

Utilización del diagrama de Mollier de presión-entalpía para sistemas frigoríficos

| | |
|--------------------------|--|
| Apellidos, nombre | Castro Giraldez, Marta ^{1,2} (marcasgi@upv.es) Tomas Egea, Juan Ángel ² (juatomeg@upv.es) Ortolá Ortolá, M ^a Dolores ^{1,2} (mdortola@tal.upv.es) Fito Suñer, Pedro José ^{1,2} (pedfisu@tal.upv.es) |
| Departamento | ¹ Departamento de Tecnología de los Alimentos ² Instituto de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo |
| Centro | Universitat Politècnica de València |

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a descubrir cómo funciona un diagrama de Mollier presión-entalpía y cómo es posible utilizar los cambios de estado de un fluido para transportar energía térmica de un lugar a otro. Estos conocimientos se aplicarán para la obtención de las propiedades termodinámicas de un fluido mediante el uso del diagrama de Mollier presión-entalpía sobre los circuitos de refrigeración básicos.

2 Introducción

En el año 1923, en la Thermodynamics Conference de los Ángeles, se decidió que cualquier gráfico que utilizara la entalpía (h) en uno de sus ejes se denominara diagrama de Mollier, en honor a Richard Mollier, que fue un profesor alemán destacado por sus aportaciones a la termodinámica (Escudero-Salas y Fernández-Iglesias, 2017). El diagrama de Mollier presión-entalpía, es una representación de una variable de estado intensiva frente a una extensiva de los posibles estados de un compuesto químico por debajo del punto crítico (PC). El punto crítico se caracteriza por una presión y una temperatura críticas, por encima de las cuales la densidad del vapor es la misma que la del líquido y desaparece la interfase entre ambos. Por encima de las condiciones críticas, existe una única fase denominada fluido supercrítico (Atkins y de Paula, 2008). Un líquido por debajo de la presión crítica, cuando se calienta, empezará a generar fase vapor. El diagrama de Mollier presión-entalpía tiene numerosas aplicaciones, entre ellas destaca su utilización para sistemas de refrigeración, motores o máquinas de vapor.

3 Objetivos

Con la redacción de este artículo docente se pretende que los alumnos adquieran la capacidad de:

- Moverse por un diagrama de Mollier presión frente a entalpía de un fluido refrigerante.
- Obtener la evolución de las propiedades termodinámicas de un fluido refrigerante a lo largo de un circuito simple de refrigeración

4 Desarrollo

En el punto 4.1 se van a exponer los fundamentos termodinámicos de un diagrama de Mollier presión-entalpía.

En el punto 4.2 se analizará un diagrama presión-entalpía, describiendo cada una de las líneas que lo componen.

En el punto 4.3 se obtendrá la evolución de las propiedades termodinámicas de un fluido refrigerante a lo largo de un proceso de refrigeración.

4.1 Principios termodinámicos

Los circuitos mecánicos de refrigeración se basan en las propiedades termodinámicas de algunos fluidos, conocidos como fluidos refrigerantes. Si se representan conjuntamente dos variables de estado intensivas, como son presión (P) y temperatura (T), de un fluido refrigerante como es el dióxido de carbono (R-744) (Figura 1), se observa una línea de transición de primer orden, de líquido a gas. Esta línea marca la inercia termodinámica para que el fluido esté en estado líquido o gaseoso. Además de variar la presión y la temperatura, para que se produzca la transición, se necesita aportar o disipar la energía del fluido. Es por esto que, al representar una variable de estado intensiva, como presión o temperatura, respecto a una extensiva que permita describir los cambios de energía, como la entalpía o la entropía, la representación lineal anterior, que marcaba un cambio de estado inmediato, se transforma en una zona de transición, donde el aporte o la disipación de energía marcan el cambio de estado y en la cual conviven los dos estados de agregación a la vez.

Si se representa la presión frente a la entalpía (h) (Figura 2), se observan tres zonas delimitadas por una curva de saturación: zona de líquido, zona de gas, y un estado mixto en el que se va a producir la transición líquido-gas en función de la disipación o el consumo de energía. Los límites de esta área son las curvas de transición líquido y gas. Dentro de la zona en la que coexisten ambos estados de agregación, cualquier aporte o eliminación de energía térmica es invertida en cambio de estado, por esta razón, cualquier fluido que se encuentre en esta área sufre cambios termodinámicos a presión y temperatura constantes. En la figura se representa además el punto crítico (PC).

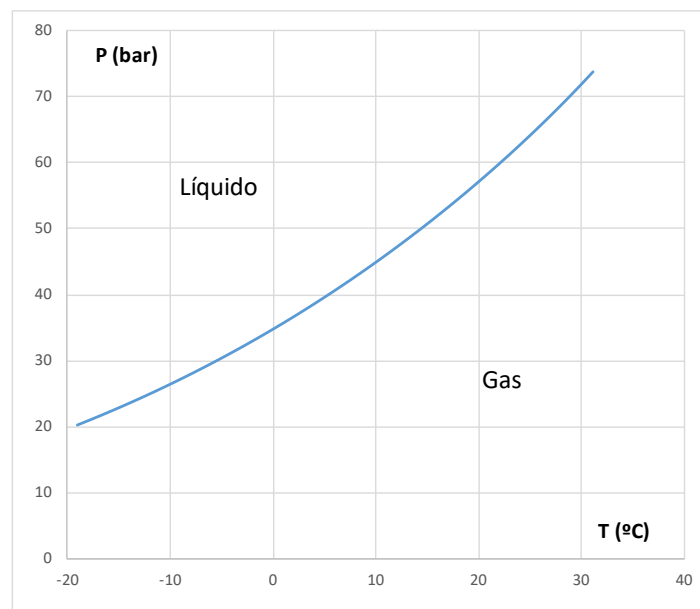


Figura 1. Diagrama presión-temperatura del fluido refrigerante R- 744

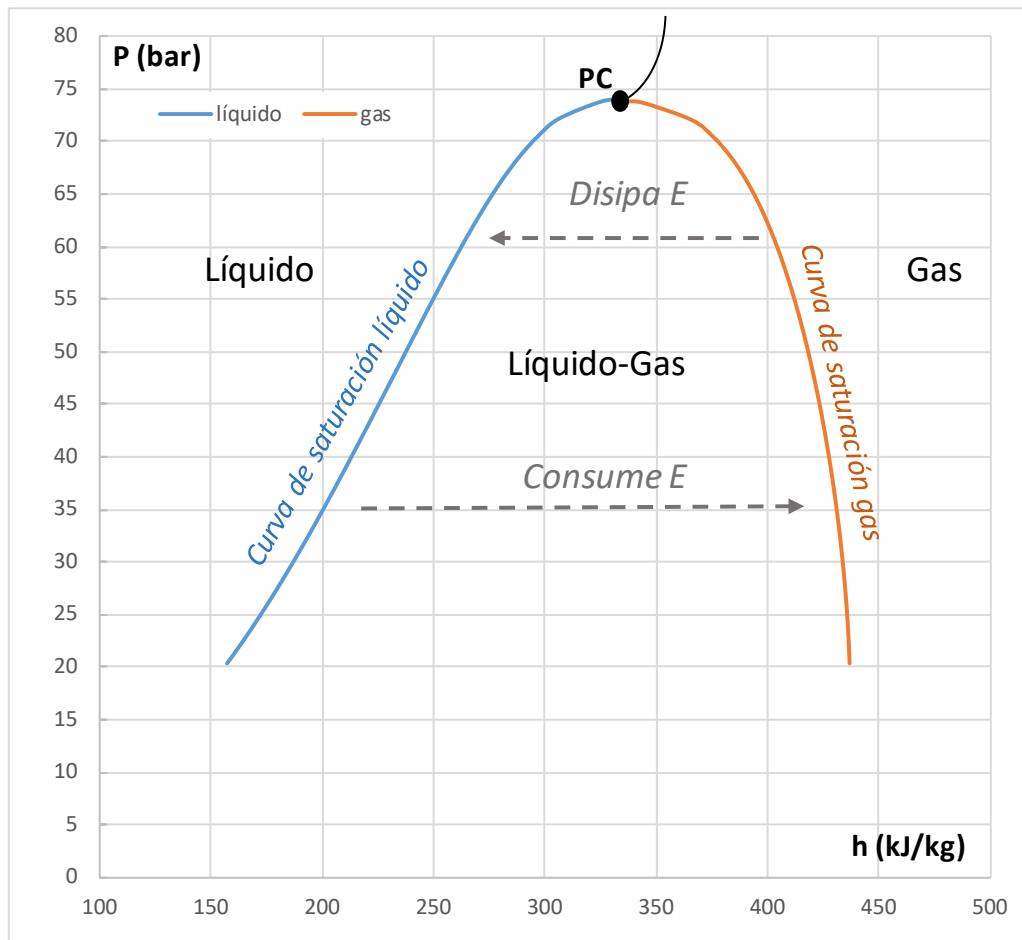


Figura 2. Diagrama de Mollier presión-entalpía del fluido refrigerante R-744

4.2 Diagrama Presión-Entalpía

En la figura 3 se muestra un diagrama presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744. En este diagrama se ven representadas distintas variables termodinámicas y se pueden distinguir distintos tipos de líneas:

- Líneas isobaras, líneas horizontales que representan una presión constante.
- Líneas isoentálpicas, líneas verticales que representan entalpía constante.
- Líneas isotermas, líneas que representan una temperatura constante cuya forma depende de la región. En la región de mezcla líquido-gas, al ser la temperatura una variable de estado intensiva como la presión, las líneas isotermas serán horizontales y paralelas a las isobaras; tanto en la zona de líquido como en la de gas, su variación respecto a la presión y la entalpía dependerá del calor específico de fluido. En el caso de líquido, el calor específico no depende de la presión, por lo que las líneas isotermas sólo variarán con la entalpía, representándose verticales como las isoentálpicas. En el caso del fluido en estado gas, el calor específico sí que varía con la presión, por lo que las isotermas cambian en esta región con la entalpía y con la presión, por lo que forman una curva.

- Líneas isoentrópicas, al definirse la variación de entropía como la variación de entalpía dividido por la temperatura, las líneas isoentrópicas conforman una curva inversa a la isoterma en la zona de gas.
- Líneas isocoras, representan líneas de volumen específico constante. Estas líneas se ven afectadas por la fase gas (fluido compresible), de modo que aumentan conforme disminuye la presión.
- Líneas isotítulo, se encuentran en el interior de la zona mixta, representan la fracción másica de gas en la mezcla líquido-vapor, será 0 en la curva de saturación de líquido y será 1 en la línea de saturación de gas.

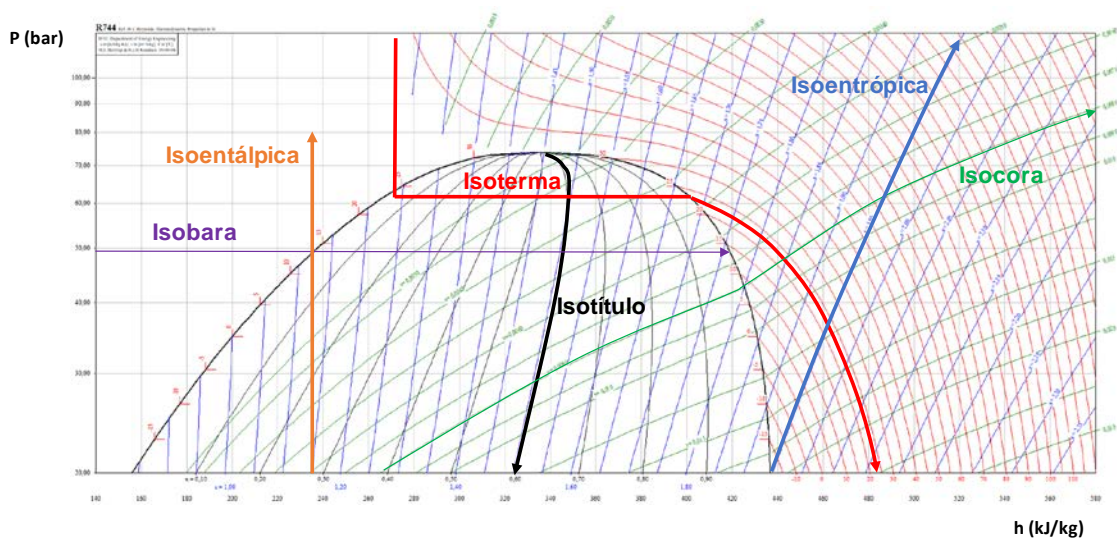


Figura 3. Diagrama presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744 (Adaptada de Coolpack® Software)

4.3 Utilización del diagrama presión-entalpía para circuitos de refrigeración

Los diagramas de Mollier presión-entalpía permiten determinar las propiedades termodinámicas más importantes del fluido en los procesos de cambio de estado por debajo del punto crítico, donde las curvas de saturación indican la predisposición del fluido para cambiar de estado, dependientes de la temperatura y la presión. La entalpía indica la cantidad de energía necesaria para el cambio de estado, la entropía indica la irreversibilidad de dicha transformación, el volumen específico los procesos expansivos de la transformación y por último el título o fracción másica de gas nos indica la proporción de fluido que ha cambiado de estado.

Una aplicación para los diagramas de Mollier presión-entalpía es el circuito mecánico de refrigeración, el cual está basado en el ciclo inverso de Carnot para sistemas no ideales. Dicho circuito se basa en la inducción de la evaporación o la condensación del fluido con el fin de transportar energía térmica de un lugar frío a otro cálido mediante el aporte de energía mecánica. Es decir, que se inducirá una evaporación del fluido en la zona fría captando calor y provocando la condensación en la zona cálida disipando dicho calor, gracias al cambio de temperatura del fluido inducido por un cambio de presión en el sistema

(incremento de la presión mediante aporte de trabajo por compresión o descompresión mediante expansión libre).

De tal manera que los elementos básicos que permiten realizar las transformaciones termodinámicas mencionadas son los siguientes:

- Elementos intercambiadores de calor:
 - Evaporador: Intercambiador de calor situado en la zona fría del circuito que permite captar calor almacenándolo en el fluido en forma de cambio de estado de líquido a gas.
 - Condensador: Intercambiador de calor situado en la zona cálida del circuito que permite disipar energía del fluido mediante el cambio de estado de gas a líquido.
- Elementos inductores de cambios de presión:
 - Compresor: Émbolo mecanizado que incrementa la presión hasta las condiciones termodinámicas que permiten posteriormente el intercambio de calor y la condensación del fluido liberando el calor almacenado en la zona fría del circuito. Este elemento define la presión de alta del circuito.
 - Válvula de expansión: Dispositivo de expansión de la sección de la conducción del fluido que permite una caída de la presión del sistema, disminuyéndola hasta alcanzar una temperatura de equilibrio baja que permita el posterior intercambio de calor y evaporación del fluido en la zona fría del circuito.

Si representamos en el diagrama presión-entalpía del fluido refrigerante los puntos del esquema del circuito (Figura 4), observamos, en primer lugar, entre el punto 4 y 1, el evaporador, en el que se muestra a baja presión la disipación de energía, cargándose esta energía en el fluido refrigerante mediante el cambio de estado de un nivel de energía a otro de mayor energía, de líquido a gas. Si el proceso es ideal, la presión y la temperatura no cambiarán durante el cambio de estado. Sin embargo, en algunos circuitos se pueden producir fenómenos de pérdida de carga asociados a la expansión del fluido por el cambio de estado, pudiendo cambiar la presión del sistema.

Del 1 al 2, el fluido se encontrará necesariamente en estado gas, donde tendremos la compresión, pasando de baja a alta presión, de manera que, si el comportamiento del fluido es ideal el proceso de compresión será totalmente reversible, es decir, isoentrópico. Si el proceso no es ideal, el sistema sufre cierta irreversibilidad en el proceso de compresión, que afecta a futuras compresiones provocando un aumento de la entropía del sistema, es decir produciéndose una compresión no isoentrópica. En este proceso la temperatura del fluido aumentará notablemente alcanzando el máximo del sistema. A la temperatura del fluido a la salida del compresor se le denomina temperatura de impulsión. En todas las entradas a los compresores se sitúa una trampa de líquidos para evitar la entrada de fluidos que no estén en estado gas.

Del 2 al 3 se encuentra el condensador, donde se disipará la energía almacenada en el fluido en la zona fría mediante la condensación del fluido. Dicho proceso se realizará en un intercambiador de calor, donde se utilizará como fluido externo aire o agua.

Del 3 al 4 se encuentra la válvula de expansión, donde el fluido sufrirá una expansión por estrangulamiento y pérdida de carga en la cual el fluido disminuirá su presión sin consumo de energía externa, es decir, adiabáticamente, así que del 3 al 4 el proceso será isoentálpico. El descenso de presión provocará una disminución de la temperatura de equilibrio (ver figura 1) lo que provocará una

necesidad del fluido por disipar parte de su energía interna, dicha energía será disipada de forma espontánea evaporando parte del propio fluido, incrementando la fracción másica de gas o título.

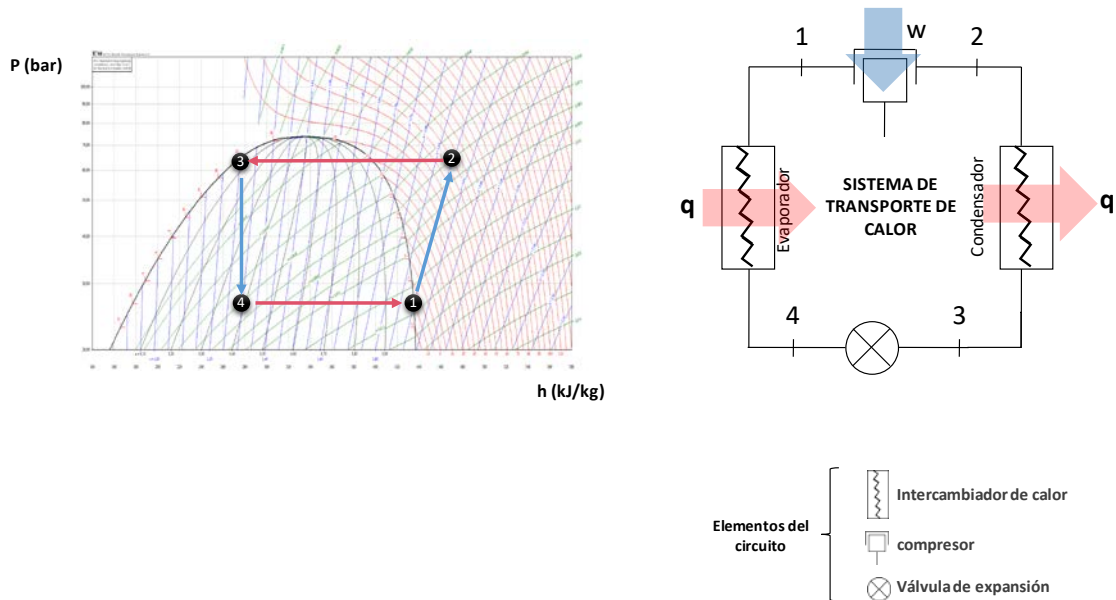


Figura 4. Circuito de refrigeración cuyos puntos se representan en el diagrama de Mollier presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto qué forma tiene un diagrama de Mollier presión-entalpía, también hemos analizado los fundamentos termodinámicos de dicho diagrama. Asimismo, hemos analizado su utilización en el diseño de un circuito de refrigeración simple, de tal manera que hemos podido situar el fluido refrigerante en el diagrama, analizando el consumo o disipación de energía, así como la expansión o compresión que sufre a lo largo del ciclo de refrigeración.

6 Bibliografía

Atkins, P.; de Paula, J. (2008). "Transformaciones físicas de las sustancias puras". *Atkins Química Física*. Argentina: Editorail Médica Panamericana, S.A. Capítulo 4, páginas 118-118.

Escudero-Salas, C.; Fernández-Iglesias, P. 2017. "Cambios de estado y calorimetría". *Máquinas y equipos térmicos*. Madrid: Ediciones Paraninfo. Capítulo 2, página 19.