
GUÍA DE APOYO PARA LA RESOLUCIÓN DE EJERCICIOS DE TERMODINÁMICA

CICLOS DE REFRIGERACIÓN

2014

UTN-FRBA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, CÁTEDRA: TERMODINÁMICA
Dra. Ing. Paula Castesana

Nota: Los ejercicios resueltos en esta guía no son necesariamente iguales (aunque sí similares) a los propuestos por la cátedra a través de las guías de problemas de cada año. Este material constituye sólo un apoyo para el estudio de la asignatura, y deberá ser complementado con el conocimiento transmitidos por el equipo de docentes en clase y con la bibliografía correspondiente.

Ejemplo 1

Una heladera utiliza refrigerante Freón 12 como fluido de trabajo y opera entre 0.15 Mpa y 0.7 Mpa en la región líquido vapor. Para expandir el refrigerante se hace uso de un estrangulamiento de la línea. Considerando que el compresor es adiabático reversible, y que el gasto de refrigerante es 0.80 kg/s, determine:

- La temperatura del refrigerante a la salida del compresor.
- El aumento de entropía del universo por unidad de tiempo en el estrangulamiento.
- La eficiencia del refrigerador y la potencia frigorífica.

Aclaración: El Freón 12 es un fluido refrigerante compuesto por clorofluorocarbonos (CFC), un grupo de sustancias con una elevada permanencia en la atmósfera y probados efectos sobre el deterioro de la capa de ozono. Por dicho motivo, su uso se vio restringido a partir de la celebración y entrada en vigencia del Protocolo de Montreal, y en la actualidad ha sido reemplazado por otros fluidos refrigerantes. Sin embargo, el objetivo de esta guía es ofrecer una ayuda para la resolución de ejercicios de Termodinámica, considerándose irrelevante para tal fin la naturaleza química de las sustancias ejemplo, siempre y cuando se haga un buen uso e interpretación de sus propiedades en las distintas fases.

Para resolverlo utilizamos el gráfico T-S del Freón 12 (últimas páginas de la tabla de vapor) y construimos la tabla al mismo tiempo que vamos ubicando los distintos puntos en el gráfico de manera que podamos ver el ciclo completo al finalizar el problema:

Punto **a**: salida del evaporador, por lo tanto estará a la presión de baja 150 kpa, y ya que no nos dicen lo contrario suponemos que es **vapor saturado**. Con estos dos datos podemos especificar todas las propiedades del punto **a** y llenar la tabla.

Punto **b**: salida del compresor, por lo tanto será a la presión de alta 700 kpa, y al ser reversible, la entropía será la misma que la del punto **a**, con estos dos datos podemos llenar la tabla.

Punto **c**: salida del condensador. Sabemos que el refrigerante entra como vapor sobrecalentado (punto b) a 700 kpa, y el condensador es isobárico, por lo tanto recorrerá la línea de 700 kpa hasta entrar a la campana y seguirá a esa presión (ahora línea horizontal) hasta llegar a la curva de líquido saturado definiendo el punto **c, líquido saturado a 700 kpa**, con lo cual nos queda definido el punto y podemos completar la tabla.

Punto **d**: salida de la válvula. Sabemos que la salida para completar el ciclo deberá encontrarse a 150 kpa, presión de baja, y también sabemos que al ser adiabáticas y no tener potencia asociada, las válvulas son isoentálpicas. Entonces para encontrar el punto **d** en el gráfico lo recorreremos por la curva isoentálpica de 106 kcal/kg (dato que leemos abajo de la campana 700 (punto **c**) hasta 150 kpa (líquido-vapor). Con esto nos queda definido el punto, bajando por la vertical encontramos la entropía del punto, por la horizontal la temperatura que deberá ser igual a la del punto a ya que están a la misma presión y dentro de la campana.

	a vap. sat	b	c liq. sat	d
P (kpa)	150	700	700	150
T (°C)	-20	37	27.5	-20
h (kcal/kg)	135	141.5	106 →	106
s (kcal/kg.K)	1.14 →	1.14	1.020	1.025

a. La temperatura la leemos directamente del gráfico T-S: 37°C

b. Variación de entropía en la válvula:

$$\Delta S_u = \Delta S + \Delta S_{ma} \quad \text{por ser adiabática entonces } \Delta S_u = \Delta S = m (s_d - s_c)$$

$$\Delta S_u = \Delta S = 4 \text{ cal/s.K} = 16.74 \text{ W/K}$$

c. Potencia frigorífica o capacidad de refrigeración, que sería el calor capaz de extraer por el ciclo frigorífico. Lo calculamos como el calor absorbido en el evaporador:

Planteando el balance en el evaporador quedaría $\Delta H = Q - W_u$, como no hay W_u entonces $Q_{ev} = \Delta H = m (h_a - h_d) = 23.2 \text{ kcal/s} = 97.07 \text{ kW}$, que es la potencia frigorífica.

Eficiencia del refrigerador = COP = calor extraído por el evaporador / potencia aplicada, entonces $COP = Q_{ev} / W_{compresor}$

Balance en el compresor: $\Delta H = Q - W_u$, lo consideramos adiabático entonces $W_u = -\Delta H$. Para el cálculo de la eficiencia del refrigerador nos interesan los valores absolutos para obtener un resultado mayor que cero, entonces:

$$COP = Q_{ev} / -W_u = m (h_a - h_d) / m (h_b - h_a) = (h_a - h_d) / (h_b - h_a) = 4.46$$

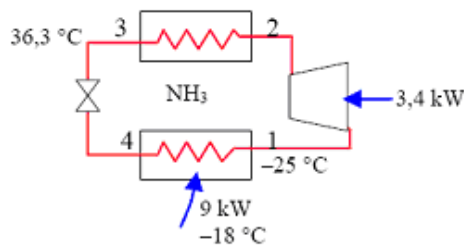
Tener en cuenta que el problema fue resuelto utilizando gráficos para que ustedes puedan resolverlo a la par mía, con el material que tienen. Si obtienen resultados ligeramente diferentes no se asusten. Tracen el gráfico del proceso en el diagrama T-S.

Ejemplo 2

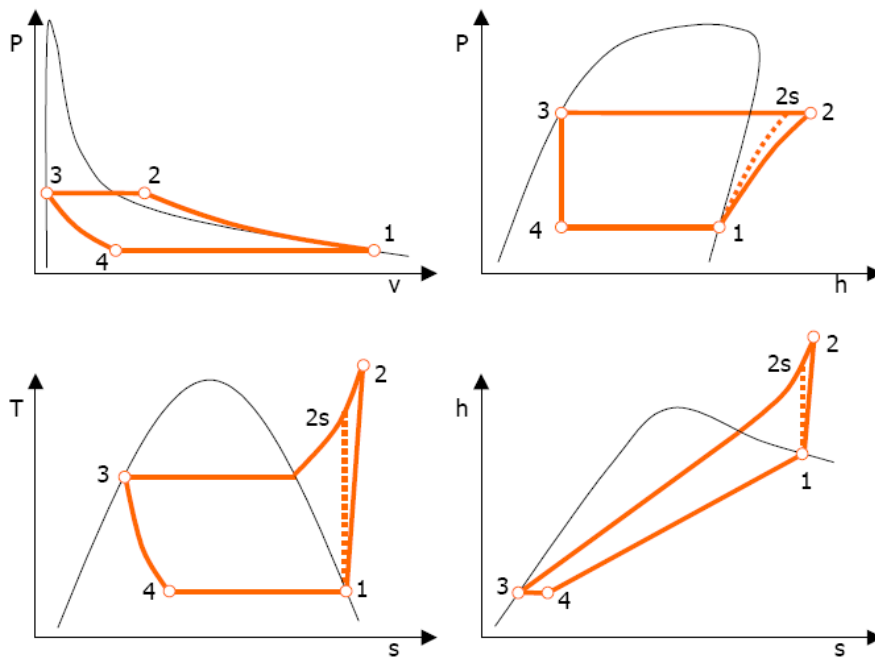
Un becario del departamento de Materiales está estudiando la estabilidad térmica y los procesos de solidificación de los helados. Acaba de viajar a Inglaterra a un centro de investigaciones dotado de microscopios adaptados para estudiar estos materiales. La sala donde trabajará está mantenida a una temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es la temperatura a la cual deben conservarse los helados. El sistema de refrigeración deberá ser capaz de mantener esa temperatura en la habitación compensando las entradas de calor (defectos de aislamiento, apertura esporádica de la puerta, etc.), y la carga térmica generada por los ocupantes de la habitación. El equipo frigorífico opera según un ciclo simple por compresión de vapor, empleando amoníaco (NH_3) como fluido de trabajo. El compresor tiene una potencia de 3.4 kW y en el evaporador se retira una carga térmica de 9 kW en régimen estacionario. El amoníaco abandona el evaporador como vapor saturado seco a la temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. El proceso de compresión puede considerarse adiabático, pero no reversible. El líquido saturado abandona el condensador a $36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se expande hasta la presión del evaporador. La temperatura ambiente es $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se pide:

- Representar esquemáticamente el ciclo en dos diagramas termodinámico (Pv , Ph , Ts o hs).
- Coeficiente de operación del ciclo.
- Caudal de amoníaco que circula en el ciclo (en kg/h)
- Temperatura de salida del compresor
- Rendimiento isoentrópico del compresor
- Pérdida de exergía en el evaporador

Diagrama de flujo del ciclo frigorífico:



(a) Diagramas termodinámicos:



Construcción de la tabla

Yo lo resolví con las tablas que pueden encontrar en: <http://www.fing.edu.uy/if/cursos/fister/apoyo/tablas/index.html>. La opción de tabla inteligente nos ahorra el paso de interpolar. Igualmente, y considerando que en los exámenes no tendrán tabla inteligente sino un gráfico, les recomiendo que lo resuelvan también con la tabla de vapor que usamos en la clase que al final hay un diagrama TS para el amoníaco, como hicieron con el problema anterior. Tengan en cuenta que los datos que aparecen en el gráfico son distintos a los que les pongo acá, no solo porque cambian las unidades sino también porque han tomado otro punto de referencia, pero como ya sabemos, los valores de los deltas deberían dar igual a lo que calculamos acá utilizando la tabla, permitiéndonos alguna diferencia por el error cometido en la lectura.

Tengan en cuenta también que para resolver REFRIGERACIÓN usamos la misma lógica que para ciclos de potencia, pero recorremos el ciclo para el otro lado!!! ahora en sentido antihorario, ocurriendo en la línea de baja presión la evaporación y en la de alta presión la condensación, al revés que antes.

Sabiendo las condiciones de salida del evaporador, -25°C como vapor saturado, buscamos en la tabla del amoníaco las propiedades restantes, ya que el punto 1 por ser Vap. Sat y conocer la T queda definido.

Luego, el **líquido saturado** del condensador abandona el equipo a $36,3^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, tenemos definido el punto 3, completamos la tabla.

Sabemos que la condensación será isobárica, por lo tanto, el vapor entrará al equipo a la misma presión que a la que sale el líquido, por lo tanto, conocemos la presión de entrada al condensador, y por lo tanto la presión de salida del compresor, que es la presión de saturación a $36,3^{\circ}\text{C}$: **1401.2 kpa**. Con este dato podemos definir la presión del punto 2 isoentrópico ya que es la misma que el 1 real, y la presión del punto 3, con lo cual el punto 3 queda definido por conocer 2 variables.

Del punto 4 conocemos la presión ya que será la misma que la presión de salida del evaporador, y también sabemos que las válvulas son isoentálpicas, por lo tanto $h_4 = h_3$, con lo cual nos queda definido el punto 4 también.

(b) Coeficiente de operación del ciclo:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{\dot{W}_{\text{compresor}}} = \frac{9}{3,4} = \underline{2,65}$$

(c) Caudal de amoníaco que circula en el ciclo (en kg/h):

$$\dot{Q}_{\text{evaporador}} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

Entonces $\dot{m} = [\dot{Q}_{\text{ev}} / (h_1 - h_4)] \cdot 3600\text{s/h} = \mathbf{30.61 \text{ kg/h}}$

(d) Temperatura de salida del compresor:

$$\dot{W}_{\text{compresor}} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \therefore \quad h_2 = h_1 + \frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

Entonces $h_2 = \mathbf{1811.95 \text{ kJ/kg}}$, conociendo la entalpía y la presión podemos definir entonces el punto 2. Tendremos que interpolar con los valores de la tabla de amoníaco:

$$(T_2 - 160)/(180 - 160) = (1811.95 - 1804.5)/(1854.7 - 1804.5)$$

Entonces $T_2 = \mathbf{163^\circ C}$, y sacamos la entropía también interpolando:

$$(s_2 - 5.8273)/(5.9406 - 5.8273) = (1811.95 - 1804.5)/(1854.7 - 1804.5)$$

Entonces $s_2 = \mathbf{5.8441 \text{ kJ/kg.K}}$

(e) Rendimiento isoentrópico del compresor:

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Para sacar las condiciones del punto 2s interpolamos los valores de la tabla de amoníaco ya que conocemos la presión (igual a la del punto 2) y la entropía (igual a la del punto 1):

$$(h_{2s} - 1703.9)/(1754.3 - 1703.9) = (5.6992 - 5.5836)/(5.7087 - 5.5836)$$

Entonces $h_{2s} = \mathbf{1750.47 \text{ kJ/kg}}$. Para completar los datos del punto 2s hacemos lo mismo con la temperatura y obtenemos que $T_{2s} = \mathbf{138.48^\circ C}$

Calculamos ahora sí el rendimiento isoentrópico del compresor y obtenemos $\eta_s = \mathbf{84.6\%}$.

(f) Pérdida de exergía en el evaporador:

$$\Delta Ex^c = \dot{m} \cdot (\Delta h_{\text{ev}} - T_0 \cdot \Delta s_{\text{ev}}) = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_4) - T_0 \cdot (s_1 - s_4)] = \mathbf{-1.81 \text{ kW}}$$

$\Delta Ex^F = -\dot{Q}_{\text{ev}} \cdot (1 - T_0/T_F) = -9\text{kW} \cdot (1 - 298/255) = \mathbf{1.52\text{kW}}$, considerando la temperatura de la fuente igual a la temperatura de la cámara a refrigerar = $-18^\circ C$.

$$\Delta Ex^{\text{ta}} = \Delta Ex^c + \Delta Ex^F = \mathbf{0.29 \text{ kW}}$$

Y calculamos el trabajo perdido, que nos debe dar igual al balance que acabamos de realizar pero con **signo positivo** ya que en el evaporador no hay potencia en juego:

$$\Delta S_u = \Delta S + \Delta S_{ma} = m \cdot (s_1 - s_4) - Q_{ev}/T_F = \mathbf{0.97 \text{ W/K}}$$

Entonces el trabajo perdido sera:

$$W_p = T_0 \cdot \Delta S_u = \mathbf{0.29 \text{ kW}}$$

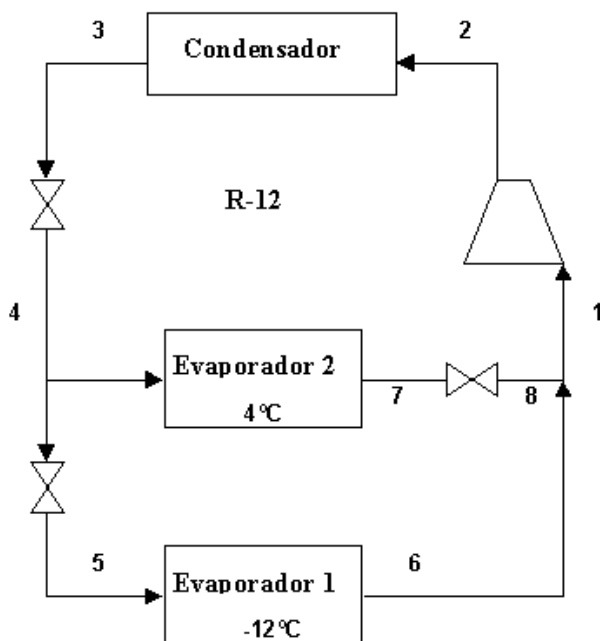
	1 vap. sat	2s	2	3 liq. sat.	4 título=0.2130
P (kpa)	151.7	1401.2	1401.2	1401.2	151.7
T (°C)	-25	138.48	163	36.3	-25
h (kJ/kg)	1411.95	1750.47	1811.95	353.57 →	353.57
s (kJ/kg.K)	5.6992 →	5.6992	5.8441	1.3016	1.4333

Ejemplo 3

La figura representa el diagrama esquemático del sistema de refrigeración de un frigorífico doméstico. El sistema consta de dos evaporadores que operan a dos temperaturas distintas (la de la nevera y la del congelador), un compresor y un condensador. El ciclo de refrigeración trabaja con freón 12. El Evaporador 1 tiene como objetivo mantener el congelador a $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, absorbiendo una potencia calorífica de 0,16 ton. El evaporador 2 mantiene la cámara de la nevera a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, absorbiendo una potencia calorífica de 0,08 ton. El freón 12 a la salida del evaporador 1 lo hace como vapor saturado a una presión de 150 kPa. El evaporador 2 produce a la salida vapor saturado a 250 kPa. El compresor es adiabático y tiene un rendimiento isoentrópico de 0,80. En el condensador la presión es de 1000 kPa y el freón 12 a la salida del mismo es líquido saturado. Se refrigera con aire del ambiente, cuya temperatura es 293 K. Se pide:

- Representar el ciclo frigorífico en un diagrama T - s indicando claramente las temperaturas del ambiente y de las dos cámaras.
- Calcular el flujo másico de refrigerante en cada evaporador (kg/min).
- Calcular la potencia necesaria en el compresor (W).
- Calcular el flujo de calor transferido por el refrigerante a su paso por el condensador (W).
- Calcular el COP del ciclo frigorífico.

Nota: No es necesario calcular todos los valores de la tabla.

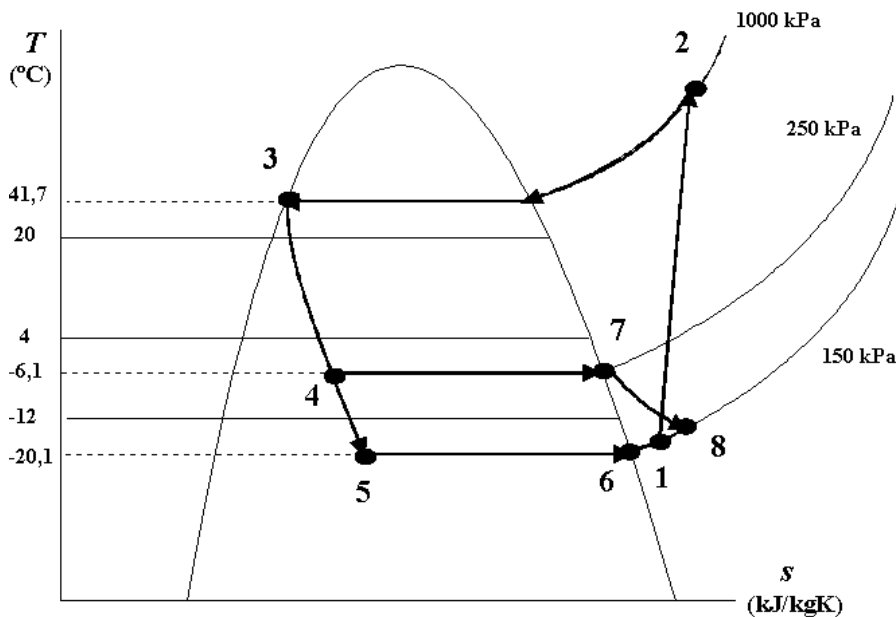


Analizamos el diagrama: Partiendo del punto 1, el fluido pasa por el compresor hasta llegar a una presión de 100 kPa, presión del condensador. La salida del condensador, punto 3 se encuentra a 1000 kPa y es líquido saturado, con lo cual podemos definir el punto. Luego pasa por la primera válvula, la cual reduce la presión hasta la del evaporador de mayor presión, 250 kPa, presión del evaporador 2. La salida del evaporador 2, punto 7, se encontrará, al ser el evaporador isobárico, a 250 kPa. Esta corriente se mezclará luego con la corriente 6, que se encuentra a 150 kPa. Para poder realizar la mezcla de ambas necesitamos que las presiones sean iguales, equilibrio mecánico, si no la circulación del fluido se vería forzada a avanzar por la cañería de menor presión. Es por esto que

necesitamos colocar una válvula a la salida del evaporador 2, para reducir la presión, 250 kPa, a la presión de la corriente 6, 150 kPa. Por lo tanto, la presión de la corriente 8 será de 150 kPa. Por otra parte, volvemos a mirar la corriente 4: ésta tiene una presión de 250 kPa, se divide el flujo de manera que una parte entrará directamente y con las condiciones del punto 4 al evaporador 2, y la otra parte del flujo pasará por una válvula que reducirá la presión hasta el valor del evaporador 1, 150 kPa, punto 5. La salida de este evaporador será el punto 6, corriente que luego se mezclará con la 8 para formar la 1, que estará a la misma presión, 150 kPa, presión de entrada al compresor.

Estado	P	T	x	h	s
	kPa	°C		kJ/kg	kJ/kg K
1	150				
2	1000				
3	1000		Líquido saturado		
4	250				
5	150				
6	150		Vapor saturado		
7	250		Vapor saturado		
8	150				

1.- Representación del ciclo en un diagrama T - s .



Pueden calcular los datos necesarios usando las tablas que encuentran en: <http://www.fing.edu.uy/if/cursos/fister/apoyo/tablas/index.html>, **refrigerante 12**. También pueden usar el diagrama que tienen en la tabla de vapor para el Freon 12, otra vez, el punto de referencia que han tomado es otro, pero los deltas deberían dar igual. Si quieren igualmente traten de ubicar los puntos en ese diagrama para ver bien como funciona este ciclo.

Partimos del punto 3, (o del que quieran, es indistinto) del cual conocemos la presión y sabemos que es líquido saturado. Al pasar el fluido por la válvula estamos en presencia de un proceso isoentálpico, por lo tanto, el punto 4 y el punto 5 tendrán la misma entalpía que el punto 3, y conociendo las respectivas presiones, conocemos todas las propiedades de dichos puntos, entradas a los evaporadores. De las salidas, puntos 6 y 7, conocemos las presiones y sabemos que se trata de vapor saturado en ambos casos. El punto 8, al haber pasado por una válvula, tiene la misma entalpía que el punto 7, y la misma presión que el punto 6 y el 1, ya que ese es el objetivo de dicha válvula. Nos falta entonces definir el punto 1, pero sabemos que estará a 150 kPa, y su temperatura o su entalpía será el resultado de la mezcla de dos corrientes (#)

Tabla con las propiedades que son necesarias de cada uno de los estados del ciclo:

Estado	P	T	x	h	s
	kPa	°C		kJ/kg	kJ/kg K
1	150			181,1	0,7193
2s	1000			215,94	0,7193
2	1000			224,65	
3	1000	41,7	0	76,21	
4				76,21	

5				76,21	
6	150	-20,1	1	179,07	
7	250	-6,1	1	185,37	
8	150			185,37	

La **Tonelada de Refrigeración** (así nos han dado el dato del calor que se extrae en cada evaporador) equivale a una potencia capaz de extraer 12,000 BTUs de calor por hora, es decir que, en el SI, equivale a 3,516 kW. Este valor proviene de la cantidad de calor constante necesario para derretir una Tonelada de hielo en 24 horas. Por lo tanto: 1 ton = 3,516 kW = 3,516 kJ/s. Como nos piden el resultado en kg/min vamos a pasar este factor de conversión a minutos en vez de segundos, entonces:

$$3,516 \text{ kJ/s} = 3,516 \text{ kJ/s} \cdot 60 \text{ s/min} = \mathbf{211 \text{ kJ/min}}$$

2.- Flujo másico en cada evaporador.

$$\dot{Q}_{ev1} = \dot{m}_1(h_6 - h_5) \Rightarrow \dot{m}_1 = \frac{0,16 \cdot 211}{179,07 - 76,21} = \mathbf{0,328 \frac{kg}{min}}$$

$$\dot{Q}_{ev2} = \dot{m}_2(h_7 - h_4) \Rightarrow \dot{m}_2 = \frac{0,08 \cdot 211}{185,37 - 76,21} = \mathbf{0,155 \frac{kg}{min}}$$

3.- Potencia consumida por el compresor.

Conocemos el rendimiento isoentrópico, o sea:

$$\eta_s = W_{\text{isoentrópica}} / W_{\text{real}} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1) \text{ entonces } (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1) / \eta_s$$

y la potencia real consumida es: $W_{\text{compresor}} = m \cdot (h_2 - h_1) = m \cdot (h_{2s} - h_1) / \eta_s$ y m será la suma de las velocidades másicas de los dos evaporadores: $m = m_1 + m_2$ (con el puntito arriba pero no lo encuentro en Word). Por lo tanto:

$$\dot{W}_c = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s}$$

El punto 1 es la mezcla de los puntos 6 y 8. Aplicando el 1^{er} Principio se obtiene que la mezcla es isoentálpica y a partir de esto se puede calcular la entalpía del punto 1:

En una cámara de mezcla:

$$\sum (m_{\text{salida}} \cdot h_{\text{salida}}) - \sum (m_{\text{entrada}} \cdot h_{\text{entrada}}) = Q - W = 0, \text{ no hay potencia y la consideramos adiabática.}$$

Tenemos una corriente de salida igual a la suma de las corrientes de salida de los dos evaporadores e igual a la masa total que está circulando, y dos entradas a la cámara de mezcla, la referida al punto 8, que corresponde al evaporador 2 y opera con m_2 , y la referida al punto 6, que corresponde al evaporador 1 y opera con m_1 .

$$(m_1 + m_2) \cdot h_1 - (m_1 \cdot h_6 + m_2 \cdot h_8) = 0$$

(#) Podemos calcular h_1 y con este dato definir el punto 1. A su vez, podemos definir el punto 2 isoentrópico o 2s, ya que conocemos la presión, que será igual a la presión real de salida del

compresor, o sea, la presión del punto 2 (1000 kpa) y al ser un punto isoentrópico sabemos que su entropía será igual a la entropía de entrada al compresor, la del punto 1 recién definido. Nos queda entonces definido el punto 2s con $P_{2s}=1000$ kpa y $S_{2s}=0,7193$ kJ/kg K, completamos la tabla de arriba con los datos que buscamos en la tabla del freon 12 y sacamos la $h_{2s} = 215,94$ kJ/kg.

$$h_1 = \frac{\dot{m}_1 h_6 + \dot{m}_2 h_8}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = 181,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_c = 0,483 \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{215,94 - 181,1}{0,8} = \mathbf{350,84 \text{ W}}$$

A su vez, con estos datos y el rendimiento isoentrópico podemos obtener h_2 y conociendo la presión, nos queda definido el punto 2 también:

$$h_2 = [(h_{2s} - h_1) / \eta_s] + h_1 = \mathbf{224,65 \text{ kJ/kg}}$$

4.- Calor retirado en el condensador.

$$\dot{Q}_e = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_2 - h_3) = 0,483 \cdot \frac{10^3}{60} \cdot (224,65 - 76,21) = \mathbf{1195 \text{ W}}$$

5.- COP.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ev1} + \dot{Q}_{ev2}}{\dot{W}_c} = \frac{(0,16 + 0,08) \cdot \frac{211}{60} \cdot 10^3}{350,58} = \mathbf{2,41}$$