

III. REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR EN DOS ETAPAS

1. OBJETIVO

- Aplicar las Leyes de la Termodinámica a un sistema de refrigeración por compresión de vapor de dos etapas, obteniendo valores cuantitativos de energía, el coeficiente de performance de la planta (COP) y el rendimiento del compresor.
- Observar y analizar las tendencias del ciclo termodinámico y compararlos con los procesos correspondientes al ciclo teórico, para verificar las pérdidas de energía y desviaciones que ocurren.

2. EQUIPO A EMPLEAR

Se utilizará la planta de refrigeración que utiliza como fluido de trabajo al refrigerante R-134^a y dispone de los siguientes equipos:

Compresor alternativo

- Tipo : Desplazamiento positivo - simple efecto
- Número de pistones : 2
- Diámetro : 40 mm
- Carrera : 30 mm
- Potencia del motor : 0.75 kW
- Relación de transmisión : 2 a 1 (Velocidad del motor/Velocidad compresor)

Condensador de superficie

- Tipo : Carcasa y serpentín
- Enfriador : Aire

Válvulas de control

- Tipo : De expansión termostática

Cámaras frigoríficas

- Aislamiento : Poliuretano expandido de 100 mm de espesor.
- Volumen : 288 litros cada una.

Calentadores eléctricos

- Resistencias eléctricas : 400 W

Panel de control

- Interruptor del motor eléctrico
- Interruptor del calentador eléctrico
- Variador de voltaje para el calentador eléctrico

- Interruptor del ventilador del condensador
- Interruptor para cada válvula solenoide

3. INSTRUMENTACIÓN

- Cinco (05) transmisores de presión manométrica con sensor de cristal de silicio resonante.
- Seis (06) transmisores de temperatura con sensor RTD PT100.
- Dos (02) medidores de flujo para R-134a
- Un (01) vatímetro conectado al calorímetro, con rango en dos escalas.
- Un (01) módulo de adquisición de datos (MV 100)

En la figura 1 se observa la vista general de disposición de los equipos de la planta de refrigeración.

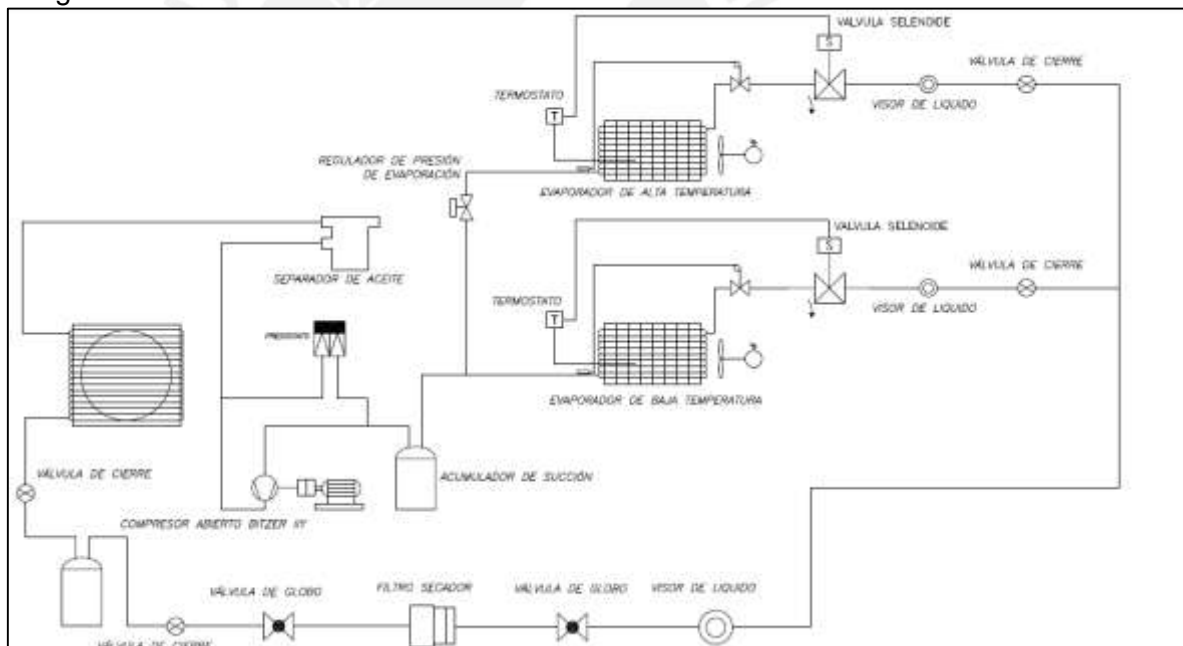


Figura 1. Esquema técnico de la planta de refrigeración

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Generalidades

La función de un sistema de refrigeración es evacuar calor de un espacio cerrado y mantener su temperatura a un valor menor que la temperatura ambiental. Existen diversos sistemas para producir refrigeración:

- * Por compresión mecánica de vapor y gas.
- * Por compresión térmica y dinámica de vapor y gas.
- * Por absorción de vapor en líquidos y sólidos.
- * Por adsorción.
- * Por efectos termoeléctricos.
- *

Los principales sistemas empleados comercial e industrialmente se basan en la **compresión mecánica de vapor** (con compresoras) y en la **absorción de vapor** (con intercambiadores de calor). La elección de éste último depende de la disponibilidad de fuentes de calor (directo o residual), sin recurrir a la energía mecánica o eléctrica. Por lo general, el sistema de compresión mecánica muestra mayor flexibilidad desde pequeñas a grandes capacidades.

Otros sistemas de refrigeración se utilizan en instalaciones específicas: **compresión y expansión de aire** en climatización de cabinas de aeronaves, y **compresión de gases en eyectores** (térmica y dinámica) en instalaciones de recuperación de destilados de petróleo muy volátiles. Los sistemas con **efecto termoeléctrico** (efectos Peltier, Seebeck) se usan con baja capacidad de refrigeración, a nivel doméstico y en investigación. No están muy difundidos a nivel comercial.

4.2. Refrigeración por compresión mecánica de vapor

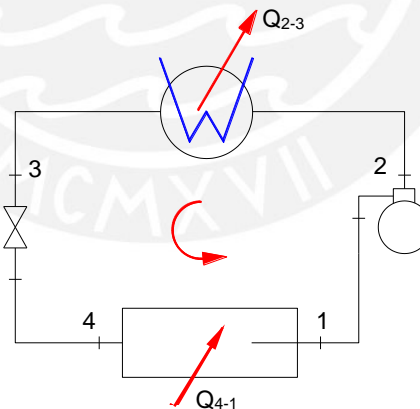


Figura 3. Planta de refrigeración por compresión de vapor

Este sistema se basa en dos principios termodinámicos básicos:

- * Cuando un fluido se evapora, absorbe calor
- * Cuando un fluido se condensa, cede calor

4.3. Refrigerantes

Para transferir calor desde un ambiente a baja temperatura hacia otro a alta temperatura,

se requiere la aplicación de un ciclo termodinámico que utilice un fluido, el refrigerante, que evapore a baja temperatura.

El refrigerante debe absorber calor del ambiente a refrigerar, por lo que su temperatura de evaporación debe ser menor a la de dicho ambiente. Luego debe ceder calor, por lo que su temperatura de condensación debe ser mayor a la del ambiente al cual se cede calor.

Así, mediante un compresor se incrementa la presión del fluido para que su temperatura de saturación (T_{sat}) correspondiente sea mayor que la del ambiente al cual se cede calor. Y mediante una válvula de expansión se reduce la presión del fluido para que su T_{sat} sea lo suficientemente baja para producir refrigeración.

De los pocos fluidos que pueden ser utilizados como refrigerantes, las características indeseables de algunos de ellos (toxicidad, explosividad, inflamabilidad) los descartan, quedando principalmente los hidrocarburos halogenados (Hidro y Cloro Fluorocarbonos –HFC y CFC– y sus compuestos.

4.4. Componentes de la planta de refrigeración

Los componentes principales de la planta pueden ser analizados en base a modelos termodinámicos; pero, dado que ocurren desviaciones respecto del ciclo termodinámico ideal, es necesario estudiar experimentalmente el ciclo utilizando componentes reales.

4.4.1. Compresor

El compresor empleado en este ensayo es tipo alternativo, de una sola etapa de compresión. Utiliza un pistón que se desplaza alternativamente dentro de un cilindro, reduciendo el volumen para comprimir al refrigerante. En este tipo de compresor existe un espacio libre, el volumen muerto, sobre el cual no se puede actuar para seguir reduciendo el volumen de compresión.

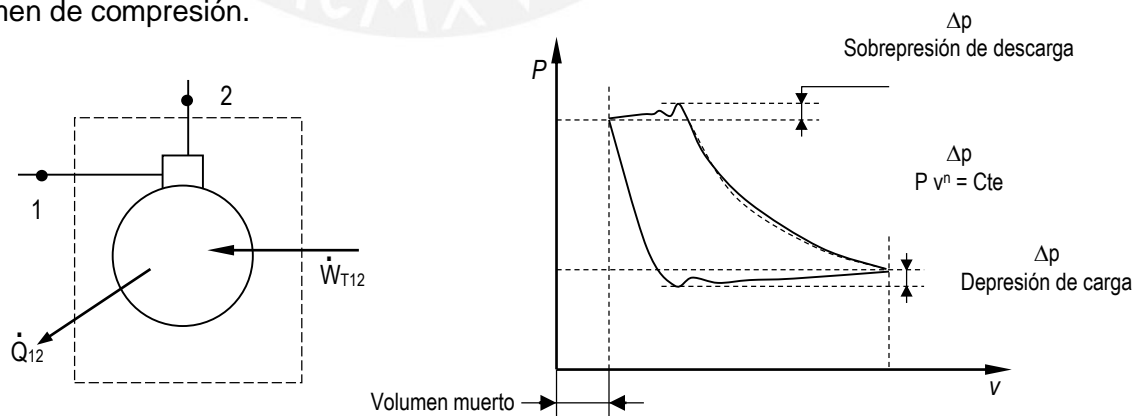


Figura 2. Esquema del compresor y Diagrama p-V



El vapor refrigerante es calentado durante la compresión debido a la fricción en el fluido. Aplicando la primera ley de la termodinámica:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{W}_{t12} + \Delta\dot{H}_{12}$$

Por ser el cambio en la energía cinética y potencial no significativo, para facilitar el cálculo se despreciará esta variación. El exponente politrópico de compresión (n) del refrigerante vaporizado puede ser deducido a partir de la siguiente relación:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n$$

Si se considera que los cambios de energía cinética y potencial son despreciables, la ecuación de balance de energía viene a ser:

$$\dot{Q}_{12} + |\dot{Q}_w| = -\dot{m}_R \cdot \int_1^2 v dp + \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_1)$$

Donde la integral puede ser evaluada considerando un proceso politrópico de sustitución. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{t12} &= -\int_1^2 v dp - e_k - e_p \\ -\int_1^2 v dp &= \frac{n}{1-n} \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1) \end{aligned}$$

La cuantificación del trabajo técnico que recibe el compresor del motor eléctrico se realiza de la siguiente manera:

$$\dot{W}_{t12} = -T \cdot \omega$$

Donde: T = Torque (N.m)
 ω = Velocidad angular de giro del motor eléctrico (rad/s)

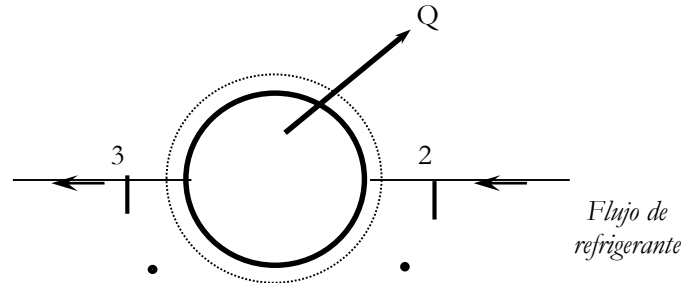
El calor que se produce por el rozamiento del fluido con las paredes del compresor es el calor de fricción. Así, suponiendo FEES, y despreciando ΔE_K , ΔE_P , la ecuación de energía para el portador se tiene:

$$|\dot{Q}_w| + \dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot \Delta h - \int_1^2 v dp$$

4.4.2. Condensador

Es un intercambiador de calor que consta de un serpentín por donde circula el refrigerante (R-134A) y es enfriado por el aire del medio ambiente.

4


Figura 3. Primera Ley en el Condensador

Por la primera ley, al no haber trabajo de cambio de volumen ($\dot{W} = 0$) y despreciando los cambios de energía cinética ($\Delta E_K = 0$) y potencial ($\Delta E_P = 0$) se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \sum \dot{m}_s \times h_s - \sum \dot{m}_i \times h_i + \dot{W} + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_R * (h_3 - h_4)$$

Donde: \dot{m}_R = flujo másico de R-134a (kg/s)

4.4.3. Válvula de expansión

Es una válvula de regulación de presión. Al pasar por ella, el refrigerante líquido es estrangulado, reduciendo su presión y su temperatura para así poder absorber calor a baja temperatura. También permite regular el flujo de refrigerante.

El proceso a través de la válvula de expansión, se asumirá isoentálpico:

$$h_3 \approx h_4 \approx h_7$$

Nota:

Para que el proceso en la válvula sea isoentálpico se deberá considerar despreciables los cambios de energía cinética ($\Delta E_K = 0$) y potencial ($\Delta E_P = 0$) además de que no se desarrolla trabajo técnico y considerar al proceso adiabático.

4.4.4. Cámaras frigoríficas (Evaporador)

Constituido por paneles aislantes de 100 mm de espesor. Consta de un serpentín de cobre (evaporador) y un calentador eléctrico.

El suministro de calor para la evaporación del refrigerante es proporcionado mediante el calentador eléctrico (Resistencias).

También se produce transferencia de calor entre la cámara y el ambiente exterior a través de las paredes.

Luego, aplicando Primera Ley para el sistema entero resulta:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_R(h_5 - h_4) - \dot{W}_E$$

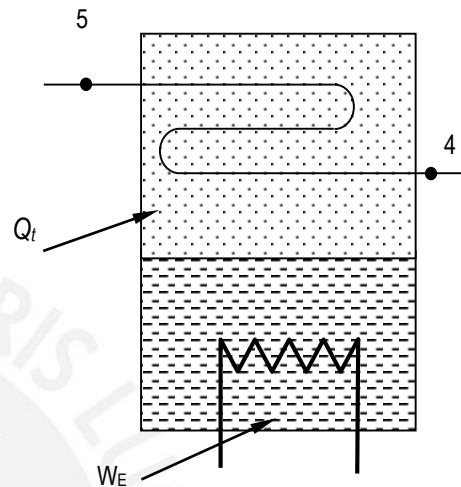


Figura 4. Esquema de la cámara de Refrigeración

4.5. Rendimientos

- Coeficiente de Performance:

$$COP_{Planta} = \frac{\dot{m}_R \cdot (h_1 - h_4)}{|\dot{W}_{t12}|}$$

5. PROCEDIMIENTO

5.1. Pruebas a Realizar

Ensayar el equipo a diferentes cargas térmicas ($P_r \in \{300 \text{ W}, 400 \text{ W y } 500 \text{ W}\}$).

- Esperar a que la planta estabilice para tomar lecturas de:
 - * Presión y temperatura en cada punto.
 - * Flujos de refrigerante.
 - * Fuerza en el dinamómetro.
 - * Velocidad de rotación del motor.
 - * Potencia eléctrica en las resistencias.



5.2. Antes del Ensayo

- Cuidar que todos los interruptores se hallen en posición de apagado.
- Asegurarse del buen estado de los instrumentos.
- Verificar la conexión a tierra del equipo.
- Conectar el equipo al suministro general de corriente.

5.3. Durante el Ensayo

- Arrancar el motor eléctrico pulsando el botón "ON". Revisar que
- Encender el calentador colocando la llave "Resis" en la posición "ON".
- Ajustar la potencia eléctrica en las resistencias haciendo uso del variador de voltaje (200W, 400 W, 500 W) para cada cámara de refrigeración.

5.4. Precauciones Durante el Ensayo

Se deben tomar las siguientes precauciones durante la operación del equipo:

- La temperatura de la tubería de aspiración del compresor debe ser tal que no se forme escarcha al exterior. Esto indica que el refrigerante está en estado de vapor saturado y podría arrastrar líquido que dañar al compresor. En ese caso, la medida a adoptar sería verificar la carga eléctrica suministrada en el calorímetro y aumentarla para proporcionar sobrecalentamiento en el vapor refrigerante aspirado por el compresor.
- Notar que la caída de presión en el condensador suele ser mínima, mientras que en el evaporador se produce un flujo de mezcla líquido-vapor, por lo cual la caída de presión es mayor.
-

Para apagar el equipo

- Bajar toda la carga de las resistencias
- Apagar el calorímetro, colocando la llave "Resis" en la posición "OFF".
- Apagar el motor eléctrico, pulsando el botón OFF".
- Desconectar el equipo.

6. CÁLCULOS Y GRÁFICOS

- Evaluar para cada carga:
 - * El balance de energía en el compresor, el condensador y las cámaras.
 - * El trabajo técnico entregado al sistema.
 - * El flujo másico de agua y refrigerante que circula por el sistema.
 - * El coeficiente de performance (COP) de la planta.
- Graficar los procesos en un único diagrama p-h del R-134A, para las tres cargas.
- Graficar los siguientes parámetros versus la capacidad de refrigeración, para las tres cargas:
 - * El trabajo técnico en el compresor.

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA
SECCIÓN INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE ENERGÍA



- * El flujo másico circulante del refrigerante R-134A.
- * El coeficiente de performance (COP).

7. HOJA DE DATOS

PARÁMETROS	Símbolo	Unidad	$P_r = 200 \text{ W}$	$P_r = 300 \text{ W}$	$P_r = 500 \text{ W}$
Presiones:					
Entrada al Compresor	P_1	barg			
Salida del Compresor	P_2	barg			
Salida del Condensador	P_3	barg			
Salida de la Válvula de Alta	P_4	barg			
Salida de la Válvula de Baja	P_7	barg			
Temperaturas:					
Entrada al Compresor	T_1	°C			
Salida del Compresor	T_2	°C			
Salida del Condensador	T_3	°C			
Salida de la Válvula de Alta	T_4	°C			
Salida de la Válvula de Baja	T_7	°C			
Temperatura Ambiental	$T_a = T_5$	°C			
Temperaturas superficiales internas cámara de Alta	T_9	°C			
Temperaturas superficiales internas cámara de Alta	T_{10}	°C			
Temperaturas superficiales internas cámara de Baja	T_{11}	°C			
Temperaturas superficiales internas cámara de Baja	T_{12}	°C			
Fuerza:					
Torque	M_t	N-m			
Velocidad rotacional:					
Motor eléctrico	n_m	rpm			
Flujos:					
Refrigerante	\dot{V}_R	l/min			
Carga térmica en las cámaras					
Potencia en resistencias de Alta	P_{ra}	W			
Potencia en resistencias de Baja	P_{rb}	W			



8. HOJA DE CÁLCULOS

Expresión	Unidades	$P_r = 200 \text{ W}$	$P_r = 300 \text{ W}$	$P_r = 500 \text{ W}$
Presión absoluta entrada compresor p_1	kPa			
Presión absoluta salida compresor p_2	kPa			
Presión absoluta salida condensador p_3	kPa			
Presión absoluta salida válvula p_4	kPa			
Entalpía específica entrada de compresor h_1	kJ/kg			
Entalpía específica salida de compresor h_2	kJ/kg			
Entalpía específica salida de condensador h_3	kJ/kg			
Entalpía específica salida de válvula de Alta h_5	kJ/kg			
Entalpía específica salida de válvula de Baja h_7	kJ/kg			
Volumen específico entrada de compresor v_1	m^3/kg			
Volumen específico salida de compresor v_2	m^3/kg			
Volumen específico salida de condensador v_3	m^3/kg			
Velocidad angular del eje del motor $\omega_m = \frac{\pi \times n_m}{30}$	rad/s			
Trabajo técnico en el compresor $\dot{W}_{t12} = \frac{T \times \omega_m}{1000}$	kW			
Exponente politrópico medio $n_{12} = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(v_1/v_2)}$	-			



Expresión	Unidades	$P_r = 200 \text{ W}$	$P_r = 300 \text{ W}$	$P_r = 500 \text{ W}$
<p>Trabajo específico politrópico</p> $-\int_1^2 v dp = \left(\frac{n}{1-n} \right) p_1 \times v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$	kJ/kg			
<p>Flujo de refrigerante de Alta</p> $\dot{m}_{RA} = \frac{\dot{V}_{RA}}{v_3 \times 60000}$	kg/s			
<p>Flujo de refrigerante de Baja</p> $\dot{m}_{RB} = \frac{\dot{V}_{RB}}{v_3 \times 60000}$	kg/s			
<p>Calor transferido en el compresor</p> $\dot{Q}_{12} = \dot{m}_R (h_2 - h_1) - \left \dot{W}_{t12} \right $	kW			
<p>Calor transferido en el condensador</p> $\dot{Q}_{23} = \dot{m}_R (h_3 - h_2)$	kW			
<p>Capacidad de refrigeración de alta</p> $\dot{Q}_R = \dot{m}_{RA} (h_5 - h_4)$	kW			
<p>Capacidad de refrigeración de baja</p> $\dot{Q}_R = \dot{m}_{RB} (h_7 - h_4)$	kW			
<p>Calor transferido en la cámara de alta</p> $\dot{Q}_C = \dot{m}_R (h_5 - h_4) - \left \dot{W}_E \right $	kW			
<p>Calor en la cámara de alta</p> $\dot{Q}_C = \dot{m}_R (h_7 - h_4) - \left \dot{W}_E \right $	kW			