7– Segundo Principio y Entropía

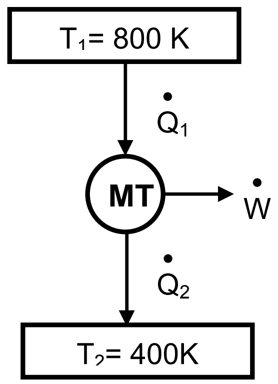
Ejercicio 7. 1

Una caldera entrega una potencia calórica de $\dot{Q}_1$ = 80000 kJ/h a la temperatura T_1= 800K a una máquina perfecta de Carnot, siendo la temperatura de la fuente fría T_2= 400 K Calcular:

a) La potencia obtenida del ciclo en kJ/h.

b) La potencia teórica en CV y en kW de la máquina

c) Cantidad de calor que se cede a la fuente fría en kJ/h. y en kW



Respuesta:

a) $\dot{W}$ = 40000 kJ/h

b) $\dot{W}$ = 15,1 CV. = 11,11 K

c) $\dot{Q}_2$ = 40000 kJ/h = 11,11 kW

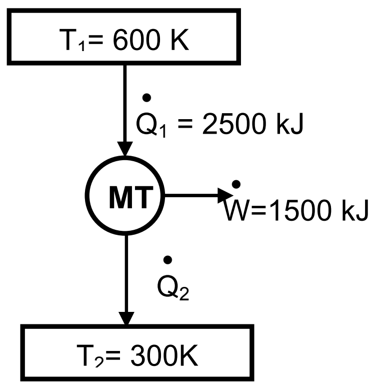
Ejercicio 7.2

Un inventor presenta una máquina que ha ideado , que funciona entre dos fuentes de temperaturas distintas, siendo T_1= 600 K (la temperatura de la fuente caliente) y T_2=300 K (la temperatura de la fuente fría). El calor proveniente de la fuente caliente Q_1 = 2500 kJ y el trabajo obtenido es de 1500 kJ. Demuestre por dos caminos distintos si aprueba esta máquina o no.

Respuesta:
La máquina no es aprobada porque contradice el Segundo Principio comprobado a través de:

1- El teorema de Carnot

2- El teorema de Clausius



Ejercicio 7.3

Una máquina térmica intercambia calor con tres fuentes. Las cantidades de calor en valores absolutos son:

Q_1=4000 kJ; Q_2=1500 kJ; Q_3=900 kJ, también las temperaturas de las fuentes son: T_1=1000 K; T_2=500 K y T_3=300 K .

Se pide:

a) El trabajo obtenido en la máquina W
b) Rendimiento térmico η_t

Respuesta:

a) W = 1600 kJ
b) $\eta_t = 0.4$

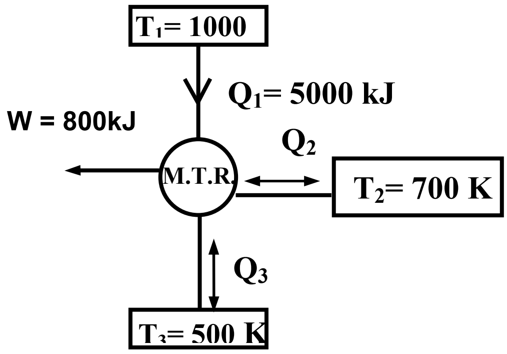
Ejercicio 7.4 - Resuelto en página 103

Una máquina térmica reversible intercambia calor con tres fuentes, las cuales se encuentran a $T_1 = 1000$ K, $T_2 = 700$ K y $T_3 = 500$ K respectivamente.

Al cabo de un cierto tiempo la máquina produjo un trabajo W = 800 kJ , habiendo recibido de la fuente a mayor temperatura una cantidad de calor $Q_1 = 5000$ kJ .

Determinar la cantidad y el sentido del calor que la máquina térmica reversible intercambió con las otras dos fuentes.

Respuesta:

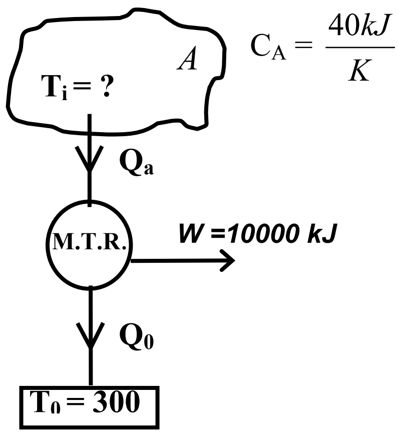


$Q_2 = -5950$ k J

$Q_3 = 1750$ k J

Ejercicio 7.5 - Resuelto en página 104

Una máquina térmica reversible que funciona entre un cuerpo A de capacidad calorífica $C_a = 40$ kJ / K y la atmósfera. La misma se encuentra a una temperatura $T_0 = 300$ K la cual permanece constante .El trabajo producido por la máquina térmica es de W = Se pide



Se pide:
Calcular la mínima temperatura inicial del cuerpo A

Respuesta

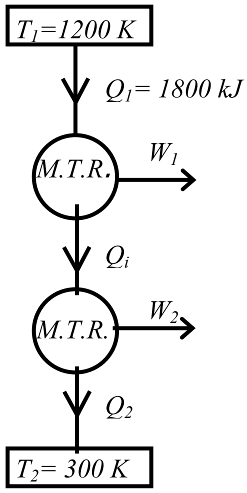
$T_A = 869{,}1$ K

Ejercicio 7. 6 - Resuelto en página 106

Dos máquinas de Carnot están conectadas en serie, entre dos fuentes de temperaturas. La de mayor temperatura, (fuente caliente) se halla a T_1=1200 K; y la de menor temperatura (fuente fría), se halla a T_2=300 K. La fuente caliente entrega un Q_1= 1800 kJ ; y ambas máquinas térmicas tienen el mismo rendimiento.

Calcular:

a) La temperatura intermedia entre la primera y segunda máquina.
b) El trabajo de cada máquina.
c) El calor que se entrega a la fuente fría.



Respuesta:

a) T_i = 600 K
b) W_1 = 900 kJ W_2 = 450 kJ
c) Q_2 = 450 kJ

Ejercicio 7. 7

Una máquina térmica reversible intercambia calor Q_1=4000 kJ y Q_2 =1600 kJ; las temperatura de la fuente fría es de T_2=500 K. Se pide:

a) El trabajo obtenido en la máquina W
b) Rendimiento térmico η_t
c) La temperatura de la fuente caliente T_1

Respuesta:

a) W = 2400 kJ
b) $\eta_t = 0{,}6$
c) T_1 = 1250 K

Ejercicio 7.8 - Resuelto en página 109

Una máquina térmica recibe 700 KJ de calor desde una fuente de alta temperatura T_1 =1100 K cediendo 500 KJ a una fuente de baja temperatura T_2= 310 K.
Demostrar si esta Máquina Térmica :

a) ¿ Viola la Segunda Ley ? .
b) ¿ Es reversible ?.
c) ¿Es irreversible ?.

Respuestas:

a) No viola la Segunda Ley ya que la variación de entropía del universo no es menor que cero.

b) No es reversible ya que la variación de entropía de universo no es nula.
c) Es irreversible ya que la variación de entropía del universo es mayor que cero.

Ejercicio 7.9

Una máquina térmica reversible opera entre dos cuerpos de igual capacidad calorífica: 10 kJ/ K; inicialmente están a distinta temperatura: $t_a = 927$ °C y $t_b = 27$ °C.
Calcular el trabajo mecánico producido hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Respuestas: W = 3000 kJ

Ejercicio 7.10

a) Escriba las expresiones usadas para calcular la variación de entropía de una masa m de gas ideal al pasar de un estado 1 al 2 , mediante una transformación cuasiestática. Expréselas en función de las variables: (T, p) , (T, v) , y (p, v)

b) Idem (a) , pero en una transformación no cuasiestática

Respuestas: tanto para a) y como para b)

$$\Delta s = c_P \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \qquad \Delta s = c_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$\Delta s = c_P \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + c_V \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Ejercicio 7.11

Determinar los cambios de entropía sufridos por los siguientes sistemas termodinámicos:

a. Una fuente térmica a $T_F = 600$°C que recibe 500 MJ de calor.

b. Una fuente térmica a $T_F = 600$°C que pierde 500 MJ de calor.

c. Un cuerpo de 6 kg, de calor específico constante c = 2,5 kJ/kg K que pierde 100 kJ de calor, inicialmente a 150 °C. Trazar a mano alzada la curva del enfriamiento del cuerpo en el diagrama T s .

d. Agua líquida que describe un ciclo termodinámico, pasando por estados de alta presión y temperatura, estados de vapor sobrecalentado y de hielo (sólido), partiendo y llegando a la misma presión y temperatura que la inicial.

Ejercicio 7.12

Una corriente de aire de 1000 kg/hora , en régimen estacionario, ingresa a un equipo en el estado $t_1 = 100$ °C y $p_1 = 100$ kPa, donde se calienta a presión constante hasta 300°C y luego se expande adiabáticamente hasta 10 bar, y finalmente se expande según una politrópica que lo deja a $t_4 = 100$ °C y $p_4 = 100$ kPa. Determinar la variación de entropía del sistema (o volumen de control).

Ejercicio 7.13

Una masa de 250 kg de agua es calentada desde 30 °C hasta 60°C (sin evaporación) a presión atmosférica mediante una resistencia eléctrica cuya masa se desprecia.

Determinar:

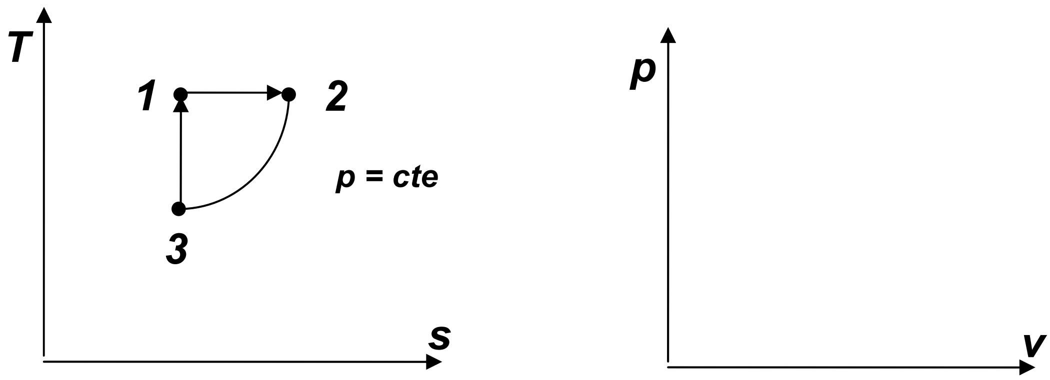
a. La variación de entropía del agua, de la resistencia, del medio y del universo.

b. La entropía generada.

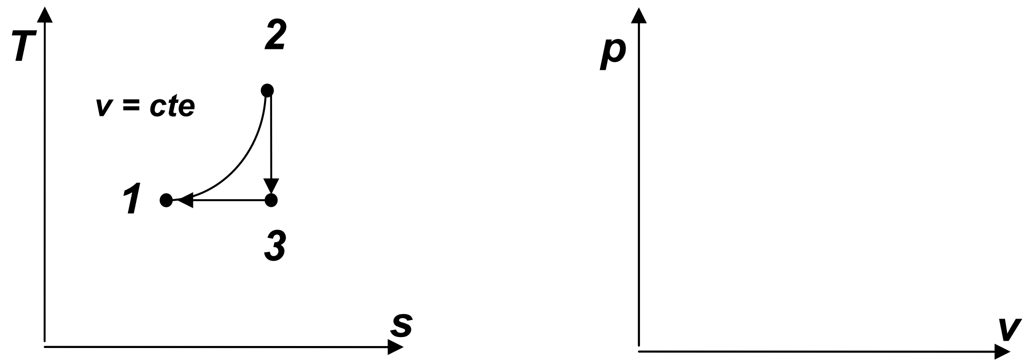
Ejercicio 7.14

Los siguientes ciclos representados en diagramas **T-s** , corresponden a evoluciones de gases perfectos. Dibújese un croquis de cada ciclo en el diagrama **p-v,** indicando cada estado con el mismo número con el que se denomina en el diagrama **T-s** .

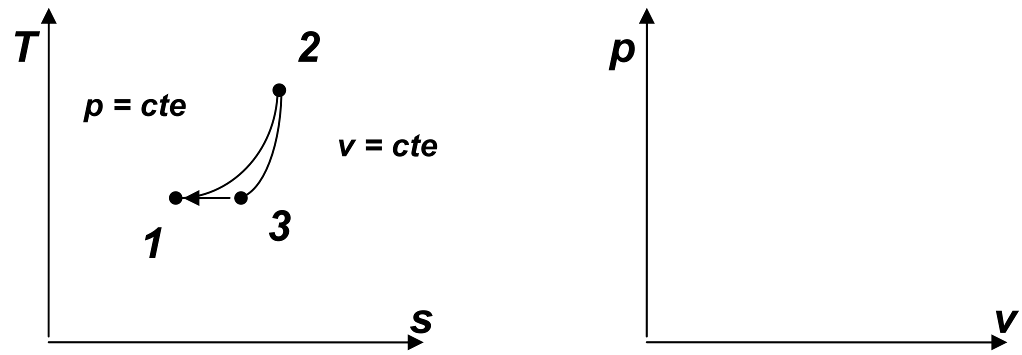
a)



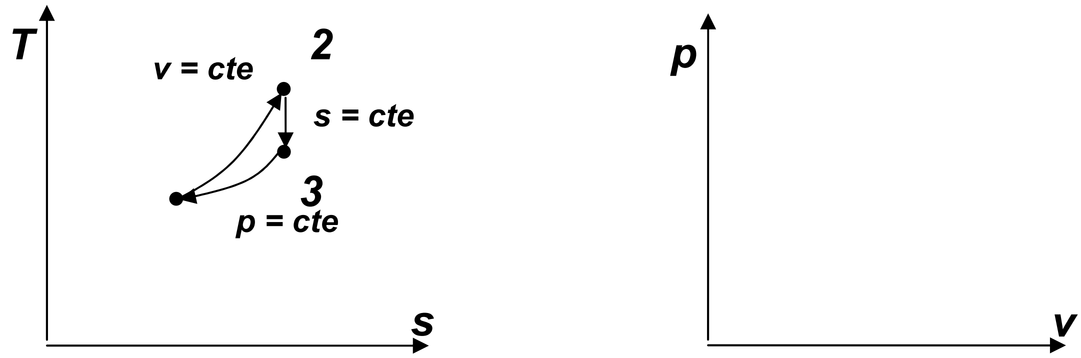
b)



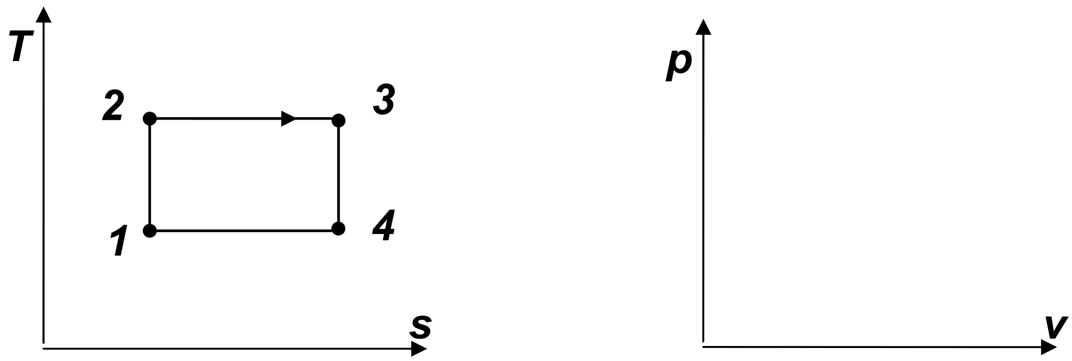
c)



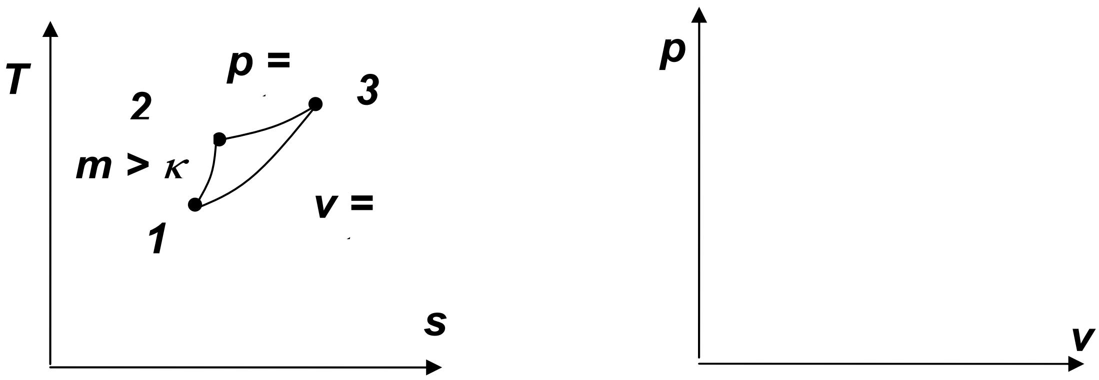
d)



e)



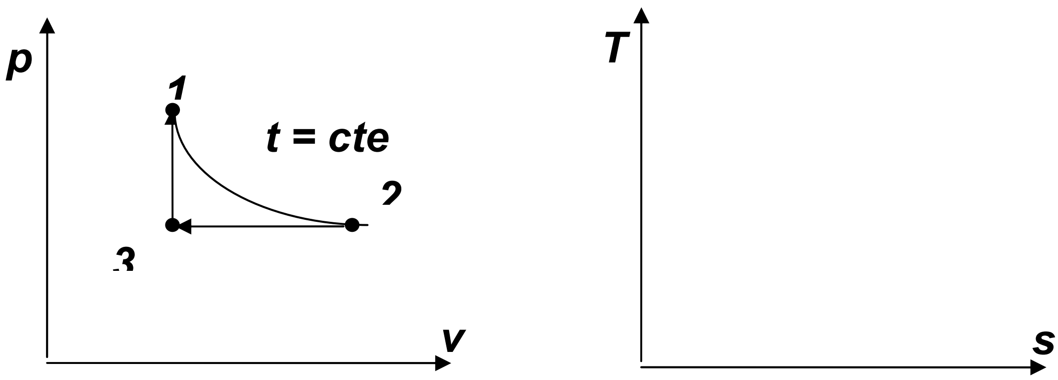
f)



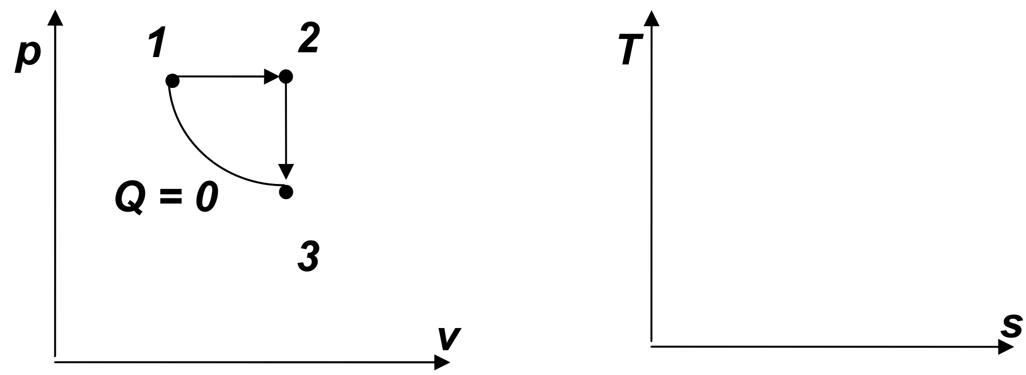
Ejercicio 7.15

Similarmente al ejercicio anterior, dibújense en el diagrama **T-s** , los ciclos representados en el **p-v** . Son gases perfectos.

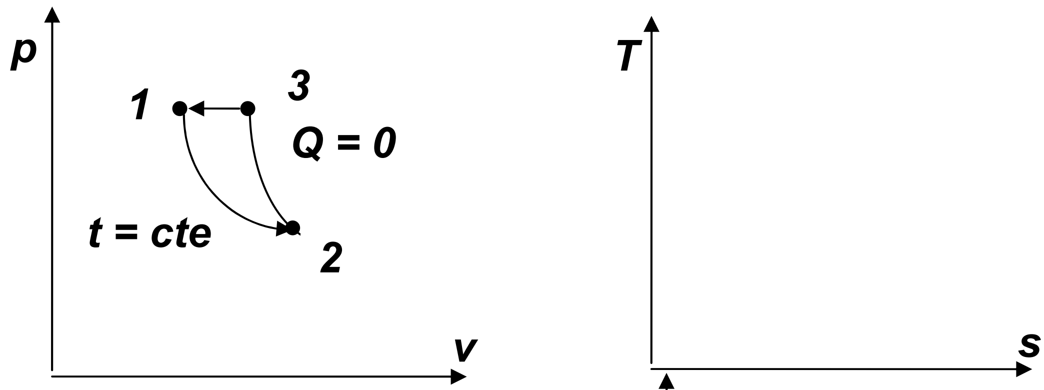
a)



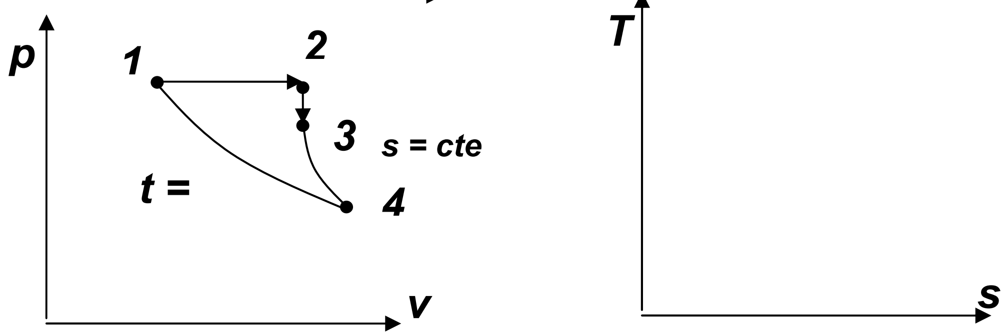
b)



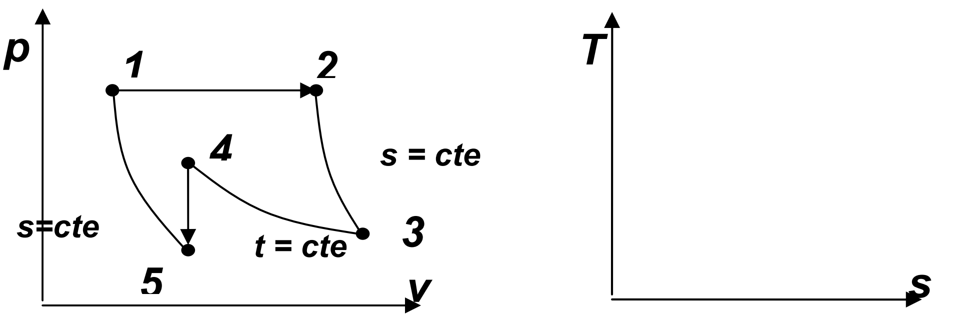
c)



d)



e)



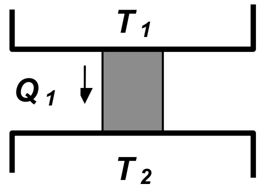
Ejercicio 7.16

Una fuente térmica a $\mathbf{T_1}$ = 600 **K** entrega calor a través de un conductor de cobre a otra fuente a $\mathbf{T_2}$ = 400 **K**. El flujo de calor es constante (en estado de régimen estacionario). Para una cantidad de calor de 1200 **kJ**, calcular la variación de entropía del universo, ΔSu, y de las fuentes.

Respuesta:

$\Delta S_u = 1$ kJ /K $\Delta S_{F\,1} = -2$ kJ / K

$\Delta S_{F\,2} = +\,3$ kJ / K



Ejercicio 7.17

a) Trazar a mano alzada un diagrama T-s para el agua, indicando:

1. la campana de vapor húmedo (línea de líquido y de vapor saturado seco),
2. el punto crítico
3. una isobara de 101,3 kPa , y una de 200 kPa
4. una isócora de 0,1 m^3/kg , y otra de 0,2 m^3/kg
5. una línea de título constante de 0,3 ,
6. una línea isoentálpica de h = 1000 kJ / kg , otra a 2700 kJ / kg y otra de 3000 kJ/kg
7. una isoterma de 100°C

b) Trazar a mano alzada el diagrama entalpía entropía (h-s) para el agua, indicando las mismas curvar pedidas en el punto anterior.

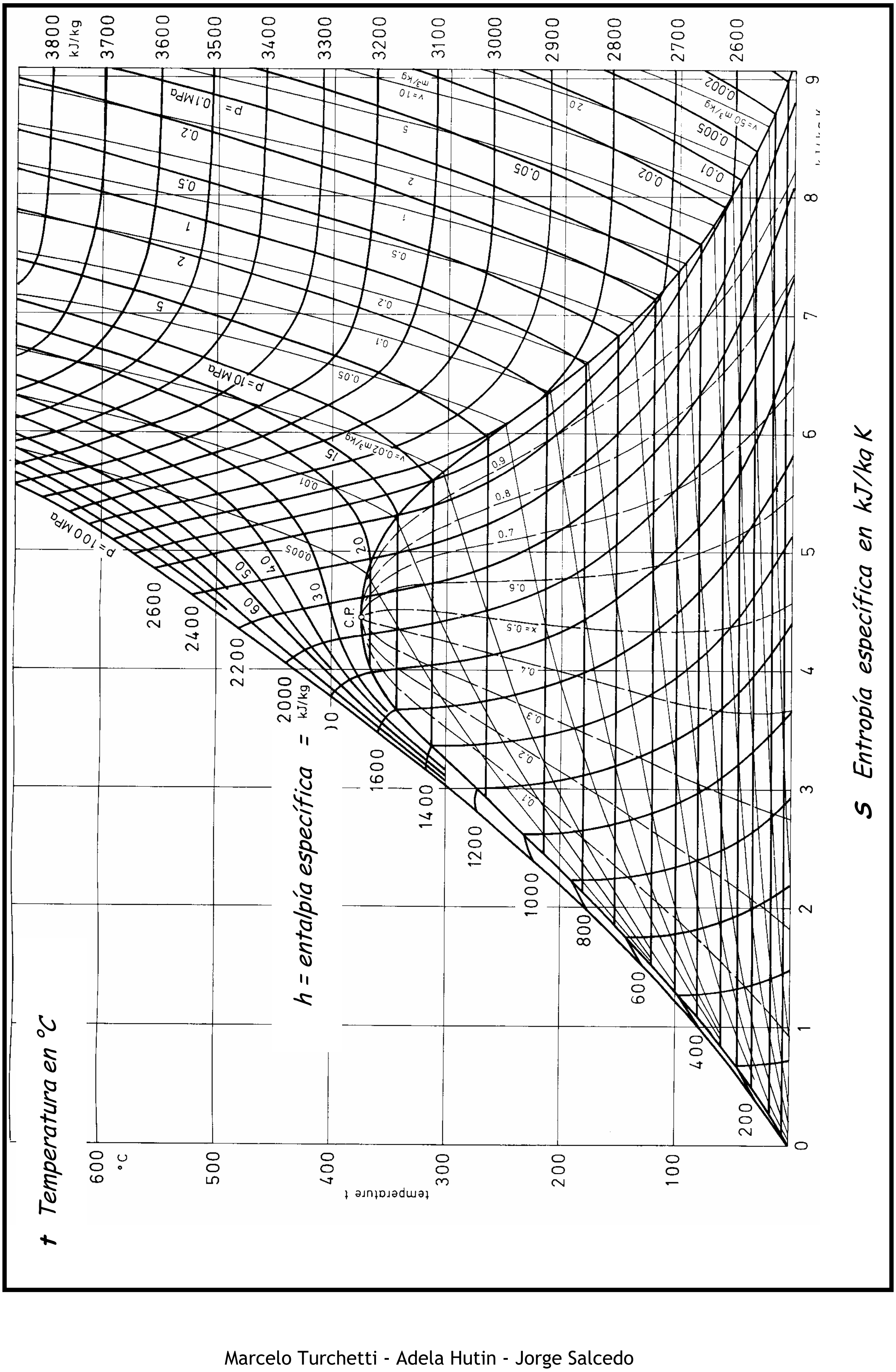
Ejercicio 7.18

En el cuadro siguiente se definen 12 estados distintos (1 a 11) más el de referencia (0) para el agua (H_2O). Debe completarse el cuadro con los parámetros faltantes de cada estado:

a) mediante el uso del diagrama **T-s** ,
b) mediante el uso de las tablas de vapor .
c) Representar en un diagrama T-s cada uno de los estados

	presión p	v. espec. v	temp. t	e. interna u	entalpía h	entropía s	título x	estado
	bar	m^3 / kg	°C	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K	–	
0					0	0		Líq. Sat.
1		0,120	30					
2	75	0,035						
3	1						0,5	V.húmedo
4			100				1	VSS
5			200			6		
6	12				2800			
7			320	2700				
8	20		40					
9								pto.crítico
10		s l v		s l v	s l v	s l v		línea triple
11	1,033		100				1	V. sat. seco

Diagrama temperatura - entropía (T - s) para el agua en SI



Respuestas

	presión p	v. espec. v	temp. t	e. interna u	entalpía h	entropía s	titulo x	estado
	bar	m^3 / kg	°C	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K	–	
0	0,00611	0,0010002	0,01	–0,00061 ≈ 0	0	0	–	Líq. saturado
1	0,04241	0,120	30	133,9	134,44	0,465	0,00361	V. húmedo
2	75	0,035	376,6	2818,3	3079,5	6,2994	–	Sobrecalentado
3	1	0,8475	99,63	1461,7	1546,48	4,331	0,5	Vapor húmedo
4	1,0135	1,6729	100	2506,5	2676,1	7,3549	1	VSS
5	15,5645	0,11431	200	2411,4	2588,58	6	0,8946	Vapor húmedo
6	12	0,166287	193,94	2600,7	2800	6,5562	–	Sobrecalentado
7	65,56	0,0348	320	2700	2926	6,1047	–	Sobrecalentado
8	20	0,0010069	40	167,1	169,2	0,5713	–	líq.subenfriado
9	221,2	0,00317	374,15	2037,25	2107,37	4,4429	–	punto crítico
10	0,006112	**s** 0,00109 **l** 0,00100 **v** 206,2	– 0,1	**s** -333,5 **l** -0,0006 **v** 2375	**s** -333,5 **l** 0 **v** 2501,	**s** -1,221 **l** 0 **v** 9,157	–	línea triple
11	1,033	1,673	100	2506	2676	7,3554	1	Vap.s.seco

Ejercicio 7.19 - Resuelto en página 110

Considérese un sistema compuesto por 10 kg de aire a 300K de temperatura, encerrado en un cilindro con pistón que provoca una presión de 10 bar, sobre el gas.

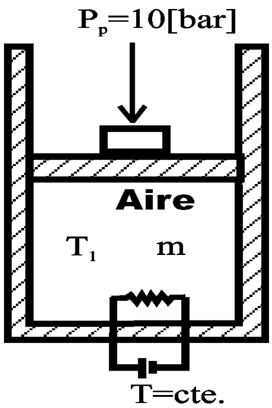
El cilindro y el pistón son perfectamente adiabáticos y además el desplazamiento del pistón se produce sin rozamientos.

Posteriormente mediante una resistencia eléctrica, se entrega al aire un trabajo de 1 kWh.

Sabiendo que la misma se encuentra en un estado de régimen, lo cual implica entre otras cosas que su temperatura permanece constante, se pide:

Determinar:

a) Estado final
b) Variación de entropía del aire
c) Variación de entropía del medio



d) Variación de entropía del Universo.

Respuestas:

a) $T_2 = 657K$ p_2=10 bar V_2=1,886 m^3
b) ΔSa = 6,9 kJ/K
c) ΔSm = 0
d) ΔSu = 6,9 kJ/K

Ejercicio 7.20

Un sistema compuesto por 200 g de aire se encuentra encerrado en un cilindro con un pistón inicialmente trabado y perfectamente conductores del calor. La presión inicial del aire es de 10 bar y la temperatura 300 K (igual a la temperatura del medio ambiente).
Posteriormente se sueltan las trabas, y el pistón cuyo peso es de 100 kg Suponiendo al proceso sin rozamientos y siendo la sección del cilindro S = 500 cm^2 , se pide:

a) Estado de equilibrio final
b) Variación de entropía del sistema
c) Variación de entropía del Universo.

Respuestas:

a) ΔSsist. = 0,124 kJ/K
b) ΔSmed = - 0,048 kJ/K
. c) ΔSu = 0,075 kJ/K

Ejercicio 7.21

Por una resistencia de 20 Ω , térmicamente aislada, circula una intensidad de corriente eléctrica de 10 A, durante 1 segundo. La temperatura inicial de la misma es de 10 **°C**, su masa es de 5 g y su calor específico es c = 850 J / kg °C .
Calcular:

a) La variación de entropía de la resistencia, ΔS_R .
b) Variación de entropía del universo, ΔSu .
c) Dibujar el diagrama T-s .

Respuestas:

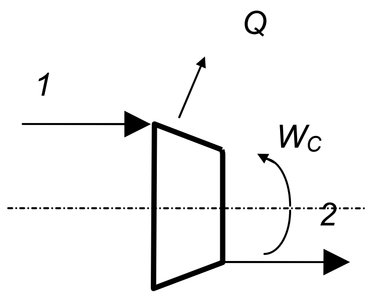
a) ΔS_R = 4,16 J / K
b) ΔSu = 4,16 J / K

Ejercicio 7.22 - Resuelto en página 112

En un cierto proceso industrial se comprimen 500 kg / h de vapor de agua desde un estado inicial de p_1 = 0,20 MPa y t_1 = 130 °C hasta una presión de p_2 = 0,5 MPa y t_2 = 180 °C. El calor transferido por el compresor al medio exterior (a 300 K) es de –50000 kJ / h. Las variaciones de energía potencial y cinética son despreciables.

Calcular:

a) La potencia requerida para accionar el compresor.
b) La variación de entropía del universo
c) Dibujar la evolución en un diagrama T s

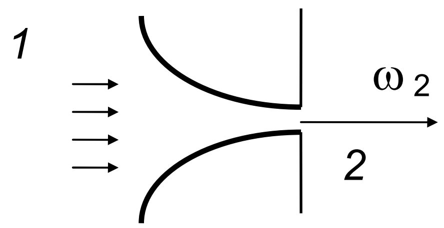


Respuestas:

a) $\dot{W}_{COMP} = -25{,}62$ kW . Potencia necesaria para accionarlo = +25,62 kW

b) $\Delta\dot{S}_U = 0{,}01659$ kW

Ejercicio 7.23 - Resuelto en página 114



Vapor ingresa a baja velocidad a la tobera adiabática de una turbina a p_1=25 bar (≅ 25 kg_f / cm^2) t_1=300 °C y sale de ella a una velocidad de ω_2 = 450 m / s , y a un presión p_2=10 bar . El flujo de vapor es de 1500 kg / h .

Calcular

a) el título o la temperatura del vapor que sale de la tobera y la sección de salida de la misma.
b) Decir si es posible la transformación indicada, y si lo es, decir si es reversible o irreversible

Respuestas:

a) Estado del vapor a la salida de la tobera: vapor sobrecalentado a t_2 = 235°C
b) La transformación es irreversible , ya que el vapor, adiabáticamente, aumenta su entropía.

Ejercicio 7.24

Una máquina térmica reversible intercambia calor con una masa de aire de 100 kg., la que se enfría a volumen constante de t_1=300 °C a t_2=30 °C . Siendo la temperatura de la atmósfera t_o= 30 °C = cte.

a) Calcular el trabajo entregado por la máquina.
b) b) El rendimiento de la máquina η_t .
c) La variación de entropía del Universo.

Respuestas:

a) W = 5475,3 kJ
b) η_t = 0,285
c) ΔSu = 0

Ejercicio 7.25

Se quiere mantener refrigerada una cámara a T_2=- 20°C = cte, para lo cual se le extrae una cantidad de calor Q_2 = 400 kJ/minuto. Si la atmósfera está a To = 40 °C, calcular:

a) ¿Cuál es la mínima potencia que consumirá el equipo frigorífico?
b) Calcular el coeficiente de efecto frigorífico ε_f ó (COP_f) .
c) Variación de entropía de cada fuente.
d) Variación de entropía del sistema, medio y del universo.

Respuesta:

a) W = 95 kJ/ min
b) ε_f = COP = 4,21
c) ΔS_{F1} = 1,58 kJ/ K. min ΔS_{F2} = - 1,58 kJ/ K. min
d) $\Delta S_{MF} = \Delta S_{SISTEMA}$= 0 $\Delta S_{FUENTES} = \Delta S_{MEDIO}$ = 0 $\Delta S_{UNIVERSO}$ = 0

Ejercicio 7.26

Un gas se mantiene a temperatura constante en un recipiente rígido y diatérmico. Recibe un trabajo W = 3765,6 kJ, a través de paletas giratorias y entrega una cantidad de calor Q a una fuente.
Si la temperatura del gas es igual a la temperatura de la fuente (T = 300 K).
Se pide:

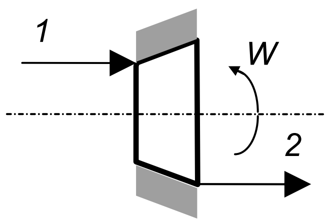
a) Analizar el proceso
b) Calcular la variación de entropía del gas
c) Calcular la variación de entropía de la fuente
d) Calcular la variación de entropía del Universo.

Respuestas:

b) ΔSg = 0
c) ΔSf = 12,55 kJ/K
d) ΔSu = 12,55 kJ/K

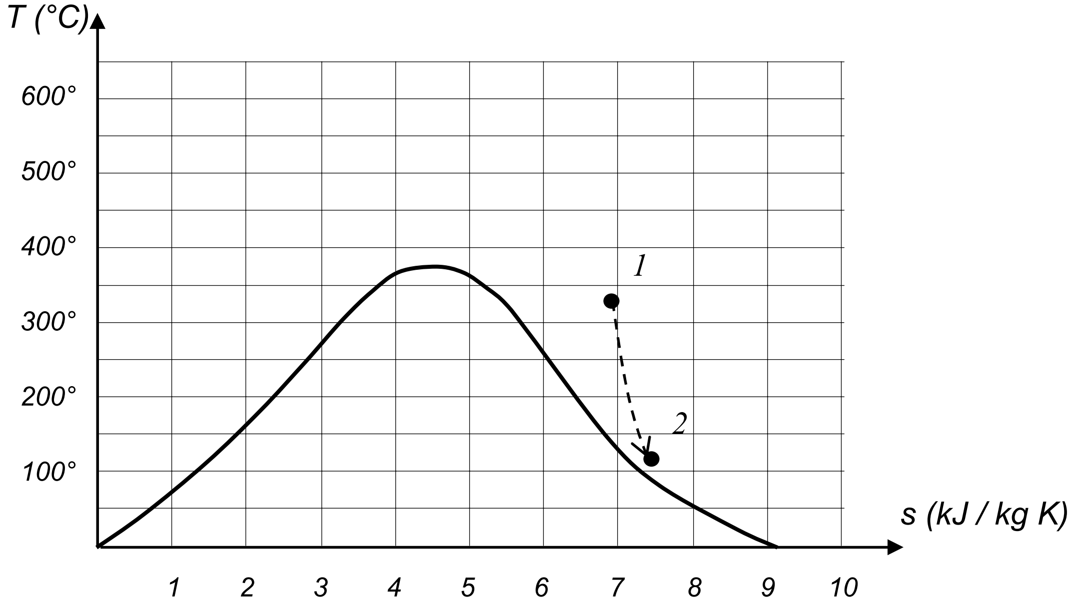
Ejercicio 7.27

Una turbina adiabática en régimen estacionario, recibe vapor de agua a 2000 kPa y 330 °C , y lo descarga a 101,3 kPa y 110 °C . Si circulan 240 kg / h , determinar la potencia producida, y el rendimiento isoentrópico. Dibujar el diagrama entrópico T - s.



Turbina adiabática

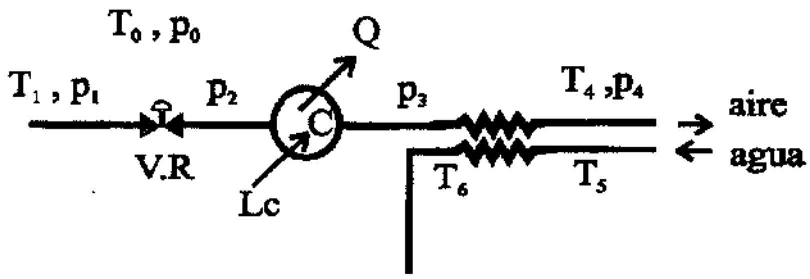
Respuestas: $\dot{W}$ = 26,5 kW η_{ISO} = 0,671



Ejercicio 7.28

Un sistema abierto en régimen permanente compuesto por 1000 m^3/h de aire que inicialmente se encuentra en las condiciones atmosféricas T_1 = 300 K y P_1=1 bar; es aspirado por un compresor previo pasaje por una válvula , a una presión de 0,5 bar, el trabajo entregado al compresor es de 150 CV, saliendo la misma con una presión de 10 bar
Posteriormente el aire es enfriado mediante agua de circulación, hasta 400 K; estando el agua inicialmente a la temperatura ambiente, y siendo su temperatura de salida del enfriador de 350 K. El calor disipado a través del compresor a la atmósfera es de 62760 kJ/h.
Se pide:

a) Determinar la temperatura de salida del aire del compresor y el caudal del agua de enfriamiento.
b) La variación de entropía del sistema.
c) La variación de entropía del medio.
d) La variación de entropía del universo.



Respuesta:

a) T_3 = 585,8K $\dot{m}$ = 1038 kg/h (masa de agua)
b) ΔS_{AIRE} = -431 kJ/Kh
c) ΔS_{MEDIO} = 879 kJ/Kh
d) ΔSu = 448 kJ/Kh

Ejercicio 7.29 - Resuelto en página 115

Una masa de 10 kg de aire contenida en un recinto rígido y adiabático, inicialmente a 300 K y a 1 bar, se lleva a 500 K de diferentes modos, casos 1 a 8. Se desea calcular para cada uno:

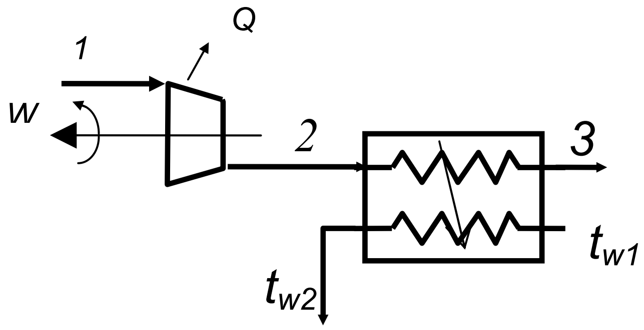
a) El calor aportado (Q).
b) La variación de energía interna (ΔU).
c) El trabajo suministrado (W).
d) La variaciones de entropía: ΔS_{SIST} , ΔS_{MED} y ΔS_{UNIV}

Casos:

1. Mediante trabajo aportado por un agitador
2. Mediante una resistencia eléctrica
3. 50% de la energía mediante un agitador y el otro 50_% con una fuente a 500K
4. Con una fuente a 600 K.
5. Con una fuente a 500 K.
6. 50% con una fuente a 400 K, y 50% con una fuente a 500 K,
7. con tres fuentes , a 380 K, 450 K y 500 K
8. Con infinitas fuentes a temperaturas crecientes

Ejercicio 7.30 - Resuelto en página 121

En un sistema de refrigeración en el cual el R 22 (Freon 22) es el fluido refrigerante, el vapor saturado ingresa al compresor a la temperatura t_1 = -10 °C y sale a p_2 = 10 bar y t_2 = 95 °C.



El flujo másico es $\dot{m} = 60 \frac{kg}{h}$ y la potencia entregada al compresor de 1,4 kW, .Saliendo del compresor, el refrigerante ingresa a un condensador enfriado por agua, saliendo como líquido saturado a p_3 = 10 bar .
El agua ingresa a t_{w1} = 20 °C y egresa a t_{w2} = 30 °C .
Calcular:

a) Calor $\dot{Q}_{COMP}$ transferido por el compresor.

b) Caudal másico de agua $\dot{m}_{H2O}$ requerido en el condensador.

Respuestas:

a) $\dot{Q}_{COMP} = -\,0{,}2517$ kW

b) $\dot{m}_{H2O} = 82{,}4$ kg /h

Ejercicio 7.31

Un kg de agua a 1 MPa y t_1 = 30°C se calienta a presión constante hasta convertirse en vapor sobrecalentado con un sobrecalentamiento de 100 °C (100°C de sobrecalentamiento significa que la temperatura es igual a la suma de la temperatura de saturación correspondiente a esa presión, más 100°C). El calor para producir esta transformación proviene de una fuente cuya temperatura es de 1500 K.

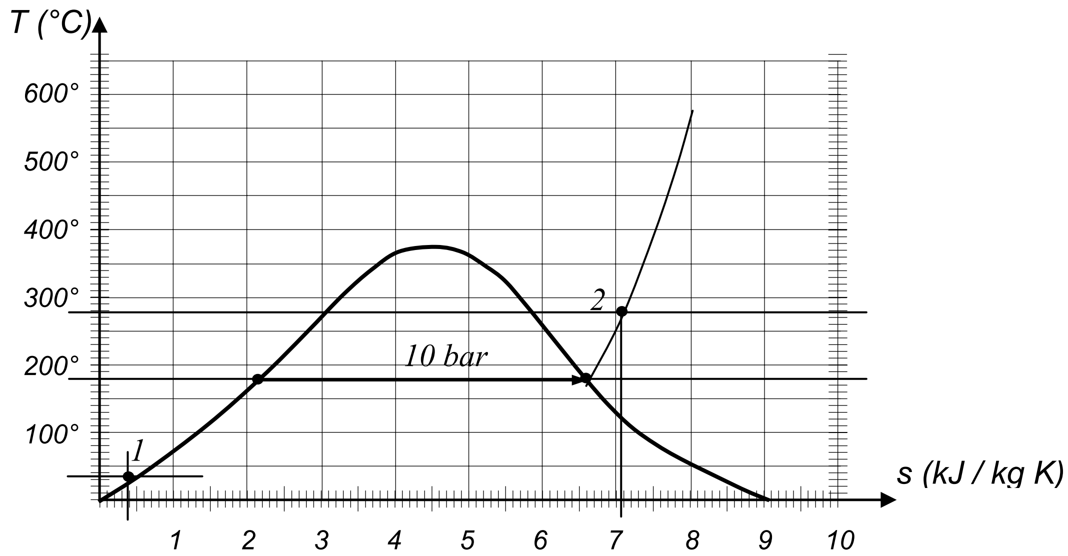
a) Representar la transformación en un diagrama T-s .

b) Calcular las variaciones de entropía del sistema, ΔS_S , y del universo, ΔS_U.

c) Idem (b) si el proceso para vaporizar el agua entre los mismos estados (final e inicial) hubiera sido reversible.

Respuestas:

a)



b) ΔS_S = 6,61 kJ / K ΔS_U = 4,69 kJ / K

c) ΔS_S = 6,61 kJ / K ΔS_U = 0

Ejercicio 7.32

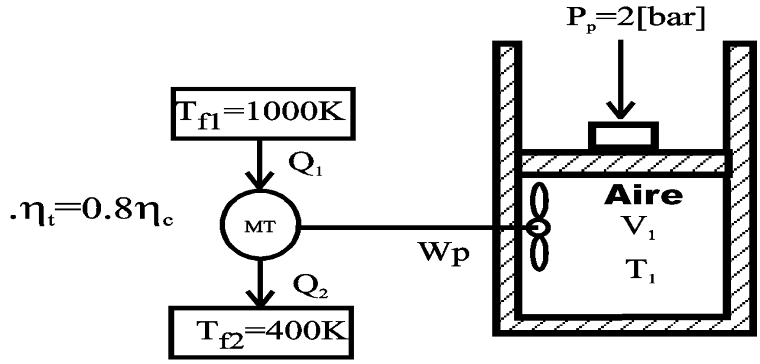
Una máquina térmica η_t =0,8 η_c (0,8 de Carnot) funciona entre 2 fuentes de calor; cuyas temperaturas son T_{f1} = 1000 K y T_{f2} = 400 K. Esta máquina entrega un Wpaletas = 2130 kJ, a un cilindro adiabático que contiene aire en las condiciones iniciales t_1=27 °C; V_1 = 5 m^3 y p_p= 2 bar (presión de pistón) .

Se pide:

a) Calcular rendimiento de la máquina η_t ; Q_2.

b) T_f ; V_f ; $W_{pistón}$

c) Variación de entropía del Universo (ΔSu).



Respuesta:

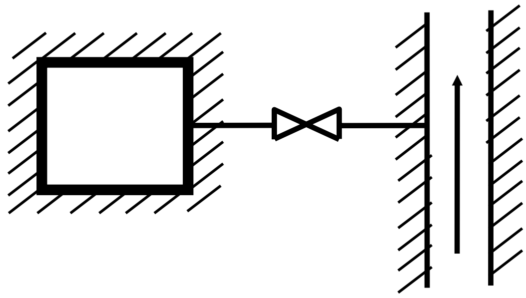
a) η_t =0,48

Ejercicio 7.33 - Resuelto en página 122

En una cañería circula aire a una presión de 20 kg_f/cm^2 y a una temperatura de 57 °C, parámetros que se mantienen constantes. Se comunica a la cañería con un tanque rígido y adiabático de 10 m^3 de capacidad que inicialmente contiene aire a una presión p_1=1 bar y una temperatura t_1 = 27 °C. Calcular para el equilibrio mecánico:

a) Masa de aire que ingresa al tanque y temperatura final del aire en el tanque.

b) Variación de entropía del aire.



Respuesta:

a) m_E = 144 kg

T_F = 439 K = 166°C

b) $\Delta S_{AIRE} = 35{,}88 \frac{kJ}{K}$

Ejercicio 7.34 - Resuelto en página 126

Dentro de un cilindro adiabático cerrado por un pistón adiabático se encuentra una masa de aire a una presión de 1 bar y a una temperatura de 27 °C, ocupando un volumen de 10 m^3. Se abre una válvula y se introduce una masa m de aire a una presión p_1 = 4 bar y una temperatura de 50 °C . Al introducir esta masa se eleva el pistón, y éste choca con unos topes siendo el volumen final V_F = 20 m^3 y p_F = 3 bar. Luego de que esto sucede, al instante se cierra la válvula.

Se pide calcular

a) La temperatura final T_F y la masa m que ingresa.
b) La variación de entropía del aire.

Respuestas:

a) m_E = 40,7 kg ; T_F = 393,8 K
b) b) $\Delta S_{AIRE} = 10{,}99 \dfrac{kJ}{K}$

Ejercicio 7.35 - Resuelto en página 129

Por una turbina adiabática circulan 418,4 kg / h de aire, en régimen estacionario. El gas entra a 450 °C y 3,6 MPa y sale a una presión de 0,12 MPa .

Representar en un diagrama T-s , Determinar la temperatura de descarga de la turbina y la potencia producida para los siguientes casos:

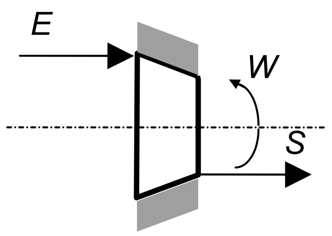
a) Proceso reversible.
b) Proceso irreversible con un rendimiento isoentrópico (o adiabático) de expansión de 0,88 .

Respuestas:

a) $\dot{W}$ = 12,6 kW T_2 = 273,6 K

b) $\dot{W}$ = 11,07 kW T_2 = 327

Ejercicio 7.36 - Resuelto en página 130



C. adiabático ; η_i = 0,75

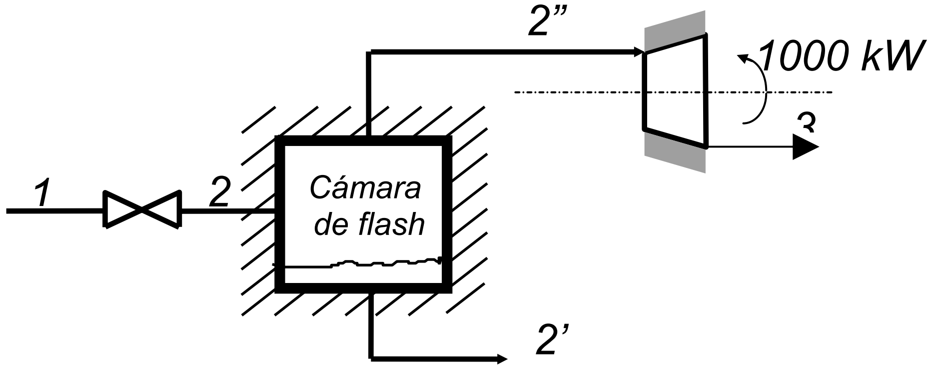
Un turbocompresor adiabático en régimen estacionario, aspira oxígeno a 3 bar y −12 °C , entregándolo a la presión de 6 bar. El rendimiento adiabático (o isoentrópico) del compresor es de 0,75 . Determine la potencia por unidad de masa de oxígeno, y represente el proceso de compresión en un diagrama T-s .

Respuesta: W = – 69,4 kJ / kg

Ejercicio 7.37

Agua líquida a p_1=10 MPa y t_1=250 °C ingresa a una cámara "flash" a p_2=2500 kPa en donde se separa el vapor generado del líquido. El vapor ingresa a una turbina adiabática que genera una potencia de 1000 kW. El vapor sale de la turbina a una presión p_3 =101,3 kPa . El rendimiento isoentrópico de la turbina es de η = 0,8 . Se pide:

a) Representar el proceso en un diagrama T-s .
b) Calcular el flujo de agua que debe ingresar a la cámara de "flash".
c) Variación de entropía en la cámara de "flash" ΔS_F , y en la turbina ΔSa_T .
d) Indicar los procesos irreversibles presentes.



Respuestas: a) $\dot{m}_1 = 34{,}77\ \frac{kg}{s}$ $\Delta\dot{S}_F = 0$ c) $\Delta\dot{S}_T = 0{,}6698\ \frac{kW}{K}$

Ejercicio 7.38

Dos calderas entregan vapor de agua a la misma tubería a $p_l = 2{,}5$ MPa. La producción de una es de $\dot{m}_a = 4090$ kg / h con un título $x_a = 96$ % . La otra produce $\dot{m}_b = 5450$ kg / h a $t_b = 230$ °C.
Determinar:

a) El estado de mezcla.
b) Variación de entropía del vapor, ΔSv
c) ¿El proceso es reversible? ¿por qué?

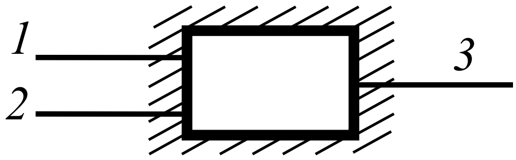
Respuestas:

a) Estado de mezcla: vapor húmedo $t_M = 224$°C $x_M = 0{,}989$
b) $\Delta S_V = 1{,}214$ kJ / K

Ejercicio 7.39

Para la alimentación de agua a una caldera se dispone de un calentador de mezcla, al que ingresa agua a $t_l = 25$ °C y $p_l = 1000$ kPa , y vapor de escape a $p_2 = 1000$ kPa y $x_2 = 0{,}9$; la cantidad de vapor por cada kg de agua que ingresa a la caldera es la necesaria para que la mezcla tenga 90 °C.

Calcular
a) la cantidad de vapor necesaria,
b) la variación de entropía del proceso; todo por unidad de masa de agua de alimentación a la caldera.
c) ¿El proceso es reversible? ¿por qué?



Respuestas:

a) $\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} = 0{,}11$ b) $\frac{\Delta\dot{S}_V}{\dot{m}_3} = 0{,}1895\ \frac{kJ}{K\ kg}$

Ejercicio 7.40

Un recipiente adiabático está dividido por un pistón adiabático, sin fricción y de peso despreciable en dos recintos. Inicialmente el pistón se encuentra en su posición extrema superior estando el recinto inferior ocupado por m_v = 10 kg de vapor de agua húmedo a una presión inicial p_{iv} = 1 bar y un título inicial de x_i = 80 %. El recinto superior está conectado mediante una cañería a un compresor que toma aire del exterior según se muestra en el esquema adjunto.

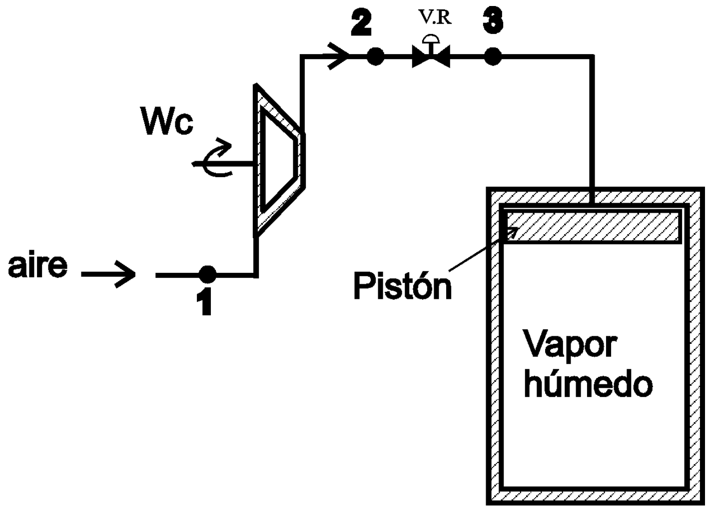
El aire a la presión p_1 = 1 bar y T_1 = 300 K es comprimido hasta una presión p_2 = 50 bar que es mantenida constante para pasar luego a través de una válvula adiabática que provoca una caída de presión hasta la presión p_3 que es igual a la presión reinante en el recinto superior p_a. El pistón empujado por el aire entrante al recinto superior comprime reversiblemente el vapor contenido en el recinto inferior.

La compresión se realiza hasta que el vapor húmedo se convierte en vapor saturado a la presión final correspondiente.

Se pide calcular:

a) Temperatura final del aire dentro del cilindro T_{fa}.
b) Trabajo entregado al agua y trabajo W_C entregado al aire por el compresor.
c) Variación de entropía del universo (Aire y H_2O).
d) Diagrama T-S.
e) Conclusiones.

Suponer que el aire se comporta como gas ideal y que la compresión en el compresor es adiabática reversible (ideal).



Ejercicio 7.41

Una masa de 5 kg/s de refrigerante R134a , se comprime adiabáticamente desde p_1 = 700 kPa y t_1 = 30 °C hasta p_2 = 1400 kPa en un proceso de de flujo de régimen estacionario. La entropía aumenta en 0,1265 kJ/K s debido a las irreversibilidades. Suponiendo que la variaciones de energía cinética y potencial son despreciables, calcular:

a) Temperatura final de la compresión t_2
b) Potencia de compresión
c) Rendimiento isoentrópico del compresor, η_C .

Respuestas:

a) $t_2 = 65°C$ b) $\dot{W}_C = -115$ kW c) $\eta_C = 63,3\%$

Ejercicio 7.42

Dentro de un cilindro cerrado por un pistón sin rozamiento hay inicialmente una masa de aire mi a una temperatura ti = 50°C y a una presión de 1000 kPa. Ingresan dos masas de aire, una $m_1 = 10$ kg a $t_1 = 20°C$ y otra $m_2 = 3$ kg a $t_1 = 35°C$, sale otra masa a $m_3 = 12$ kg a t_3 desconocida. Se entrega calor al cilindro desde una fuente a 1000 K . El volumen inicial del cilindro es de 1 m^3 y el final es del doble. La temperatura de salida t_3 es igual a la final t_F dentro del cilindro.

Calcular:

a) La temperatura final de la masa de aire que queda dentro del cilindro.
b) La cantidad de calor entregada por la fuente.
c) Variación de entropía del aire y del universo
d) Decir si el proceso fue reversible o no y en caso afirmativo, describir los procesos reversibles.

Respuestas:

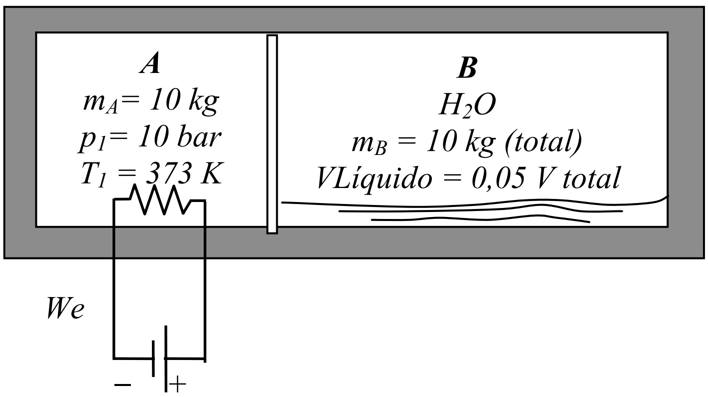
a) $t_F = 316°C$ b) Q = 6710 kJ
c) $\Delta S_{AIRE} = 15,36$ kJ / K $\Delta S_U = 8,64$ kJ / K
d) Es irreversible. Las causas son: la transferencia de calor con salto térmico finito, y la mezcla del aire a diferentes temperaturas.

Ejercicio 7.43

En el dispositivo indicado en el esquema, se entrega energía al aire contenido en el recipiente rígido A. Éste se encuentra separado del recinto B mediante una pared rígida y conductora del calor. Las temperaturas en A y en B varían pero son siempre iguales entre sí. En el estado final la masa de líquido que queda es la mitad de las que había inicialmente. Se sugiere utilizar el diagrama T-s ó el h-s para evitar hacer largas iteraciones con tablas.

Se pide calcular:

a) Energía eléctrica entregada al aire.
b) Variación de entropía del universo.
c) Diagrama T-S para el aire del proceso.
d) Diagrama T-S para el vapor del proceso.
e) ¿El proceso es reversible? ¿por qué?

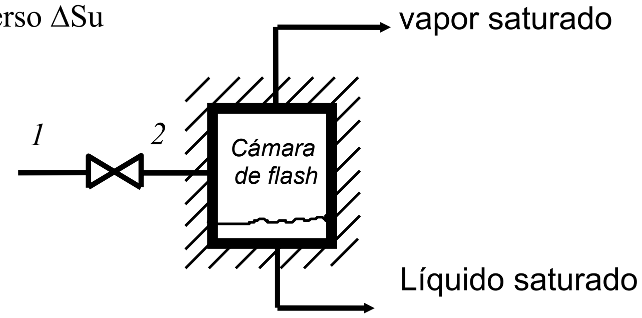


Ejercicio 7.44 - Resuelto en página 131

Agua en estado "1" de líquido comprimido, pasa por una válvula y luego entra a una cámara adiabática en donde se separa el líquido del vapor (denominada cámara de "flash").

Calcular:

a) La cantidad necesaria de agua en el estado "1" para obtener una producción de vapor de 1000 kg / h .
b) La variación de entropía de la cámara "flash" ΔS_{CF}
c) La variación de entropía del universo ΔS_u
d) Representar en un diagrama T-s .



Datos:

$p_1 = 16$ MPa
$t_1 = 310$ °C
$p_{CF} = 24$ bar

Respuestas: a) $\dot{m}_L = 4190 \ \frac{kg}{h}$ c) $\Delta \dot{S}_U = 0{,}1227 \ \frac{kW}{K}$

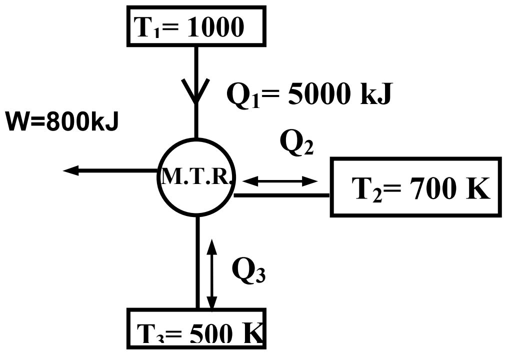
Ejercicio resueltos

Ejercicio 7.4

Una máquina térmica reversible intercambia calor con tres fuentes, las cuales se encuentran a T_1 = 1000 K, T_2 = 700 K y T_3 = 500 K respectivamente.

Al cabo de un cierto tiempo la máquina produjo un trabajo W = 800 kJ , habiendo recibido de la fuente a mayor temperatura una cantidad de calor Q_1= 5000 kJ .

Determinar la cantidad y el sentido del calor que la máquina térmica reversible intercambió con las otras dos fuentes.



Solución:

Por el primer principio de la Termodinámica:

$$Q - W = \Delta U$$

$\Delta U = 0 \Rightarrow$ *por ser* ΔU *función de estado y la máquina térmica reversible cíclica*

$$W = \sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 \qquad (1)$$

Por el teorema de Clausius:

$$\oint_R \frac{\delta Q}{T} = 0 \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = 0 \qquad (2)$$

De (1):

$$800kJ = 5000kJ + Q_2 + Q_3$$

$$Q_2 = -4200kJ - Q_3 \qquad (3)$$

De (2):

$$\frac{5000kJ}{1000K} + \frac{Q_2}{700K} + \frac{Q_3}{500K} = 0 \qquad (4)$$

Reemplazando (3) en (4):

$$\frac{5kJ}{K}-\frac{4200kJ}{700K}-\frac{Q_3}{700K}+\frac{Q_3}{500K}=0$$

$$\frac{5kJ}{K}-\frac{6kJ}{K}+\frac{Q_3}{1750K}=0$$

$$Q_3=\frac{1kJ}{K}\cdot 1750K$$

El calor intercambiado con la fuente 3 será:

$$Q_3=1750kJ$$

Reemplazando en (3) :

$$Q_2=-4200kJ-Q_3$$

El calor intercambiado con la fuente 2 será:

$$Q_2=-5950kJ$$

Respuesta:

a- Q_2 = - 5950 k J

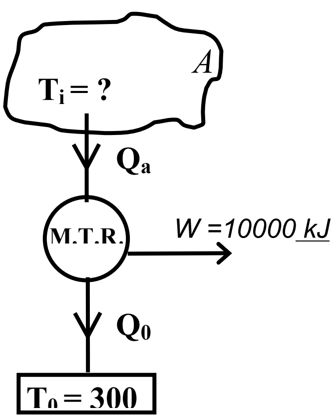
b- Q = 1750 k J

Ejercicio 7.5

Una máquina térmica reversible que funciona entre un cuerpo A de capacidad calorífica C_a = 40 kJ / K y la atmósfera. La misma se encuentra a una temperatura T_0 = 300 K la cual permanece constante .El trabajo producido por la máquina térmica es de W= 10000 kJ .
Se pide:

Calcular la mínima temperatura inicial del cuerpo A

Solución:



Por el segundo principio para una máquina térmica reversible:

$$W=Q_a-Q_0$$

$$W=C_a\cdot(T_a-T_0)-Q_0 \quad (1)$$

Por ser MTR:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

$$\frac{Q_0}{T_0} + \int_{T_a}^{T_0} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\frac{Q_0}{T_0} + \int_{T_a}^{T_0} C_a \cdot \frac{dT}{T} = 0$$

$$\frac{Q_0}{T_0} + C_a \cdot \ln \frac{T_0}{T_a} = 0$$

$$Q_0 = -T_0 \cdot C_a \cdot \ln \frac{T_0}{T_a}$$

De (1) se obtiene:

$$10000kJ = C_a \cdot (T_a - T_0) + T_0 \cdot C_a \cdot ln\left(\frac{T_0}{T_a}\right)$$

$$10000kJ = C_a \cdot T_A - C_a \cdot T_0 + T_0 \cdot C_a \cdot \ln\left(\frac{T_0}{T_A}\right)$$

$$10000kJ = \frac{40kJ}{K} \cdot T_A - \frac{40kJ}{K} \cdot 300K + 300K \cdot \frac{40kJ}{^\circ K} \cdot \ln\left(\frac{300K}{T_A}\right)$$

$$10000kJ = \frac{40kJ}{K} \cdot T_A - 12000kJ + 12000kJ \cdot \ln\left(\frac{300K}{T_A}\right)$$

$$10000kJ = \frac{40kJ}{K} \cdot T_A - 12000kJ + 12000kJ \cdot \left[1 - \ln\left(\frac{300K}{T_A}\right)\right]$$

Mediante tanteo se obtiene la temperatura inicial T_A:

$$T_A = 869{,}10K$$

Respuesta:

T_A = 869,1 K

Ejercicio 7. 6

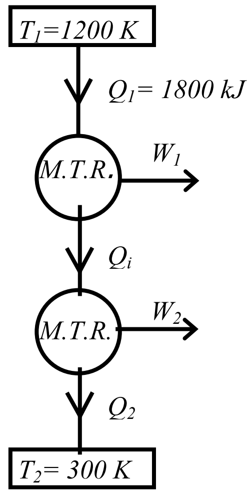
Dos máquinas de Carnot están conectadas en serie, entre dos fuentes de temperaturas. La de mayor temperatura,(fuente caliente) se halla a T_1=1200 K; y la de menor temperatura (fuente fría), se halla a T_2=300 K. La fuente caliente entrega un Q_1= 1800 kJ ; y ambas máquinas térmicas tienen el mismo rendimiento.

Calcular:

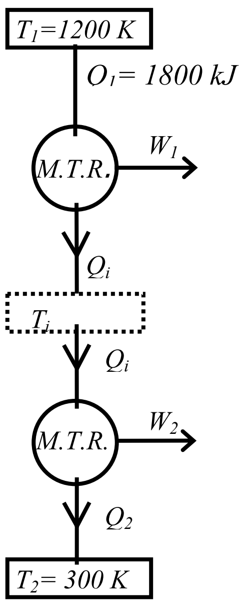
a) La temperatura intermedia entre la primera y segunda máquina.

b) El trabajo de cada máquina.

c) El calor que se entrega a la fuente fría.



Solución:



$$\eta_{t1} = \eta_{t2}$$

Tomamos como sistema a la máquina térmica, de manera que esta entrega trabajo al medio.
Partiendo de que es una máquina térmica reversible :

a) Se sabe que $\eta_{t1} = \eta_{t2}$, entonces por el teorema de Carnot para cualquier máquina térmica reversible será:

$$\eta_{t1} = \eta_{t2}$$

$$1 - \frac{T_i}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_i}$$

Despejando, obtenemos la temperatura intermedia:

$$T_i^2 = T_1 \cdot T_2$$

$$T_i = T_1 \cdot T_2 = \sqrt{1200K \cdot 300K} = 600K$$

b) El rendimiento térmico de la primer máquina térmica reversible es igual a:

$$\eta_{t1} = 1 - \frac{T_2}{T_i} = 1 - \frac{300K}{600K} = 0,5$$

El trabajo realizado por la máquina 1 va a ser:

$$W_1 = Q_1 \cdot \eta_{t1} = 1800KJ \cdot 0,5 = 900KJ$$

El calor intermedio entre las dos máquinas será:

$$W_1 = Q_1 - Q_i$$

$$Q_i = Q_1 - W_1 = 1800KJ - 900KJ = 900KJ$$

El trabajo de la máquina 2 va a ser:

$$W_2 = Q_i \cdot \eta_{t1} = 900KJ \cdot 0,5 = 450KJ$$

c) El calor que se entrega a la fuente fría será:

$$W_2 = Q_i - Q_2$$

$$Q_2 = Q_i - W_2 = 900kJ - 450kJ = 450KJ$$

Otra forma de resolverlo, sin calcular la temperatura intermedia:

$$\frac{W_1}{Q_1} = \frac{W_2}{Q_i}$$

Reemplazando $W_1 = Q_1 - Q_i$:

$$\frac{Q_1 - Q_i}{Q_1} = \frac{W_2}{Q_i}$$

Despejando W_2 :

$$W_2 = Q_i - \frac{Q_i^2}{Q_1}$$

Reemplazando W_1 y W_2 en el rendimiento térmico total :

$$\eta_{tT} = \frac{W_1 + W_2}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_i + Q_i - \dfrac{Q_i^2}{Q_1}}{Q_1}$$

$$\eta_{tT} = 1 - \frac{Q_i}{Q_1} + \frac{Q_i}{Q_1} - \frac{Q_i^2}{Q_1^2}$$

$$\frac{Q_i^2}{Q_1^2} = 1 - \eta_{tT}$$

Despejando Q_i :

$$Q_i = \sqrt{(1 - \eta_{tT}) \cdot Q_1^2}$$

Reemplazando Q_i en el rendimiento térmico de la máquina 1:

$$\eta_{t1} = 1 - \frac{\sqrt{(1 - \eta_{tT}) \cdot Q_1^2}}{Q_1^2} = 1 - \sqrt{1 - \eta_{tT}}$$

$$\eta_{t1} = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

El rendimiento térmico de la primer máquina térmica reversible es igual a:

$$\eta_{t1} = 1 - \sqrt{\frac{300K}{1200K}} = 0,5$$

Los puntos b y c se calcularán procediendo de la misma forma mostrada anteriormente.

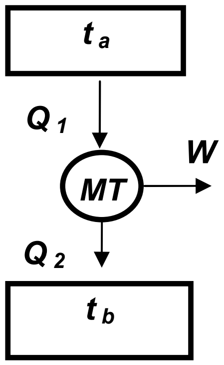
Respuesta:

a - T_i = 600 K b - W_1 = 900 kJ W_2 = 450 kJ c -Q_2 = 450 kJ

Ejercicio 7.8

Una máquina térmica reversible opera entre dos cuerpos de igual capacidad calorífica: 10 kJ/ K; inicialmente están a distinta temperatura: t_a = 927 °C y t_b = 27 °C.
Calcular el trabajo mecánico producido hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Solución:

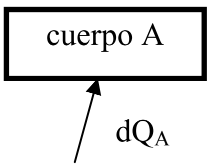


Los cuerpos tienen capacidad térmica finita, y al entregar calor, baja su temperatura, y cuando lo reciben, aumenta. El cuerpo A disminuirá su temperatura mientras que el B la aumentará, hasta que las temperaturas se igualen entre sí.

Los calores Q_1 y Q_2 no son iguales, por lo que la temperatura final de equilibrio no será la semisuma de las iniciales.

Por ser la máquina térmica reversible se deberá cumplir que la generación de entropía es nula:

$$S_{GEN} = \Delta Su = 0$$



Cuerpo A . Debemos aplicar la definición $dS = (dQ/T)_{REV}$ para el cuerpo de capacidad calorífica finita.

Independientemente de cómo sea el signo del calor en problema, para el cálculo de la variación de entropía debemos respetar la convención de los signos en que el calor positivo es entrante (caso contrario debería definirse $dS = -\,dQ/T$)

$$dS_A = dQ_A/T$$

$$dQ_A = C_A\, dT_A$$

$$\Delta S_A = \int_{T_{AI}}^{T_F} \frac{dQ_A}{T} = \int_{T_{AI}}^{T_F} \frac{C_A\, dT}{T} = C_A \ln \frac{T_F}{T_{AI}}$$

Cuerpo B:

Del mismo modo que con el otro cuerpo:

$$\Delta S_B = C_B \ln \frac{T_F}{T_{BI}}$$

Máquina térmica:

$\Delta S_{MTR} = 0$ es nula por ser máquina térmica que describe ciclos de trabajo, o sea que por no variar su energía interna.

Finalmente, sumando las variaciones parciales de entropía se establece la siguiente ecuación:

$$\Delta S_U = 0$$

$$\Delta S_A + \Delta S_B + \Delta S_{MTR} = 0$$

$$0 = C_A \ln \frac{T_F}{T_{AI}} + C_B \ln \frac{T_F}{T_{BI}} + 0$$

y siendo $C_A = C_B$ resulta

$$0 = \ln \frac{T_F}{T_{AI}} + \ln \frac{T_F}{T_{BI}}$$

$$\ln \frac{T_F}{T_{AI}} = -\ln \frac{T_F}{T_{BI}} = \ln \frac{T_{BI}}{T_F}$$

$$\frac{T_F}{T_{AI}} = \frac{T_{BI}}{T_F}$$

$$T_F = \sqrt{T_{AI}\ \ T_{BI}} = \sqrt{1200\text{ K}\ \ 300\text{ K}} = 600\text{ K}$$

luego:

$$C_A = C_B = 10\text{ kJ / K}$$

$$Q_A = C_A\ (T_F - T_{AI}) = 10\ (600 - 1200) = -6000\text{ kJ}$$

(Q_A positivo es calor entrante)

$Q_1 = -Q_A$ pues al definir el calor Q_1 (ver figura) se estableció positivo, saliente del cuerpo y entrante a la máquina térmica.

Finalmente:

$$Q_1 = +6000\text{ kJ}$$

$$Q_2 = Q_B = C_B\ (T_F - T_{BI}) = 10\ (600 - 300) = 3000\text{ kJ}$$

y el trabajo (primer principio a la máquina térmica):

$$\mathbf{W} = Q_1 - Q_2 = 6000 - 3000 = \mathbf{3000\ kJ}$$

Ejercicio 7.19

Considérese un sistema compuesto por 10 kg de aire a 300K de temperatura, encerrado en un cilindro con pistón que provoca una presión de 10 bar, sobre el gas.

El cilindro y el pistón son perfectamente adiabáticos y además el desplazamiento del pistón se produce sin rozamientos.

Posteriormente mediante una resistencia eléctrica, se entrega al aire un trabajo de 1 kWh.

Sabiendo que la misma se encuentra en un estado de régimen, lo cual implica entre otras cosas que su temperatura permanece constante, se pide determinar:

a) Estado final
b) Variación de entropía del aire
c) Variación de entropía del medio
d) Variación de entropía del Universo.

Solución:

Se toma como sistema el gas y la resistencia eléctrica, de manera que el medio aporta un trabajo eléctrico.

Si en cambio se tomara como sistema el gas, la resistencia eléctrica (el medio)) aportaría un calor, equivalente al trabajo eléctrico, ya que se encuentra en estado de régimen.

$$\textit{Estado} \text{ inicial } \begin{cases} \mathrm{m} = 10 \text{ kg.} \\ \mathrm{p}_1 = 10 bar \\ T_1 = 300K \end{cases}$$

de la ecuación de estado:

$$p_1 v_1 = mRT_1$$

$$v_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{10[kg]0.2868\left[\frac{kJ}{kgK}\right]300[K]}{10[bar]\left[\frac{10^2\, kJ/m^3}{1bar}\right]} = 0.86\left[m^3\right]$$

Para el estado final: La entrega de calor dada por la resistencia se realiza a :
p = 10 bar = cte. Es decir: $p_1 = p_2 = p_f = 10[bar]$

Aplicando el primer principio para sistemas cerrados:

$$Q = \Delta U + W_{total} = \Delta U + W_{pistón} + W_{resistencia}$$

$$0 = c_v m(T_2 - T_1) + p_2(V_2 - V_1) + W_{resistencia}$$

$$W_{resistencia} = 1[kWh] = 1[kWh]\frac{3598.24[kJ]}{1kWh} = 3598.24[kJ]$$

De la ecuación de estado final:

$$p_2 v_2 = mRT_2$$

$$v_2 = \frac{mRT_2}{p_2}$$

Que reemplazando en la ecuación del primer principio, se obtiene la temperatura final:

$$0 = c_v m(T_2 - T_1) + p_2\left(\frac{mRT_2}{p_2} - V_1\right) + W_{resistencia}$$

Despejando T_2 :

$$0 = c_v mT_2 - c_v mT_1 + mRT_2 - p_2 V_1 + W_{resistencia}$$

Y teniendo en cuenta la fórmula de Mayer : $c_p = c_v + R$

$$T_2 = \frac{c_v mT_1 + p_2 V_1 - W_{resistencia}}{c_p m} =$$

$$T_2 = \frac{0.719\left[\frac{kJ}{kgK}\right]10[kg]300[K] + 10[bar]0.86[m^3]\left[\frac{10^2\, kJ/m^3}{1bar}\right] - (-3598.24kJ)}{1.006\left[\frac{kJ}{kgK}\right]10[kg]} = 657.57K$$

$$T_2 = 657.57K$$

Luego se obtiene V_2

$$p_2 v_2 = mRT_2$$

$$v_2 = \frac{mRT_2}{p_2} = \frac{10[kg]0.2868\left[\frac{kJ}{kgK}\right]657.57[K]}{10[bar]\left[\frac{10^2\, kJ/m^3}{1bar}\right]} = 1.886m^3$$

La variación de entropía del aire:

$$\Delta S_{aire} = m\left[c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}\right] = mc_p \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$p_2 = p_1$$

$$\Delta S_{aire} = 10[kg]1.006\left[\frac{kJ}{kgK}\right]\ln\frac{657.57}{300} = 7.9\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

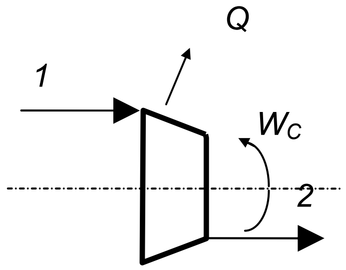
La variación de entropía del medio:

$\Delta S_{medio} = 0$ *(no hay intercambio de calor, entre el sistema y medio. Recinto adiabático)*

Variación de entropía del universo:

$$\Delta S_U = \Delta S_S + \Delta S_M = 7.9\left[\frac{kJ}{K}\right] + 0 = 7.9\left[\frac{kJ}{K}\right] \qquad \Delta S_U > 0\ (\ proceso\ irreversible\ )$$

Ejercicio 7.22



En un cierto proceso industrial se comprimen 500 kg / h de vapor de agua desde un estado inicial de p_1 = 0,20 MPa y t_1 = 130 °C hasta una presión de p_2 = 0,5 MPa y t_2 = 180 °C. El calor transferido por el compresor al medio exterior (a 300 K) es de – 50000 kJ / h. Las variaciones de energía potencial y cinética son despreciables.

Calcular:

d) La potencia requerida para accionar el compresor.
e) La variación de entropía del universo
f) Dibujar la evolución en un diagrama T s

Solución:

$$\dot{Q}_1 = -50000 \, \frac{kJ}{h} = -13{,}89 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_1 = 500 \, \frac{kg}{h} = 0{,}1389 \, \frac{kg}{s}$$

p_1 = 0,2 MPa t_1 = 130°C

Se sabe que es vapor sobrecalentado porque a esta presión, la temperatura de equilibrio entre el líquido y el vapor saturado es de t =120°C que es menor que t_1 . También se podría llegar a la misma conclusión buscando la presión de equilibrio correspondiente a 130°C, que es de 0,27 MPa, mayor que p_1 . Siempre es bueno consultar el diagrama T-s para ubicar los estados del vapor.

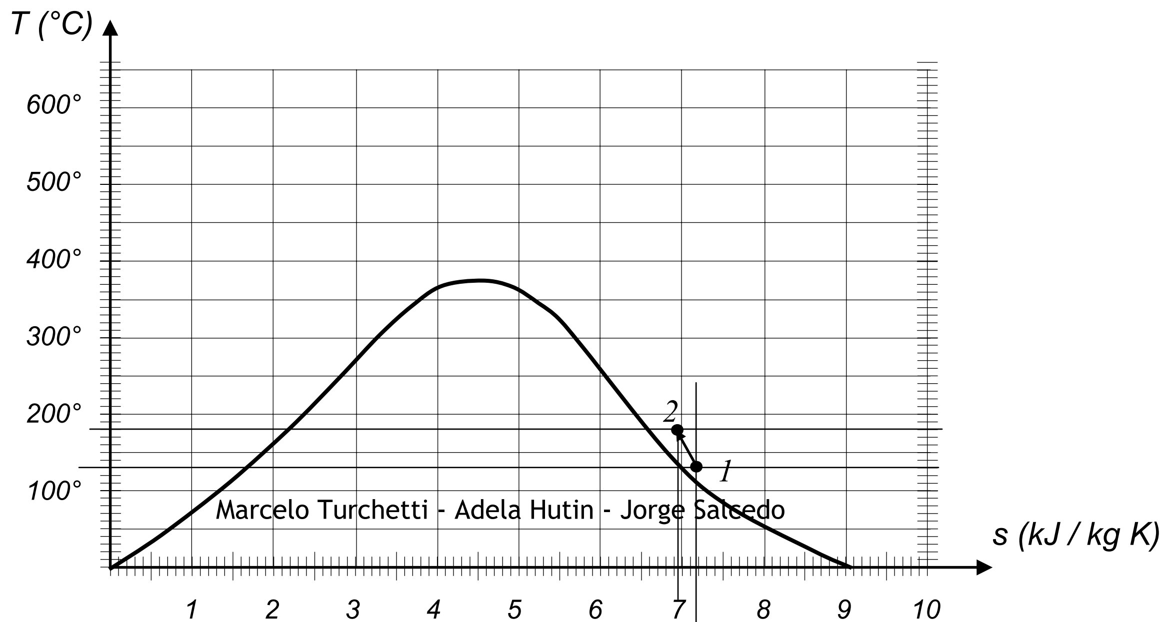
De tablas de vapor sobrecalentado, (o de diagramas también , aunque con menor precisión) se obtiene:

h_1 = 2726,9 kJ / kg s_1 = 7,17859 kJ / kg K

El estado de salida del vapor ya está determinado por los datos. Consultando las tablas de vapor sobrecalentado (o el diagrama T s) se obtiene:

h_2 = 2811,39 kJ / kg s_2 = 6,96472 kJ / kg K

$$\dot{\Delta H} = \dot{m} \, \Delta h = 11{,}73 \text{ kW}$$



Luego de disponer de los datos de los dos estados, aplicamos el primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos en régimen permanente:

$\dot{W}_{COMP} = \dot{Q} - \Delta\dot{H} = -13,89 - 11,73 = -25,626$ kW

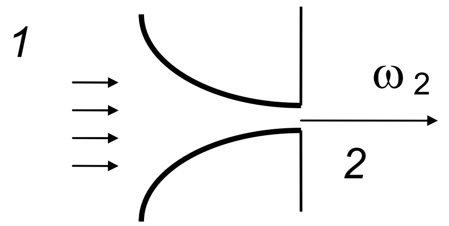
$\Delta\dot{S}_V = -0,02970$ kW es el cambio de entropía del vapor entre entrada y salida y no la variación de entropía del volumen de control o sistema abierto estacionario.

$$\Delta\dot{S}_{FUENTE} = \frac{\dot{Q}}{T_0} = 0,0463 \text{ kW}$$

$\Delta\dot{S}_U = 0,01659$ kW

Aunque la entropía del vapor disminuye, no se puede decir que contradice el segundo principio ya que la transformación no es adiabática

Ejercicio 7.23



Vapor ingresa a baja velocidad a la tobera adiabática de una turbina a p_1=25 bar (≅ 25 kg_f / cm^2) t_1=300 °C y sale de ella a una velocidad de ω_2 = 450 m / s , y a un presión p_2=10 bar . El flujo de vapor es de 1500 kg / h .

Calcular

a) el título o la temperatura del vapor que sale de la tobera y la sección de salida de la misma.
b) Decir si es posible la transformación indicada, y si lo es, decir si es reversible o irreversible

Solución:

Con los datos de entrada y salida, se determinan los restantes parámetros del vapor, leyéndolos de la tabla de vapor sobrecalentado, o del diagrama T-s . Se sabe que son estados de vapor sobrecalentado por observación directa en el diagrama o por comparación de los parámetros de estados de vapor húmedo a las temperaturas y presiones dadas, como se explicó en el anterior problema.

$$\dot{m}_1 = 1500 \frac{kg}{h}$$

Se obtiene:

	p	t	ω	h	s
	kPa	°C	m/s	kJ / kg	kJ / K kg
1	2500	300	0	3010,44	6,64704
2	1000	¿ ?	450	¿ ?	¿ ?

Aplicando el primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos en régimen permanente, se determina el valor de la entalpía de salida, sabiendo que no hay trabajo ni calor y despreciando los cambios de energía potencial gravitatoria:

$$0 = 0 + \dot{m}\left(h + \frac{\omega^2}{2} + g\,z\right)_{sal} - \dot{m}\left(h + \frac{\omega^2}{2} + g\,z\right)_{ent}$$

$$0 = \dot{m}\left(h_2 + \frac{\omega_2^{\,2}}{2}\right) - \dot{m}\;h_1 \quad \text{(La masa resulta un dato innecesario)}$$

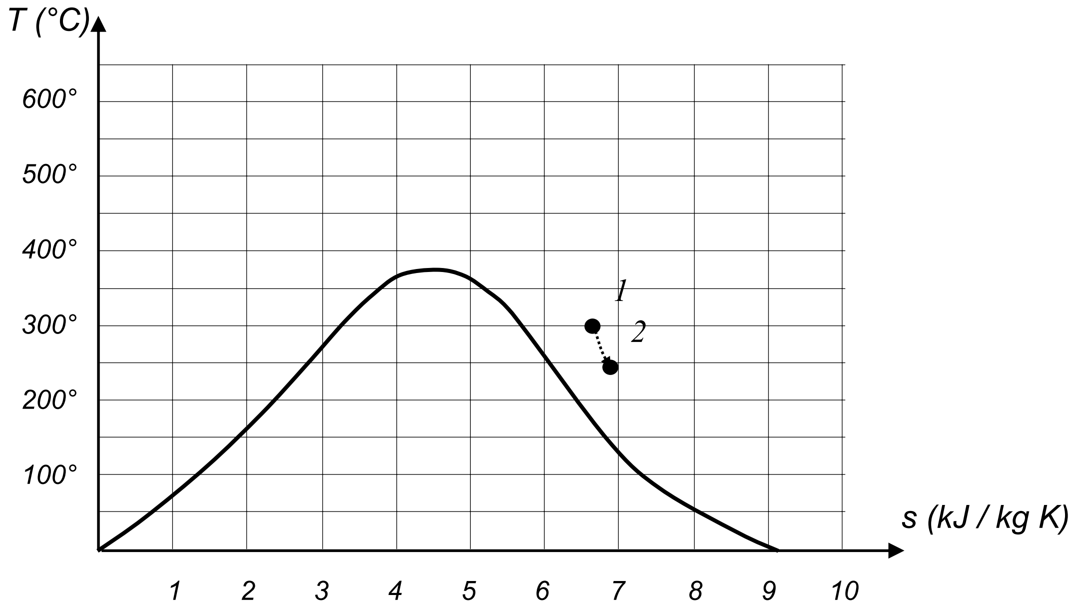
resulta: $h_2 = 2909{,}19$ kJ / kg

A la presión de 1000 kPa , el valor de entalpía calculado corresponde a vapor sobrecalentado. Para hallar el valor más exacto debe hacerse una interpolación:

vapor sobrecalentado a 1000 kPa			
	t	h	s
de tabla	230	2897.77	6.83767
	235,0 interpolación	**2909,19** **valor calculado antes**	6,86014 interpolación
de tabla	240	2920.57	6.88254

t_2 = 235°C y s_2 = 6,86014 kJ / kg

La transformación es irreversible , ya que el vapor, adiabáticamente, aumenta su entropía.



Ejercicio 7.29

Una masa de 10 kg de aire contenida en un recinto rígido y adiabático, inicialmente a 300 K y a 1 bar, se lleva a 500 K de diferentes modos, casos 1 a 8. Se desea calcular para c / uno:

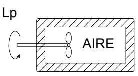
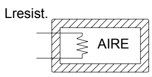
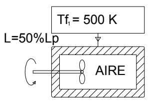
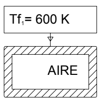
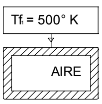
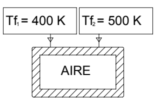
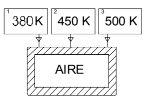
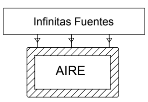
a) El calor aportado (Q).
b) La variación de energía interna (ΔU).

c) El trabajo suministrado (W).

d) La variación de entropía del sistema, del medio y del universo (ΔS_{sist} ,ΔS_{med} y ΔS_{univ}).

Casos:

1. Mediante trabajo aportado por un agitador
2. Mediante una resistencia eléctrica
3. 50% de la energía mediante un agitador y el otro 50_% con una fuente térmica a 500K
4. Con una fuente a 600 K.
5. Con una fuente a 500 K.
6. 50% con una fuente a 400 K, y 50% con una fuente a 500 K,
7. con tres fuentes , a 380 K, 450 K y 500 K
8. Con infinitas fuentes a temperaturas crecientes

CASOS	Q [kJ]	ΔU [kJ]	W [kJ]	ΔS_{sist} kJ/K	ΔS_{med} kJ/K	ΔS_{univ} kJ/K
	0	1438	-1438	3,6728	0	3,6728
	0	1438	-1438	3,6728	0	3,6728
	719	1438	-719	3,6728	-1,438	2,2348
	1438	1438	0	3,6728	-2,397	1,2761
	1438	1438	0	3,6728	-2,876	0,7968
	1438	1438	0	3,6728	-3,2355	0,4373
	1438	1438	0	3,6728	-3,35	0,32
	1438	1438	0	3,6728	-3,6728	0

Los datos del sistema se repiten para los ocho casos :

Sistema cerrado
Volumen del recinto: constante
Contenido: m = 10 kg de aire
$T_i = 300$ K, $T_f = 500$ K y $P_i = 1$ bar
Temperatura y presión del medio de referencia:
$T_o = 300$ K y $P_o = 1$ bar

1°) Caso: aporte de energía al sistema por medio de paletas

$Q = \Delta U + Wp = 0$ (por tratarse de un recinto adiabático)

$$\Delta U = c_v \cdot m \cdot (Tf - Ti) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10[kg] \cdot (500 - 300)[K] = 1438[kJ]$$

Y según la Ec. del Primer principio se tiene $Wp = -1438[kJ]$ (este valor representa el trabajo que aporta el medio al sistema, a través de las paletas, y de acuerdo la convención es negativo.)

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = m \cdot \left[c_v \cdot Ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + R \cdot Ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)\right]$$

$$\Delta S_{sist} = 10\,kg \cdot \left[0{,}719\,\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot Ln\left(\frac{500K}{300K}\right) + 0.2868\,\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot Ln(1)\right] = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

Luego como $\Delta S_{med} = 0$, ya que el medio solo entrega trabajo, se tiene entonces que

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

Nota: en los casos restantes, los valores de: ΔU, ΔS_{sist} permanecerán constantes ya que los mismos dependen de los estados iniciales y finales del sistema que son idénticos para todos los casos.

2°) Caso: aporte de energía por medio de una resistencia eléctrica

$Q = \Delta U + W_{resist}$

Por otro lado se tiene : $Q = 0$ y $U = 1438[kJ]$ $W_{resist} = -1438[kJ]$

siendo $W_{resist.}$ el trabajo que aporta la resistencia eléctrica al sistema.

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = 3{,}6758\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$\Delta Smed = \Delta S_{resist} = 0$ (porque el medio solo entrega trabajo eléctrico)

$$\Delta S_{univ} = 3{,}6758\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

3°) Caso: aporte de energía por medio de una fuente térmica (de capacidad calorífica infinita) y de paletas.

$Q = \Delta U + W$

Por otro lado se tiene : $W = 50\%\ Wp$ y $\Delta U = 1438\,[kJ]$ $Q = 1438\,[kJ] - 719[kJ] = 719[kJ]$

siendo Q el calor que aporta la fuente al sistema

$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$

$\Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$

$\Delta S_{med} = \Delta S_{fuente} = \frac{Q}{T_f} = -\frac{719[kJ]}{500[K]} = -1{,}438\left[\frac{kJ}{K}\right]$ (la variación de entropía del medio es negativa,

porque este último cede calor al sistema) $\Rightarrow$ $\Delta S_{univ} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] - 1{,}438\left[\frac{kJ}{K}\right] = 2{,}2348\left[\frac{kJ}{K}\right]$

4°) Caso: aporte de energía por medio de una fuente térmica (de capacidad calorífica infinita), cuya temperatura es superior a la temperatura final del sistema.

$Q = \Delta U + W$

Por otro lado se tiene : $W = 0$ y $\Delta U = 1438\,[kJ]$ $Q = 1438\,[kJ]$

siendo Q el calor que aporta la fuente al sistema

$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$

$\Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$

$\Delta S_{med} = \Delta S_{fuente} = \frac{Q}{T_f} = -\frac{1438\,[kJ]}{600\,[K]} = -2{,}397\left[\frac{kJ}{K}\right]$ (la variación de entropía del medio es negativa,

porque este último cede calor al sistema) $\Delta S_{univ} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] - 2{,}397\left[\frac{kJ}{K}\right] = 1{,}2761\left[\frac{kJ}{K}\right]$

5°) Caso: aporte de energía por medio de una fuente térmica (de capacidad calorífica infinita), cuya temperatura coincide con la temperatura final del sistema.

$Q = \Delta U + W$

Por otro lado se tiene : $W = 0$ y $\Delta U = 1438\,[kJ]$ $Q = 1438\,[kJ]$

siendo Q el calor que aporta la fuente al sistema

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{med} = \Delta S_{fuente} = \frac{Q}{T_f} = -\frac{1438\,[kJ]}{500\,[K]} = -2{,}876\left[\frac{kJ}{K}\right]$$ (la variación de entropía del medio es negativa,

porque este último cede calor al sistema) $\Delta S_{univ} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] - 2{,}876\left[\frac{kJ}{K}\right] = 0{,}7968\left[\frac{kJ}{K}\right]$

6°) Caso: aporte de energía por medio de dos fuentes térmicas (de capacidad calorífica infinita).

$$Q = \Delta U + W$$

Por otro lado se tiene : $W = 0$ y $\Delta U = 1438[kJ] \Rightarrow Q = 1438[kJ] = Q_{f_1} + Q_{f_2}$

siendo Q el calor que aportan las fuentes al sistema.

$$Q_{f_1} = \Delta U_1 = c_v\, m \cdot (T_{f_1} - T_i) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10\,Kg \cdot (400 - 300)\,K = 719[kJ]$$

$$Q_{f_2} = \Delta U_2 = c_v \cdot m \cdot (T_f - T_{f_1}) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10\,Kg \cdot (500 - 400)\,K = 719[kJ]$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{med} = \Delta S_{fuentes} = \frac{Q_1}{T_{f_1}} + \frac{Q_2}{T_{f_2}} = -\frac{719[kJ]}{400[K]} - \frac{719[kJ]}{500[K]} = (-1{,}7975 - 1{,}438)\left[\frac{kJ}{K}\right] = -3{,}2355\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{univ} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] - 3{,}2355\left[\frac{kJ}{K}\right] = 0{,}4373\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

7°) Caso: aporte de energía por medio de tres fuentes térmicas (de capacidad calorífica infinita).

$$Q = \Delta U + W$$

Por otro lado se tiene : $W = 0$ y $\Delta U = 1438[kJ] \Rightarrow Q = 1438[kJ] = Q_{f_1} + Q_{f_2} + Q_{f_3}$

siendo Q el calor que aportan l as fuentes al sistema.

$$Q_{f_1} = \Delta U_1 = c_v \cdot m \cdot (T_{f_1} - T_i) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10\,Kg \cdot (380 - 300)\,K = 575{,}2\,[kJ]$$

$$Q_{f_2} = \Delta U_2 = c_v \cdot m \cdot (T_{f_2} - T_{f1}) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10\,Kg \cdot (450 - 380)\,K = 503{,}3\,[kJ]$$

$$Q_{f_3} = \Delta U_3 = c_v \cdot m \cdot (T_f - T_{f2}) = 0{,}719\left[\frac{kJ}{kgK}\right] \cdot 10\,Kg \cdot (500 - 450)\,K = 359{,}5\,[kJ]$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = 3{,}6718\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{med} = \frac{Q_1}{Tf_1} + \frac{Q_2}{Tf_2} + \frac{Q_3}{Tf_3} = \left(-\frac{575{,}2}{380} - \frac{503{,}3}{450} - \frac{359{,}5}{500}\right)\left[\frac{kJ}{K}\right] = (-1{,}5136 - 1{,}1185 - 0{,}719)\left[\frac{kJ}{K}\right] = -3{,}35\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{univ} = 3{,}6718\left[\frac{kJ}{K}\right] - -3{,}35\left[\frac{kJ}{K}\right] = 0{,}32\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

Observaciones:

Ahora bien, la función entropía no solo sirve para indicar si un proceso es posible o no, sino que también, me indica el grado de irreversibilidad del mismo. Ya que, cuanto más se acerca a cero el valor de dicha función, menos irreversible es el proceso y en el límite (solo para casos ideales) cuando su valor se anula nos, indica que el proceso es reversible.

8°) Caso ideal: aporte de energía por medio de una cantidad infinita de fuentes (de capacidad calorífica infinita), cuya temperatura es infinitesimalmente superior a la temperatura final del gas instante a instante hasta alcanzar los 500 K.

En estas condiciones, el salto de temperatura es tan pequeño que el proceso de transferencia de energía se vuelve reversible, obteniéndose por lo tanto una variación de entropía del proceso igual a cero.

$$Q = \Delta U + W$$

Por otro lado se tiene : $W = 0$ y $\Delta U = 1438[kJ] \Rightarrow Q = 1438[kJ]$

siendo Q el calor que aportan las fuentes al sistema.

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med}$$

$$\Delta S_{sist} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

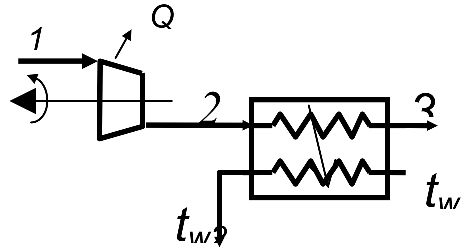
$$\Delta S_{univ} = 0\ \frac{Kcal}{K}$$

$$\Rightarrow \Delta S_{med} = \Delta S_{fuentes} = -3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right]$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{med} = 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] - 3{,}6728\left[\frac{kJ}{K}\right] = 0 \quad \text{(proceso reversible)}$$

Ejercicio 7.30

En un sistema de refrigeración en el cual el R 22 (Freon 22) es el fluido refrigerante, el vapor saturado ingresa al compresor a la temperatura $t_1 = -10$ °C y sale a $p_2 = 10$ bar y $t_2 = 95$ °C.



El flujo másico es $\dot{m} = 60 \dfrac{kg}{h}$ y la potencia entregada al compresor de 1,4 kW, .Saliendo del compresor, el refrigerante ingresa a un condensador enfriado por agua, saliendo como líquido saturado a $p_3 = 10$ bar .
El agua ingresa a $t_{w1} = 20$ °C y egresa a $t_{w2} = 30$ °C .

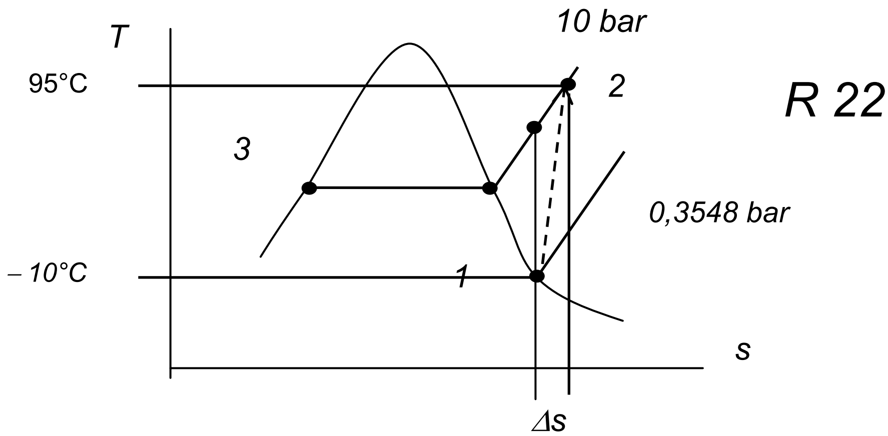
Calcular:

c) Calor $\dot{Q}_{COMP}$ transferido por el compresor.

d) Caudal másico de agua $\dot{m}_{H2O}$ requerido en el condensador.

Solución:

El refrigerante R22 (Freón 22) tiene un comportamiento cualitativamente similar al agua, en cuanto al equilibrio liquido y vapor, representándose en el diagrama T-s en forma similar.



En este ejercicio, aplicaremos el primer principio para sistemas abiertos en régimen estacionario, primero al compresor y luego al intercambiador de calor:
De tablas se obtiene:

	t	p	h	s	
	°C	kPa	kJ/kg	kJ/kg K	
1	-10	354,8	401,2	1,766	V. saturado
2	95	1000	470,1	1,893	V. sobrec..

	23	988,7	412,5	1,720	líq. saturado
	24	1016,0	412,8	1,719	líq. saturado
3	23,4	1000	412,6	1,720	líq. saturado

COMPRESOR

$$\dot{Q}_{COMP} = \Delta\dot{H} + \dot{W}_{COMP} = \dot{m}_V \ (h_2 - h_1) + \dot{W}_{COMP}$$

$$\dot{m}_V = 60 \frac{kg}{h} = 0{,}01667 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q}_{COMP} = 0{,}01667 \frac{kg}{s} (470.1 - 401.2) \frac{kJ}{kg} - 1{,}4 \text{ kW} = -\, 0{,}2517 \text{ kW}$$

INTERCAMBIADOR

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H} + \dot{W} = \dot{m}_V \ (h_3 - h_2) + \dot{m}_W \ (h_{w2} - h_{w1}) + 0$$

$$\dot{m}_W = -\frac{\dot{m}_V (h_3 - h_2)}{c_W (t_{W2} - t_{W1})} = -\frac{0{,}01667 (412 - 470)}{4{,}19 (30 - 20)} = 82{,}4 \frac{kg}{h}$$

La entropía del medio aumenta porque éste recibe calor, $\Delta S_M = Q / T_0$, y como la entropía del vapor en la compresión también aumenta, la entropía del universo crece y por lo tanto es un proceso irreversible. Además, nótese que hay dos procesos: uno es la compresión exotérmica del vapor y otro es la transferencia de calor al medio. Si este último fuera revesible (con fuentes que recibieran el calor sin salto térmico), seguiría aumentando la entropía del universo, lo cual muestra que la compresión exotérmica y con aumento de entropía es un proceso irreversible.

El proceso en el intercambiador también es irreversible, ya que se transfiere calor con saltos térmicos no infinitesimales y se manifiesta su irreversibilidad en el aumento de entropía:

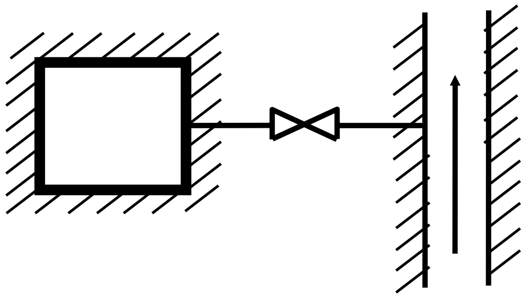
$$\Delta S_{INTERC} = \Delta S_{AGUA} + \Delta S_{R22} = 0{,}2289 (4{,}19 \ln(303/293)) + 0{,}01667 (1{,}720-1.893) =$$

$$\Delta S_{INTERC} = 0{,}003216 - 0{,}002883 = 0{,}0003329 \text{ kW / K} > 0$$

Ejercicio 7.33

En una cañería circula aire a una presión de 20 kg_f/cm^2 y a una temperatura de 57 °C, parámetros que se mantienen constantes. Se comunica a la cañería con un tanque rígido y adiabático de 10 m^3 de capacidad que inicialmente contiene aire a una presión p_1=1 bar y una temperatura t_1 = 27 °C. Calcular para el equilibrio mecánico:

c) Masa de aire que ingresa al tanque y temperatura final del aire en el tanque.
d) Variación de entropía del aire.

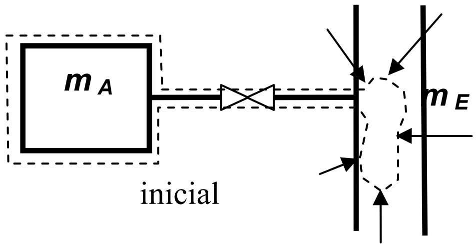


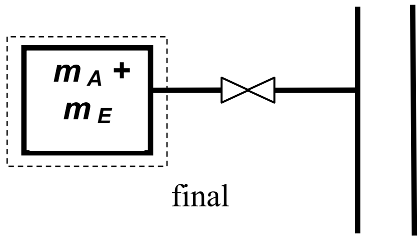
Solución:

a) Cálculo de la masa entrante y la temperatura final.

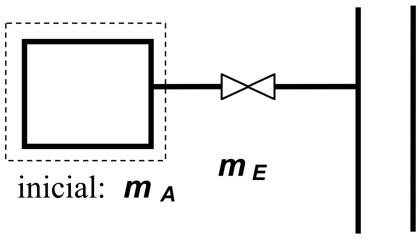
Puede ser resuelto de dos modos distintos:

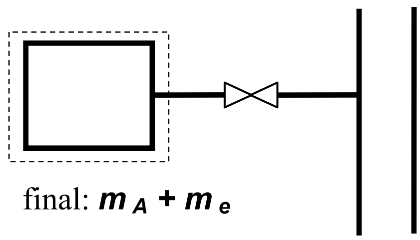
I. Considerando como **sistema cerrado** al compuesto por las dos masas $m_A + m_E$ (la masa de aire que inicialmente se encuentra dentro del tanque m_A más la masa de aire que entra durante el proceso m_E y que finalmente quedará adentro). Es un sistema cerrado ya que no entra ni sale masa del mismo; cambia su contorno.





II. Como **sistema abierto** a la zona o región compuesta por tanque. La masa de aire contenida en el sistema abierto es, inicialmente m_0 , y finalmente $m_0 + m_e$





I . Como sistema cerrado

Estado inicial del sistema:

$p_E = 20 \text{ kg / cm}^2 \approx 20 \text{ bar} = 2 \text{ MPa}$
$m_E = ?$
$T_E = 57 + 273 = 330 \text{ K}$
$V_E = ?$
ec. de estado: $p_E \; \mathbf{V_E} = \mathbf{m_E} \, R \, T_E$ **(1)**

se desconoce la masa de entrada y el volumen que esa masa ocupa en la cañería antes de entrar.

$p_A = 1 \text{ kg / cm}^2 \approx 1 \text{ bar} = 0{,}1 \text{ MPa}$
$T_A = 27 + 273 = 300 \text{ K}$
$V_A = 10 \text{ m}^3$
ec. de estado: $p_A \; V_A = m_A \, R \, T_A$
$m_A = p_A \; V_A / R \, T_A = 11{,}4 \text{ kg}$

Estado final del sistema

$p_F = 20 \text{ kg / cm}^2 \approx 20 \text{ bar} = 2 \text{ MPa}$
$m_F = m_A + m_B$
$T_F = ?$
$V_F = 10 \text{ m}^3$

ecuación de estado:

$\mathbf{p_F \ V_F = m_F \, R \, T_F}$ **(2)**

Primer principio de la termodinámica:

sistema cerrado despreciando energías cinéticas y potenciales:

$Q = W + \Delta U$

por ser adiabático:

$Q = 0 \quad \rightarrow \quad \mathbf{0 = W + \Delta U}$ **(3)**

el trabajo necesario para introducir la masa $\mathbf{m_A}$ es $\mathbf{W} = - p_E \ \mathbf{V_E}$ **(4)**

$\Delta U = U_F - U_I = m_F \ c_V \ T_F - m_A \ c_V \ T_A - m_E \ c_V \ T_E$

$\mathbf{\Delta U} = U_F - U_I = c_V \ (m_A \ (\mathbf{T_F} - T_A \ ) + \mathbf{m_E} \ (T_F - T_E \ ))$ **(5)**

Es un sistema de 5 ecuaciones (1 a 5) con cinco incógnitas: $\mathbf{m_E}$, $\mathbf{T_F}$, $\mathbf{V_E}$, $\mathbf{\Delta U}$ y $\mathbf{W}$

$\mathbf{m_E = 144 \ kg}$

$\mathbf{T_F = 439 \ K = 166°C}$

II Como sistema abierto . Es un sistema abierto en régimen transitorio

Estado inicial:

$p_I = 1 \text{ kg / cm}^2 \approx 1 \text{ bar} = 0{,}1 \text{ MPa}$

$T_I = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$V_I = 10 \text{ m}^3$

ec. de estado: $p_I \, V_I = m_I \, R \, T_I$

$m_I = p_I \ V_I / R \, T_I = 11{,}4 \text{ kg}$

Estado final del sistema

$p_F = 20 \text{ kg / cm}^2 \approx 20 \text{ bar} = 2 \text{ MPa}$

$\mathbf{m_F} = m_I + \mathbf{m_E}$ **(1)**

$\mathbf{T_F = \ ?}$

$V_F = 10 \text{ m}^3$

ec. de estado:

$p_F \ V_F = \mathbf{m_F} \, R \, \mathbf{T_F}$ **(2)**

Primer principio

$$Q = \Delta E_{VC} + W + m_{sal} \left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z \right)_{sal} - m_{ent} \left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z \right)_{ent}$$

El sistema es adiabático, no hay trabajo entre medio y sistema (el trabajo antes considerado **pΔv** es el trabajo necesario para introducir la masa al sistema, y ya está tenido en cuenta dentro de la entalpía), no hay masa de salida y se desprecian las energías cinéticas y potenciales. La variación de energía del volumen de control está dado por la variación de energía interna:

$0 = \Delta U_{VC} - m_E \ h_E$

$0 = m_F \, u_F - m_I \ u_I - m_E \, h_E$

por ser gases ideales:

$$0 = \mathbf{m_F}\, c_V\, \mathbf{T_F} - m_I\ c_V\, T_I - \mathbf{m_E}\, c_P\ T_E \qquad \textbf{(3)}$$

Es un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas: $\mathbf{m_F}$, $\mathbf{T_F}$ y $\mathbf{m_E}$ que resolviendo, da el mismo resultado que en el caso anterior.

b) Cálculo de la variación de entropía del aire.

Se calcula la ΔS del aire que finalmente está dentro del recipiente, y que antes se encuentra parte dentro y parte circulando en la cañería. El Fluido que circula en la cañería no sufre ningún cambio.

Hay dos modos prácticos de calcularlo:

Primero:

$$\Delta S_{\ AIRE} = S_{\ FINAL\ TANQUE} - S_{\ INICIAL\ TANQUE} + S_{\ SALIDA} - S_{\ ENTRADA}$$

Recordar que la **s** minúscula es la entropía específica, mientras que la **S** mayúscula la de la totalidad de la masa.

$$\Delta S_{\ AIRE} = m_{FINAL}\ s_{FINAL} - m_{INICIAL}\ s_{INICIAL} + 0\ s_{SAL} - m_{ENT}\ s_{ENT}$$

La entropía así como está expresada no la sabemos calcular. Sólo sabemos calcular cambios de entropía.

y como $m_{FINAL} - m_{INICIAL} = m_{ENT}$

$$\Delta S_{\ AIRE} = (m_{INICIAL} + m_{ENT})\ s_{FINAL} - m_{INICIAL}\ s_{INICIAL} - m_{ENT}\ s_{ENT}$$

$$\Delta S_{\ AIRE} = m_{ENT}\ (s_{FINAL} - s_{ENT}) + m_{INICIAL}\ (s_{FINAL} - s_{INICIAL})$$

Inicial, final y entrada se refiere a sus correspondientes parámetros.

$$\Delta S_{\ AIRE} = m_{ENT}\left(c_P \ln\left(\frac{T_F}{T_E}\right) - R\ln\left(\frac{p_F}{p_E}\right)\right) + m_{INICIAL}\left(c_P \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R\ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right)\right) =$$

$$\Delta S_{\ AIRE} = 144\left(1{,}006 \ln\left(\frac{439}{330}\right) - 0{,}2868 \ln\left(\frac{1961}{1961}\right)\right) + 11{,}6\left(1{,}006 \ln\left(\frac{439}{300}\right) - 0{,}2868 \ln\left(\frac{1961}{100}\right)\right)$$

$$\Delta S_{\ AIRE} = 35{,}88\ \frac{kJ}{K}$$

Segundo:

Retomando la anteriores expresiones:

$$\Delta S_{\ AIRE} = S_{\ FINAL\ TANQUE} - S_{\ INICIAL\ TANQUE} + S_{\ SALIDA} - S_{\ ENTRADA}$$

$$\Delta S_{\ AIRE} = m_{FINAL}\ s_{FINAL} - m_{INICIAL}\ s_{INICIAL} + 0\ s_{SAL} - m_{ENT}\ s_{ENT}$$

$$m_{FINAL} - m_{INICIAL} = m_{ENT}$$

tomando un estado arbitrario auxiliar para el cálculo de entropía: $\mathbf{s_0}$

$$\Delta S_{\ AIRE} = m_{FINAL}\ (s_{FIN} - \mathbf{s_0}) - m_{INI}\,(s_{INI} - \mathbf{s_0}) - m_{ENT}\,(s_{ENT} - \mathbf{s_0})$$

De este modo podemos calcular las variaciones de entropía. En la elección del estado arbitrario, debe tenerse cuidado de no tomar T = 0, que haría imposible el cálculo del logaritmo. En general se puede tomar como referencia a uno de los estados mismo para abreviar los cálculos, por ejemplo

$s_{INI} = \mathbf{s_0}$

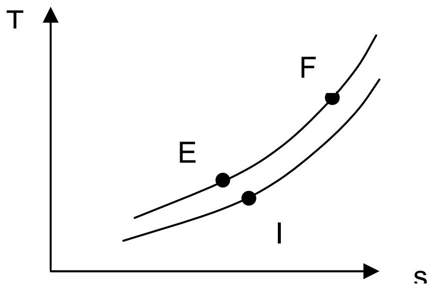
$\Delta S_{AIRE} = m_{FINAL} \; (s_{FIN} - \mathbf{s_0}) - m_{INI} (s_{INI} - \mathbf{s_0}) - m_{ENT} \; (s_{ENT} - \mathbf{s_0})$

y reemplazando:

$$\Delta S_{AIRE} = 35{,}88 \frac{kJ}{K}$$

El aumento de la entropía del aire, al ser un proceso adiabático (y al no haber ningún otro cambio en el medio) pone en evidencia la irreversibilidad:

$\Delta S_{UNIVERSO} = \Delta S_{AIRE} + \Delta S_{MEDIO} = \Delta S_{AIRE} + 0 = 35{,}88 \;\; kJ / K \;\; > \;\; 0$

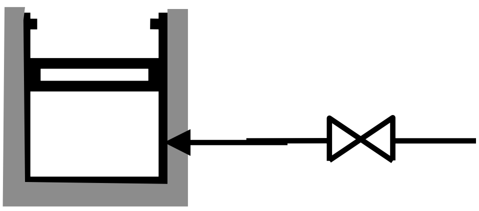


Ejercicio 7.34

Dentro de un cilindro adiabático cerrado por un pistón adiabático se encuentra una masa de aire a una presión de 1 bar y a una temperatura de 27 °C, ocupando un volumen de 10 m^3. Se abre una válvula y se introduce una masa m de aire a una presión $p_1 = 4$ bar y una temperatura de 50 °C . Al introducir esta masa se eleva el pistón, y éste choca con unos topes siendo el volumen final $V_F = 20 \; m^3$ y $p_F = 3$ bar. Luego de que esto sucede, al instante se cierra la válvula.
Se pide calcular

c) La temperatura final T_F y la masa m que ingresa.
d) La variación de entropía del aire.

Solución:



Se pide calcular la temperatura final $\mathbf{T_F}$ y la masa **m** que ingresa.

Luego de la lectura del enunciado del problema, sabremos que al cilindro ingresa una masa m_e desconocida, a través de una cañería y una válvula, que mezclándose con el aire contenido inicialmente, hace subir el pistón, produciendo un trabajo, hasta que se llega a los topes.

El trabajo de ascenso del pistón se realiza a presión constante de 1 bar ya que esta es la presión que impone este dispositivo mientras no llegue a los topes. Luego de alcanzar el punto superior, la presión aumenta hasta 3 bar, pero no se realiza trabajo adicional porque no hay desplazamiento del émbolo durante esta etapa.

Entre la cañería y el cilindro hay una válvula, que además de abrirse al inicio y cerrarse al final del proceso, establece la necesaria caída de presión entre los 4 y los 3 bar, durante la entrada de masa. Si esta caída de presión no se diera en la válvula, la misma se daría en la zona de entrada al cilindro, y no cambia nada en el planteo del problema.

Se seguirán para la resolución, los siguientes pasos:

- Elección del sistema
- Planteo del estado inicial
- Planteo del estado final
- Aplicación del primer principio

Solución numérica

1. Elección del sistema: se elige como sistema a la región del cilindro conjuntamente con la válvula de entrada. Inicialmente dentro del el sistema hay 10 kg de aire y finalmente 10 kg + m_e. Es un sistema abierto que evoluciona en “régimen no permanente”, “régimen variable” o “régimen transitorio”.
2. Planteo del estado inicial del sistema $p_i = 1$ bar $\cong$ 0,1 MPa
   $t_i = 27$ °C $T_i = 300$ K
   $V_i = 10$ m^3
   Ec. de estado del gas ideal aire: $m_i = \dfrac{p_i\, V_i}{R_{aire}\, T_i} = \dfrac{100000\ \ 10}{287\ \ 300} = 11{,}6$ kg
3. Planteo del estado final del sistema
   $p_f = 3$ bar $\cong$ 0,3 MPa
   $T_f = ?$
   $V_f = 20$ m^3
   masa final = $m_i + m_e = ?$
   Ec. de estado del gas ideal aire: $p_f\, V_f = (m_i + m_e)\, R_{aire}\, T_f$
4. Aplicación del primer principio. Usamos la expresión general para un sistema abierto:
$$Q_{VC} = \Delta E_{VC} + W_{VC} + m_{sal}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{sal} - m_{ent}\left(h + \frac{\overline{V}^2}{2} + g\,z\right)_{ent}$$
5. En este caso el calor es cero por ser adiabático: $Q_{VC} = 0$; al no haber masa de salida: $m_s = 0$; también son nulas las energías cinéticas y potenciales de la masa de entrada. Al no haber cambios de energía potencial ni cinética del volumen de control, resulta $\Delta E_{VC} = \Delta U_{VC}$. Con todo esto, la expresión del primer principio queda:

$$0 = \Delta U_{VC} + W_{VC} - m_{ent}\, h_{ent}$$

la variación de energía interna del sistema:

$$\Delta U_{VC} = U_f - U_i = m_f\ c_v\, T_f - m_i\ c_v\, T_i = (m_e + m_i)\, c_v\, T_f - m_i\ c_v\, T_i$$

la entalpía de entrada (por gas ideal):

$$m_e\, h_e = m_e\, c_p\, T_e$$

y el trabajo:

$$W_{VC} = p_i\,(V_f - V_i)$$

Con todo esto queda:

$$0 = (m_e + m_i)\ c_v T_f - m_i\ c_v T_i + p_i (V_f - V_i) - m_e c_p T_e$$

y reemplazando con la ecuación de estado en el estado final: $T_f = \dfrac{p_f V_f}{(m_i + m_e) R_{aire}}$

finalmente:

$$0 = (m_e + m_i)\ c_v \frac{p_f V_f}{(m_i + m_e) R_{aire}} - m_i\ c_v T_i + p_i (V_f - V_i) - m_e c_p T_e$$

$$0 = c_v \frac{p_f V_f}{R_{aire}} - m_i\ c_v T_i + p_i (V_f - V_i) - m_e c_v T_e$$

y despejando m_e:

$$m_e = \frac{c_v \dfrac{p_f V_f}{R_{aire}} - m_i\ c_v T_i + p_i (V_f - V_i)}{c_p T_e}$$

Resolución numérica:

$$m_e = \frac{719 \ \text{x} \ \dfrac{300000 \ \text{x} \ 20}{287} - 10 \ \text{x} \ 719 \ \text{x} \ 300 + 100000 \ \text{x} \ (20 - 10)}{1006 \ \text{x} \ 323} = 41{,}6 \text{ kg}$$

$$T_f = \frac{p_f V_f}{(m_i + m_e) R_{aire}} = \frac{300000 \ \text{x} \ 20}{(11.6 + 41.6)\ 287} = 393 \text{ K} = 119°\text{C}$$

b)Variación de entropía del aire

El cálculo de las variaciones de entropía es similar al del caso anterior, sólo cambia el modo o tipo de transformación:

$$\Delta S_{AIRE} = S_{FINAL\ TANQUE} - S_{INICIAL\ TANQUE} + S_{SALIDA} - S_{ENTRADA}$$

$$\Delta S_{AIRE} = m_{FINAL}\ s_{FINAL} - m_{INICIAL}\ s_{INICIAL} + 0\ s_{SAL} - m_{ENT}\ s_{ENT}$$

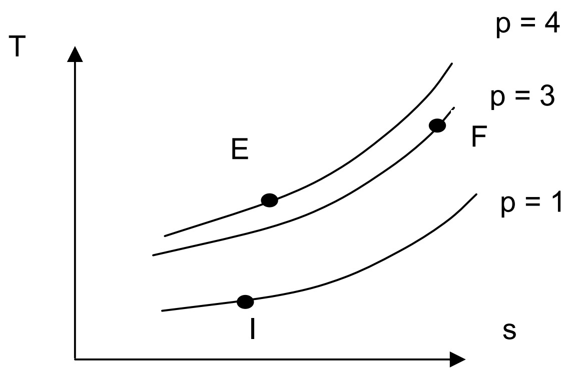
$$\Delta S_{AIRE} = (m_{INICIAL} + m_{ENT})\ s_{FINAL} - m_{INICIAL}\ s_{INICIAL} - m_{ENT}\ s_{ENT}$$

$$\Delta S_{AIRE} = m_{ENT}\ (s_{FINAL} - s_{ENT}) + m_{INICIAL}\ (s_{FINAL} - s_{INICIAL})$$

$$\Delta S_{AIRE} = m_{ENT} \left(c_P \ln\left(\frac{T_F}{T_E}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_E}\right)\right) + m_{INICIAL} \left(c_P \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - R \ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right)\right) =$$

$$\Delta S_{AIRE} = 40{,}7 \left(1{,}006 \ln\left(\frac{393{,}8}{323}\right) - 0{,}2868 \ln\left(\frac{300}{400}\right)\right) + 11{,}6 \left(1{,}006 \ln\left(\frac{393{,}8}{300}\right) - 0{,}2868 \ln\left(\frac{300}{100}\right)\right) =$$

$$\Delta S_{AIRE} = 10{,}99 \frac{kJ}{K}$$



La variación de entropía del medio sigue siendo nula como en el ejercicio anteriormente explicado, aunque en este caso, a diferencia del anterior, hay un trabajo (negativo) realizado por el medio, y no interviene en los cálculos de entropía, justamente por tratarse de trabajo y no de calor.

$$\Delta S_{UNIVERSO} = \Delta S_{AIRE} + \Delta S_{MEDIO} = 11 + 0 = 11\ \frac{kJ}{K} > 0$$

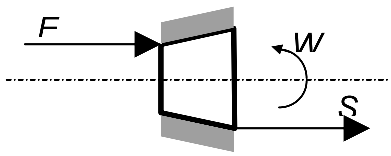
En este caso, también queda en evidencia la irreversibilidad del proceso ya que aumenta la entropía del universo. El paso del aire por la válvula es una transformación irreversible.

Ejercicio 7.35

Por una turbina adiabática circulan 418,4 kg / h de aire, en régimen estacionario. El gas entra a 450 °C y 3,6 MPa y sale a una presión de 0,12 MPa .

Representar en un diagrama T-s , Determinar la temperatura de descarga de la turbina y la potencia producida para los siguientes casos:

e) Proceso reversible.
f) Proceso irreversible con un rendimiento isoentrópico (o adiabático) de expansión de 0,88 .



Turbina adiabática

Solución:

Proceso reversible: Es un proceso cuasiestático de un gas ideal, adiabático, por lo que se pueden aplicar las expresiones de politrópicas para gases ideales. De la relación entre parámetros para la adiabática:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\kappa/(\kappa-1)} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

reemplazando y despejando se obtiene: $T_2 = 273{,}6$ K (casualmente coincide con el cero grado centígrado)

primer principio: $Q = H_2 - H_1 + W$ y siendo $Q = 0$ resulta:

$$W = m\, c_p\, (T_2 - T_1) = -\frac{100}{3600}\ 1006\ \ (273 - 723) = 12575 \text{ J/s} = 12{,}6 \text{ kW}$$

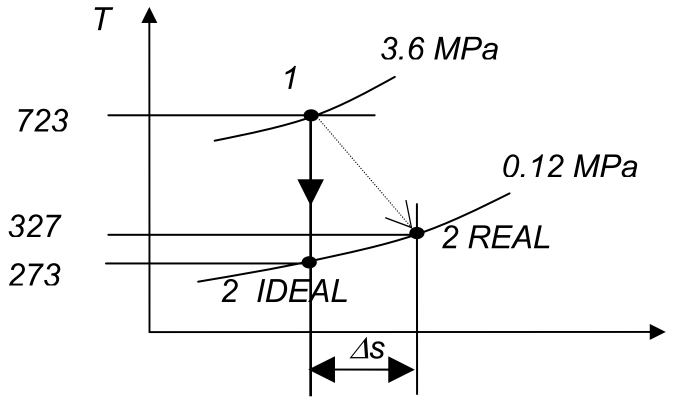
Proceso irreversible: el estado final y el trabajo, ideales, son los calculados anteriormente.
rendimiento adiabático:

$$\eta = \frac{\text{Trabajo real}}{\text{trabajo ideal}} = \frac{\Delta H_r}{\Delta H_i} = \frac{m\, c_p\, \Delta T_r}{m\, c_p\, \Delta T_i} = \frac{\Delta T_r}{\Delta T_i}$$

$\therefore$ trabajo real =Trabajo ideal x η =ΔH_i x η = 12,6 x 0,88 = 11,07 kW

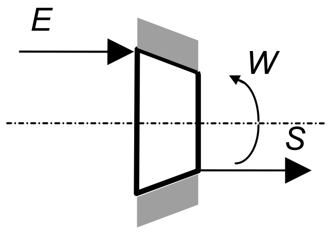
temperatura de salida real: $\Delta T_r = \Delta T_i \times \eta)$;

$$T_{2REAL} = (\ 273 - 723\ )\ 0{,}88 + 723 = 327 \text{ K}$$



En el proceso real aumenta la entropía

Ejercicio 7.35



C. adiabático ; $\eta_i = 0,75$

Un turbocompresor adiabático en régimen estacionario, aspira oxígeno a 3 bar y –12 °C , entregándolo a la presión de 6 bar. El rendimiento adiabático (o isoentrópico) del compresor es de 0,75 . Determine la potencia por unidad de masa de oxígeno, y represente el proceso de compresión en un diagrama T-s .

Respuesta: W = – 69,4 kJ / kg

Solución:

La compresión es irreversible dado que su rendimiento isoentrópico (o rendimiento adiabático es menor que 1. Como en la definición del rendimiento se utiliza la referencia del estado de salida ideal (es decir , el que tendría saliendo a la misma presión isoentrópicamente), debemos empezar por determinarlo

Estado ideal:

por ser transformación politrópica adiabática: $\left(\dfrac{T_2}{T_1}\right)^{\kappa / (\kappa-1)} = \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)$

para el oxígeno, tablas: $\kappa = \dfrac{c_P}{c_V} = 1{,}396$

resulta: $T_{2'} = 317{,}7$ K

y el trabajo: $w_{IDEAL} = -(h_{2'} - h_1 = - c_P (T_{2'} - T_1) = - \ 0{,}917 (317{,}7 - 261) = -52$ kJ / kg

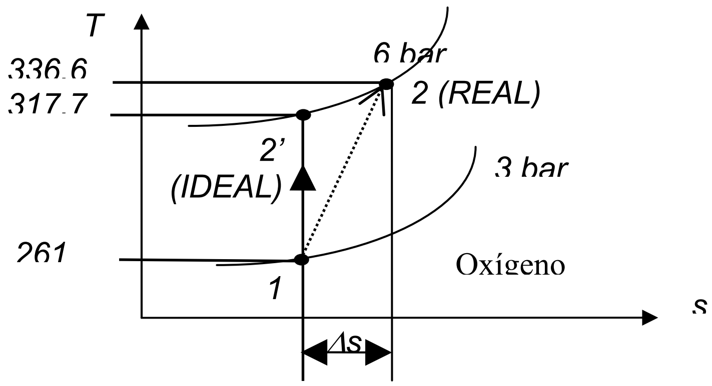
Estado real:

$$\eta_{COMPRESOR} = \frac{w_{IDEAL}}{w_{REAL}}$$

$$\therefore \qquad w_{REAL} = \frac{w_{IDEAL}}{\eta_{COMPRESOR}} = \frac{-52 \text{ kJ / kg}}{0{,}75} = -64{,}4 \text{ kJ / kg}$$

Al comprimir no cuasiestáticamente, se necesita más trabajo, y además aumenta la temperatura de salida. Aunque el ejercicio no lo pide, podemos determinar la temperatura de salida:

$$\eta_{COMPRESOR} = \frac{w_{IDEAL}}{w_{REAL}} = \frac{(h_{2'} - h_1)}{(h_2 - h_1)} = \frac{(T_{2'} - T_1)}{(T_2 - T_1)}$$



Ejercicio 7.44

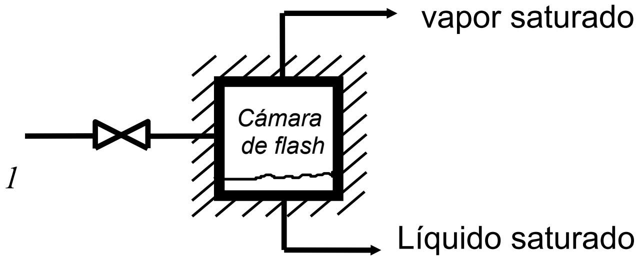
Agua en estado "1" de líquido comprimido, pasa por una válvula y luego entra a una cámara adiabática en donde se separa el líquido del vapor (denominada cámara de "flash").

Calcular:

e) La cantidad necesaria de agua en el estado "1" para obtener una producción de vapor de 1000 kg / h .
f) La variación de entropía de la cámara "flash" ΔS_{CF}
g) La variación de entropía del universo ΔSu
h) Representar en un diagrama T-s .

Datos:

$p_1 = 16$ MPa
$t_1 = 310$ °C
$p_{CF} = 24$ bar



Solución:

El líquido subenfriado(o comprimido), al pasar por la válvula disminuye su presión y de modo que se conserva la entalpía a la salida, pues consideramos a la válvula adiabática. Resulta un estado de vapor húmedo, que entrando a una cámara de dimensiones suficientemente grandes, por acción de la gravedad, el líquido se colecta en la parte inferior y el vapor sale por la superior. Los cambios de energía potencial que esto provoca son despreciables, y siendo la cámara adiabática, no hay ningún intercambio de energía. Sólo se separa el líquido del vapor saturado (estados 2' y 2'') .
estado de entrada (1).
Mediante tablas:

$p_1 = 16000$ kPa (le corresponde una temperatura de saturación de 347,3°C)

$t_1 = 310$°C ($310 < 347,3 \Rightarrow$ líquido subenfriado)

$v_1 = 0,001417\ m^3 / kg$

$7h_1 = 1393,2$ kJ / kg

$s_1 = 3,32038$ kJ / kg K

Del primer principio para sistemas abiertos en régimen estacionario, despreciando energías cinéticas y potenciales:

$$Q = \Delta H + W$$

$$0 = \Delta H + 0 = m (h_2 - h_1) \Rightarrow h_2 = h_1 = 1393{,}2 \text{ kJ /kg}$$

De tablas, para 2400 kPa:

temperatura de saturación: $t_2 = 221.78°C \approx 222°C$

líquido saturado $h_{2'} = 951{,}93$ kJ/kg

vapor saturado $h_{2''} = 2800{,}41$ kJ/kg

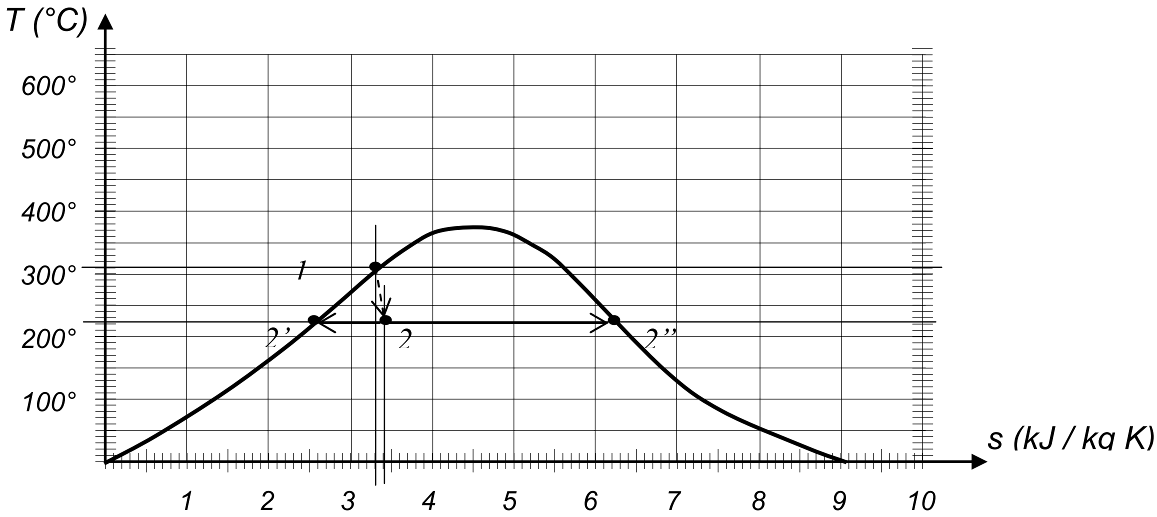
resulta: $h_2 = x_2 \; h_{2''} + (1 - x_2) \, h_{2'}$

y despejando el título x se obtiene:

$$x_2 = \frac{(h_2 - h_{2'})}{(h_{2''} - h_{2'})} = \frac{(1393{,}2 - 951{,}93)}{(2800{,}41 - 951{,}93)} = 0{,}2387$$

$$m_T = \frac{m_V}{x_2} = \frac{1000}{0{,}2387} = 4190 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \qquad m_L = m_T - m_V = 3190 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Variación de entropía.
La entropía aumenta en el paso por la válvula reductora de presión. No hay cambios de entropía dentro de la cámara, en la separación del líquido y el vapor.
El volumen de control o sistema abierto no cambia su entropía ya que es régimen estacionario y todos sus parámetros permanecen invariables, pero si lo hace el H_2O entre la entrada y la salida del sistema.



De tablas:
líquido saturado $s_{2'} = 2{,}53431$ kJ/kg K
vapor saturado $s_{2''} = 6{,}26899$ kJ/kg K

$s_2 = x_2 \; s_{2''} + (1 - x_2) \, s_{2'}$

$s_2 = 0{,}2387 \cdot 6{,}26899 + (1 - 0{,}2387) \cdot 2{,}53431 = 3{,}426$ kJ/kg K

para la cámara flash: $\Delta S_{CF} = m_V \; s_{2''} + m_L \; s_{2'} - m_T \; s_2 = 0$

para el proceso (válvula y cámara)

$$\Delta S_V = m_V \; s_{2''} + m_L \; s_{2'} - m_T \; s_1 = 0{,}1227 \text{ kW/K}$$

para el medio: ¿ $\Delta S_{MEDIO} = 0$? en rigor, la ΔS_V pertenece al medio de modo que debe decirse $\Delta S_{MEDIO} = \Delta S_V \neq 0$

para el universo: $\Delta S_U = \Delta S_V + \Delta S_M = 0{,}1227$ kW/K