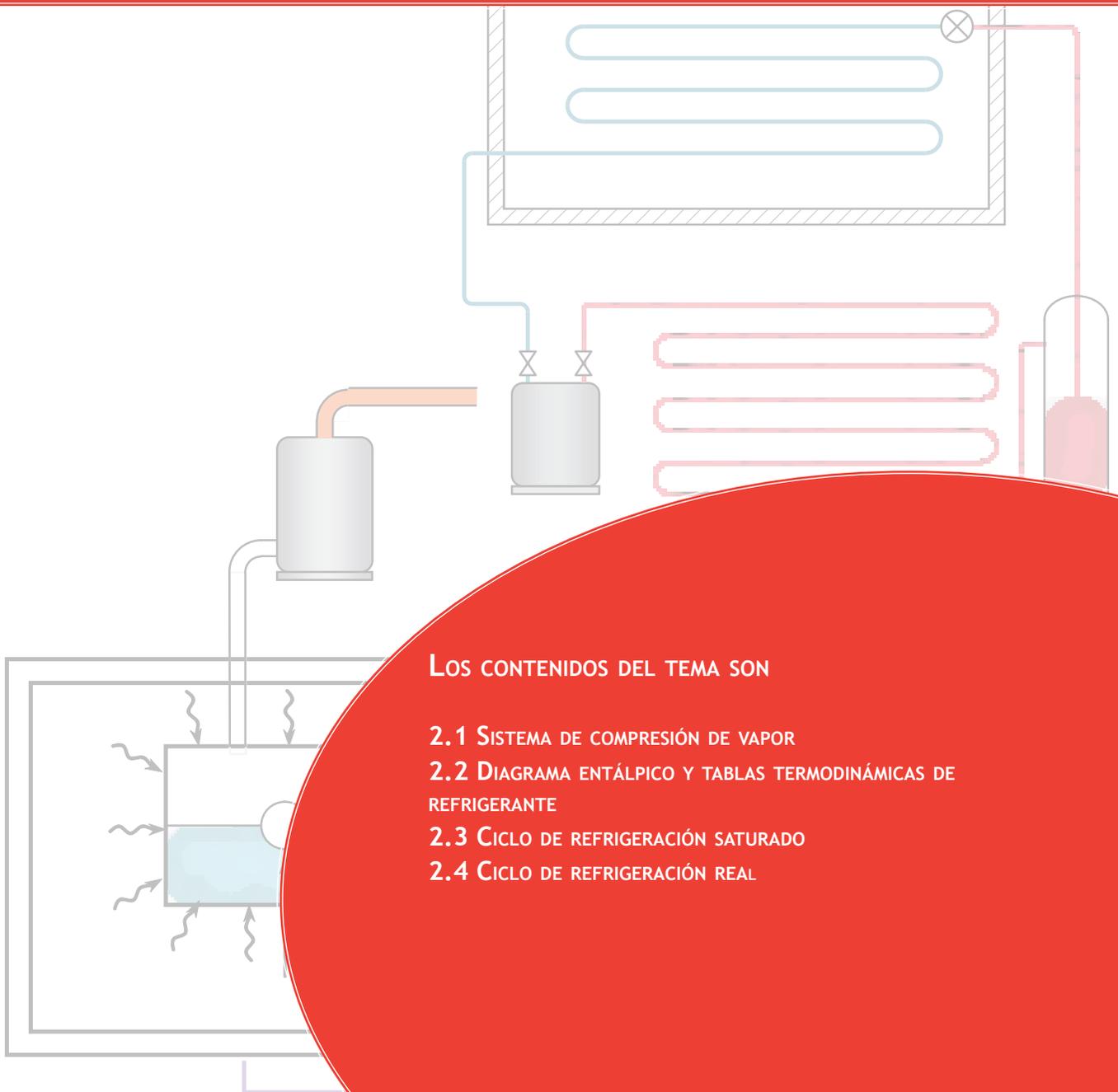


TERMODINÁMICA DE REFRIGERACIÓN

2



LOS CONTENIDOS DEL TEMA SON

- 2.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN DE VAPOR
- 2.2 DIAGRAMA ENTÁLPICO Y TABLAS TERMODINÁMICAS DE REFRIGERANTE
- 2.3 CICLO DE REFRIGERACIÓN SATURADO
- 2.4 CICLO DE REFRIGERACIÓN REAL

2.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN DE VAPOR

2.1.1 RELACIÓN PRESIÓN-TEMPERATURA Y RECIPIENTES DE REFRIGERANTE

Para explorar el funcionamiento de un sistema de refrigeración, se utilizará el refrigerante R-134a como referencia. La presión y temperatura de saturación de un refrigerante se corresponden cuando hay presente tanto líquido como vapor bajo dos condiciones:

- Cuando esté teniendo lugar el cambio de estado (vaporización o condensación).
- Cuando el refrigerante esté en equilibrio (ni se añade ni se elimina calor).

La temperatura y, por tanto, la presión de una botella que contiene R-134a se estabilizarán hasta conseguir la temperatura del ambiente donde se encuentre, debido a que su contenido es una mezcla de líquido y vapor.

En una habitación a temperatura ambiente de 24 °C, la botella y su contenido, se estabilizarán hasta alcanzar dicha temperatura; la tabla p-T (presión-temperatura) indica una presión absoluta de 646 kPa.

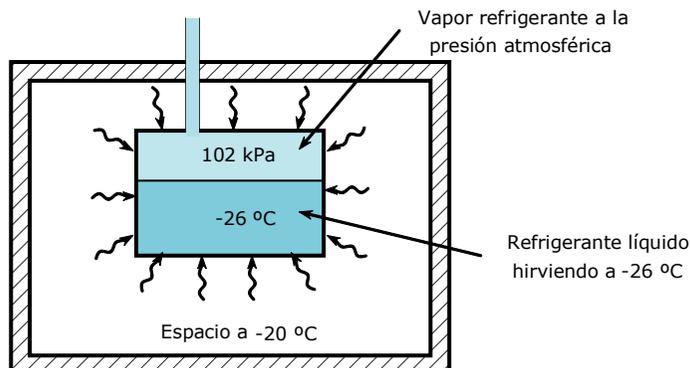
Al introducir la botella en una cámara frigorífica que esté a 4 °C, la botella alcanzará una nueva presión absoluta de 338 kPa. Al enfriarse, el vapor contenido en la botella reacciona al enfriamiento condensándose de forma parcial, disminuyendo así la presión.

Si la botella estuviera en una furgoneta a 50 °C, su presión aumentaría hasta los 1.318 kPa. En este caso, parte del líquido de la botella se vaporiza creando, por tanto, más vapor, aumentando así la presión. Si se abre la válvula de la botella lentamente, dejando escapar vapor a la atmósfera, la presión de la botella desciende hasta la presión atmosférica, por ejemplo de 102 kPa, con lo que la botella se congela al alcanzar los -26 °C.

2.1.2 VAPORIZACIÓN DEL REFRIGERANTE

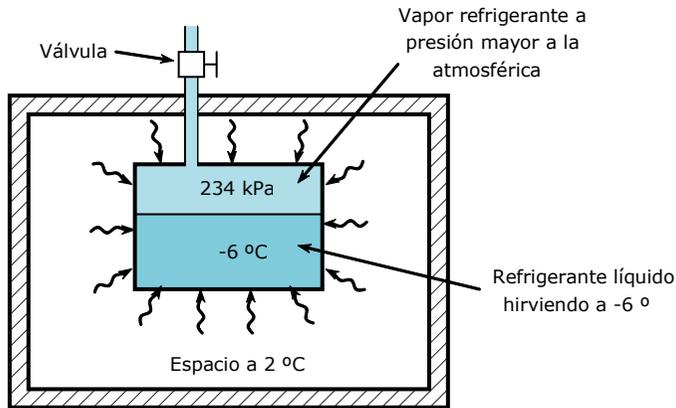
Un espacio aislado a -20 °C puede refrigerarse vaporizándose R-134a en el interior de un recipiente ventilado al exterior. A la presión atmosférica (102 kPa), el R-134a tiene una temperatura de saturación de -26 °C.

Debido a la temperatura más alta del espacio que rodea el recipiente (-20 °C), el R-134a líquido absorbe el calor y se vaporiza a una temperatura constante de -26 °C (calor latente de vaporización), refrigerando el espacio. La refrigeración continuará hasta que todo el líquido se vaporice. Este dispositivo se llama **evaporador**.



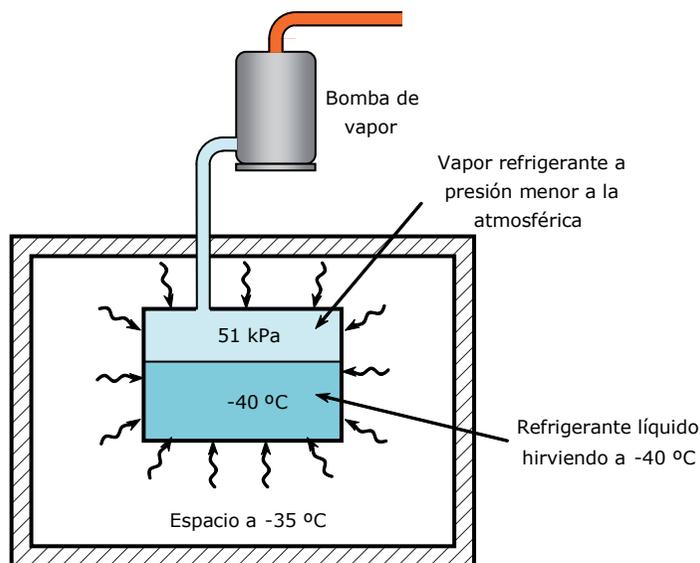
2.1.3 CONTROL DE LA TEMPERATURA DE VAPORIZACIÓN

Para conseguir una temperatura mayor que la temperatura de saturación, se tiene que aumentar la presión del recipiente por encima de la presión atmosférica. Para ello, se necesita una **válvula**. Si se quiere conseguir un espacio a 2 °C, se debe evaporar a unos -6 °C, por tanto, se cerrará la válvula hasta conseguir una presión absoluta de 234 kPa.



Para conseguir una temperatura menor que la temperatura de saturación, se tiene que disminuir la presión del recipiente por debajo de la presión atmosférica. Para ello, se necesita una **bomba de vapor** (compresor).

Es posible vaporizar a -40 °C, si se consigue una presión de 51 kPa, pudiendo mantener un recinto a unos -35 °C.

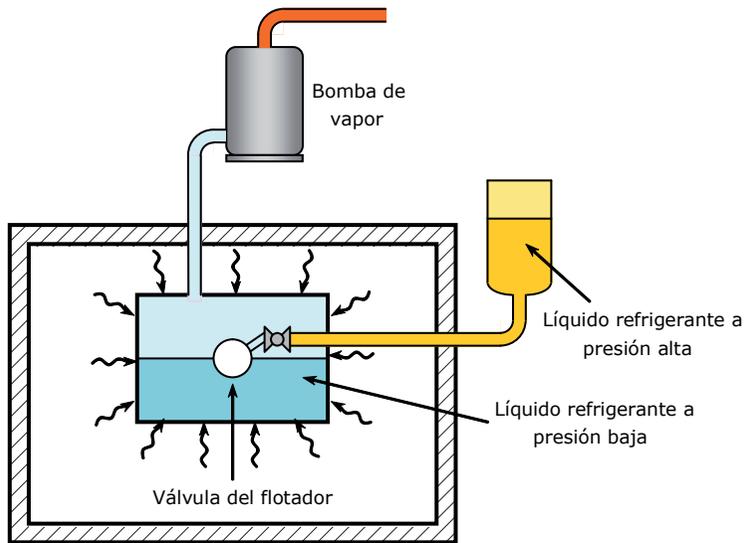


2.1.4 MANTENIMIENTO DE UNA CANTIDAD CONSTANTE DE LÍQUIDO EN EL EVAPORADOR

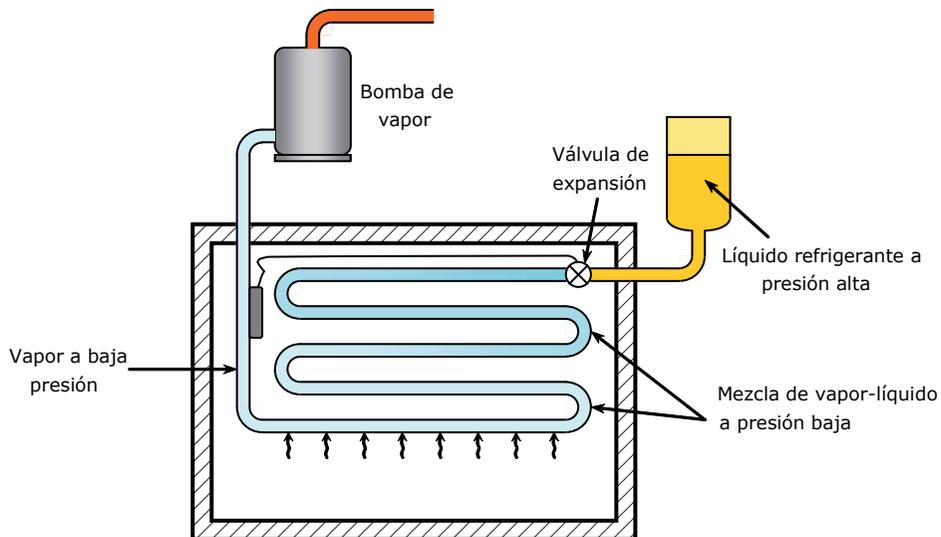


PARA QUE EL LÍQUIDO DEL EVAPORADOR NO SE EVAPORE POR COMPLETO, ES NECESARIO SUMINISTRAR CONTINUAMENTE REFRIGERANTE.

El constante suministro puede lograrse con una **válvula de flotador** y un **depósito de refrigerante**, que contiene refrigerante a una presión p , superior a la presión del evaporador. La válvula de flotador mantiene constante el nivel del líquido dentro del evaporador y controla su presión. El depósito suministra una cantidad de líquido igual a la vaporizada.



El dispositivo utilizado para regular el flujo del líquido refrigerante hacia el evaporador se llama **control de flujo refrigerante** o **dispositivo de expansión**. Un tipo de control de flujo refrigerante muy usado es la **válvula de expansión termostática**, que controla el flujo a través de un serpentín que hace de evaporador.



2.1.5 RECUPERACIÓN DEL REFRIGERANTE


ES INDISPENSABLE RECUPERAR EL REFRIGERANTE POR RAZONES ECONÓMICAS Y MEDIOAMBIENTALES.

El vapor que sale del evaporador se debe recolectar y condensar (volviendo a estado líquido), de manera que el refrigerante sea de nuevo utilizado. Para lograr la condensación del vapor, se debe agregar otro elemento llamado **condensador**. Para condensar el vapor se requiere de un **medio condensante**. Los medios condensantes más empleados son el **aire** (aire exterior) y el **agua** (agua de una torre de refrigeración).

El medio condensante (aire o agua) tiene que estar a una temperatura inferior a la del refrigerante, para que éste pueda el calor. Para ello, es necesario incrementar la temperatura del refrigerante, comprimiéndolo con el **compresor** hasta alcanzar una presión y, por tanto, una temperatura adecuada para la evacuación de dicho calor.

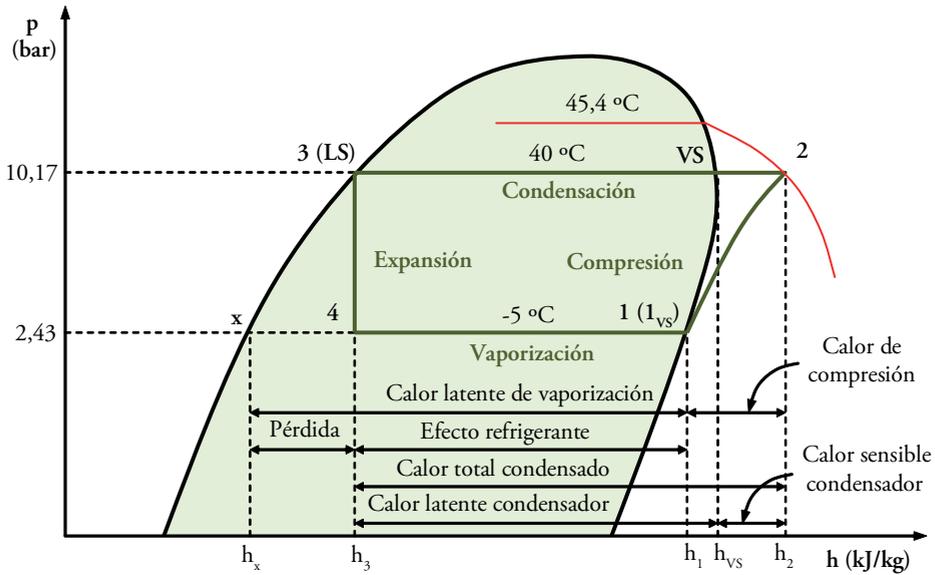


Fig. 2.13. Ciclo de refrigeración saturado

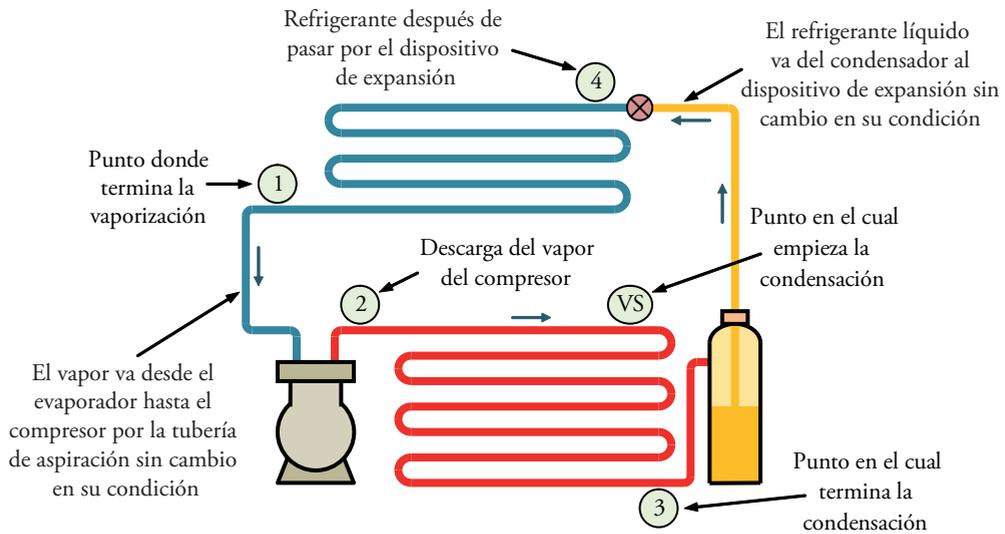


Fig. 2.14. Diagrama de un ciclo de refrigeración saturado

2.3.2 Proceso de expansión

En el ciclo saturado simple se supone que no hay ningún cambio en las propiedades del líquido refrigerante a medida que este fluye a través de la tubería de líquido, desde el condensador hasta el dispositivo de expansión; por tanto, el refrigerante líquido a la entrada del dispositivo de expansión tiene la misma condición que la que se tiene en el punto 3.

El proceso de expansión 3-4 se da en el dispositivo de expansión. La presión (y la temperatura) del líquido disminuye desde la presión (y temperatura) de condensación (3) hasta la presión

(y temperatura) de vaporización (4). Además, una parte del líquido pasa a ser vapor. En este proceso se produce una expansión adiabática ($Q = 0$), es decir, la entalpía del fluido no cambia durante todo el proceso ($h_4 \approx h_3$). Por tanto, el punto 4 se encuentra, en el diagrama p-h, siguiendo la línea de entalpía constante, desde el punto 3 hasta el punto donde la línea de entalpía corta a la línea de presión constante (presión de vaporización). Para ello, debe conocerse la temperatura o la presión de vaporización.

Debido a la vaporización parcial del refrigerante líquido durante el proceso 3-4, el refrigerante en el punto 4 es una mezcla de líquido-vapor cuyas propiedades son:

$p_4 = 2,43 \text{ bar}$	$T_4 = -5 \text{ °C}$	$h_4 = 256,43 \text{ kJ/kg}$	$s_4 = 1,2092 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$	$v_4 = 26,182 \text{ dm}^3/\text{kg}$
--------------------------	-----------------------	------------------------------	---	---------------------------------------

2.3.3 Proceso de vaporización

El proceso de vaporización 4-1 se da en el evaporador. Se trata de un proceso isotérmico e isobárico, es decir, la vaporización se efectúa a temperatura y presión constantes. Por tanto, el punto 1 se localiza en el diagrama p-h siguiendo las líneas de presión y temperatura constante desde el punto 4 hasta el punto donde estas cortan la línea de vapor saturado. En el punto 1 el refrigerante está totalmente vaporizado y es un vapor saturado a la temperatura y presión de vaporización.

A medida que el refrigerante recorre el evaporador, absorbe calor del espacio refrigerado, incrementando su entalpía. Las propiedades del refrigerante en el punto 1 son:

$p_1 = 2,43 \text{ bar}$	$T_1 = -5 \text{ °C}$	$h_1 = 395,56 \text{ kJ/kg}$	$s_1 = 1,7297 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$	$v_1 = 82,76 \text{ dm}^3/\text{kg}$
--------------------------	-----------------------	------------------------------	---	--------------------------------------

Balance energético del evaporador

La cantidad de calor absorbido por el refrigerante en el evaporador (efecto refrigerante) es la diferencia de entalpía del refrigerante entre los puntos 4 y 1:

$$q_e = h_1 - h_4$$

donde: q_e = **efecto refrigerante** o **producción frigorífica másica** (kJ/kg).

Debido a que $h_4 = h_3$, entonces:

$$q_e = h_1 - h_3$$

Esta variación de la entalpía ($h_1 - h_4$) indica el frío producido por kg de fluido circulando en la instalación. Sustituyendo los valores para el ejemplo de referencia:

$$q_e = h_1 - h_3 = 395,56 - 256,43 = 139,13 \text{ kJ/kg}$$

Caudal másico de refrigerante

Si \dot{m} es el caudal másico de refrigerante que circula, en kg/s, para producir la capacidad de refrigeración requerida (\dot{Q}_e), se tiene:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e}$$

Para el ciclo de referencia, se tiene (para 1 kW de potencia frigorífica):

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} = \frac{1 \text{ kW}}{139,13 \text{ kJ/kg}} = 0,00719 \text{ kg/s}$$

Producción frigorífica volumétrica

Si v_1 es el volumen específico de los vapores aspirados en el punto 1, se tendrá:

$$q_v = \frac{q_e}{v_1}$$

Para el ciclo de referencia, se tiene:

$$q_v = \frac{q_e}{v_1} = \frac{139,13 \text{ kJ/kg}}{0,08276 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1.681,13 \text{ kJ/m}^3$$

Caudal volumétrico desplazado (real) por el compresor

El caudal volumétrico desplazado es:

$$\dot{V}_d = \dot{m} \times v_1 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\dot{V}_d = 3.600 \times \dot{m} \times v_1 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

Para el ciclo de referencia, se tiene (en dm^3/s):

$$\dot{V}_d = \dot{m} \times v_1 = 0,00719 \times 82,76 = 0,595 \text{ dm}^3/\text{h}$$

Caudal volumétrico teórico del compresor

El caudal volumétrico teórico del compresor será, debido al espacio perjudicial, mayor que el desplazado. Siendo η_v el **rendimiento volumétrico** del compresor, se tiene:

$$\dot{V}_t = \frac{\dot{V}_d}{\eta_v}$$

2.3.4 Proceso de compresión

En el ciclo saturado simple, se supone que el refrigerante no cambia de condición mientras fluye por la tubería de aspiración desde el evaporador hasta el compresor. El proceso de compresión 1-2 se efectúa en el compresor, que incrementa la presión del vapor desde la presión de vaporización hasta la presión de condensación. Se supone que el proceso de compresión es **isentrópico**, es decir, se trata de un tipo especial de proceso adiabático (sin transferencia de calor entre el sistema y el medio ambiente) que ocurre sin fricción.