} T$

FísicaUC

$$v_3 = v_2 \Longrightarrow \frac{P_3}{T_3} = \frac{P_2}{T_2}$$

$$\Longrightarrow P_{\max} = \frac{T_3}{T_2} P_2 = \frac{2000}{674.3} 867.96 = 2574.4 \text{ kPa}$$

c) Calor transferido a volumen constante

$$\Longrightarrow q_c = \Delta u = c_v \Delta T = c_v (T_3 - T_2)$$

aire $\Longrightarrow c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

$$\Longrightarrow q_c = 0.718 \cdot (2000 - 674.3) = 951.8 \text{ kJ/kg}$$

d) eficiencia $\Longrightarrow \eta_{ter} = 1 - r^{1-\gamma} \Longrightarrow \eta_{ter} = 1 - 9^{-0.4} = 0.585$

Temperatura de salida $\Longrightarrow T_4$

$$\Longrightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{v}{rv} \right)^{\gamma - 1} = T_1 r^{1-\gamma} \Longrightarrow T_4 = 2000 \cdot 9^{-0.4} = 830.48 \text{ K}$$