

Ciclos de Frío, Fluidos Refrigerantes, en instalaciones de calor y frío

| |
|----------------|
| Ciclos de Frío |
|----------------|

| |
|-----------------------|
| Fluidos Refrigerantes |
|-----------------------|

JUAN CARLOS LOZANO MEDINA

INGENIERO INDUSTRIAL

PROFESOR ASOCIADO ULPGC

ISBN 978-84-16989-20-1

15 DE SEPTIEMBRE 2013

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1.- Introducción..... | 3 |
| 2.- Ciclos de frío..... | 4 |
| 2.1.- Conceptos fundamentales..... | 4 |
| 2.1.1.- Diagrama de Mollier..... | 5 |
| 2.2.- Ciclos de compresión de vapor..... | 6 |
| 2.2.1.- Simple etapa..... | 7 |
| 2.2.2.- Múltiple etapa..... | 10 |
| 2.3.- Ciclos de absorción..... | 13 |
| 2.3.1.- De simple efecto..... | 13 |
| 2.3.2.- De doble efecto..... | 17 |
| 2.3.3.- Mejoras..... | 18 |
| 2.3.4.- Usos y aplicaciones..... | 19 |
| 2.4.- Ciclos de gas..... | 19 |
| 3.- Fluidos refrigerantes..... | 22 |
| 3.1.- Conceptos fundamentales..... | 22 |
| 3.2.- Clasificación..... | 23 |
| 3.3.- Identificación..... | 25 |
| 3.4.- Propiedades..... | 27 |
| 3.5.- Normativa..... | 28 |
| 4.- Ejemplo de cálculo de un ciclo de refrigeración..... | 29 |
| 5.- Bibliografía..... | 31 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 1. Representación esquemática de una máquina frigorífica.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Figura 2. Diagrama P-h de Mollier.</i> | <i>5</i> |
| <i>Figura 3. Componentes de un sistema de refrigeración por compresión de vapor.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Figura 4. Ciclo de compresión de vapor real en los diagramas T-s, h-s y p-h.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Figura 5. Intercambiador auxiliar que puede realizar simultáneamente.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 6. Esquema de una instalación de compresión en dos etapas con.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 7. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor en cascada.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 8. Esquema básico de una máquina de absorción.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 9. Esquema de equipos y fluidos de una máquina de absorción de simple efecto.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 10. Equipos de una máquina de absorción de simple efecto sobre un diagrama p-T... </i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 11. Esquema de equipos y flujos de una máquina de absorción de doble efecto.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 12. Ciclo Brayton invertido.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 13. Diagrama T-s del ciclo de Brayton invertido.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 14. Ciclo Brayton invertido con un intercambiador de calor regenerativo.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 15. El ciclo de Carnot invertido produce más refrigeración (área bajo B1).....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 16. Diagrama p-h para R-134, ejemplo de cálculo.....</i> | <i>30</i> |

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

1.- Introducción.

La producción de frío se puede definir como la generación de temperaturas inferiores a la ambiental mediante métodos no naturales. Para producir frío es necesario extraer calor de un sistema a baja temperatura y enviarlo a otro sistema de mayor temperatura mediante la aportación de energía de un **fluido refrigerante** que sufre una serie de transformaciones termodinámicas a lo largo de un **ciclo**.

En la actualidad, la producción de frío se utiliza para:

- Disminuir la temperatura ambiental cuando ésta es alta para conseguir la comodidad o confort de las personas.
- Conservar alimentos y otros materiales durante su almacenamiento y su distribución.
- Licuar gases y condensar vapores.

De esta manera, la producción de frío facilita o contribuye a la mejora de la calidad de vida, de lo cual se encargan las máquinas frigoríficas, que están formadas por un conjunto de máquinas que permiten extraer calor de un foco frío y ceder calor a un foco caliente consumiendo una cantidad neta de trabajo.

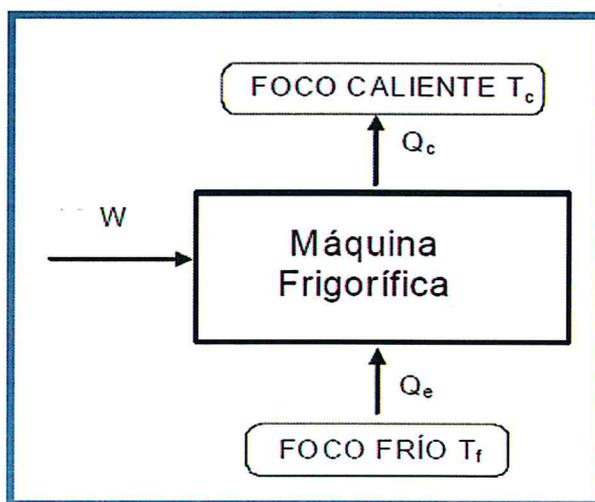


Figura 1. Representación esquemática de una máquina frigorífica.

A continuación se detallan los diferentes ciclos utilizados para la producción de frío así como la clasificación y características de los fluidos refrigerantes utilizados en cada uno de ellos.

2.- Ciclos de frío.

2.1.- Conceptos fundamentales.

El frío se puede obtener mediante métodos químicos o físicos. En la industria, se utilizan los métodos físicos, que engloban procesos de intercambio térmico, cambio de fase, expansión de gases o procesos específicos. Los métodos físicos que actualmente se consideran son:

- Ciclos de compresión de vapor: método físico de cambio de fase por evaporación indirecta (se recupera el fluido).
- Ciclos de absorción: método físico de cambio de fase por evaporación indirecta (se recupera el fluido).
- Ciclos de gas: método físico de expansión de gases.
- Refrigeración termoeléctrica: método físico específico.

Estos ciclos se basan en los siguientes fenómenos físicos:

- Efecto sensible: producción de frío mediante el aumento de la temperatura de la sustancia refrigerante.
- Efecto latente: producción de frío mediante el cambio de fase de la sustancia refrigerante.
- Efecto Peltier: creación de un flujo térmico a través de la unión de dos materiales diferentes.

La eficacia de estos ciclos viene caracterizada por un **coeficiente de efecto frigorífico** (COP_r), que es la relación entre la cantidad de calor extraída de la fuente fría y el trabajo aplicado al ciclo mediante un compresor.

$$COP_r = \frac{\text{Calor extraído de la fuente fría}}{\text{Trabajo de compresor}} = \frac{Q_E}{W}$$

Este valor indica la eficacia de la máquina de refrigeración, y si esta misma máquina estuviera funcionando como **bomba de calor**, su eficiencia sería COP_c :

$$COP_c = \frac{\text{Calor cedido por la fuente caliente}}{\text{Trabajo de compresor}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_E + W}{W} = COP_r + 1$$

En un ciclo de refrigeración se debe cumplir:

$$COP = \frac{|Q_{FF}|}{|Q_{FC}| - |Q_{FF}|} \leq COP_{max} = \frac{T_{FF}}{T_{FC} - T_{FF}}$$

Donde:

- Q_{FF} = calor del foco frío.
- Q_{FC} = calor del foco caliente.
- T_{FF} = temperatura del foco frío.
- T_{FC} = temperatura del foco caliente.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

2.1.1.- Diagrama de Mollier.

Para estudiar los ciclos de frío se utiliza el **diagrama de Mollier**, que es una representación gráfica de las **propiedades de un refrigerante**. En él se representan magnitudes como la presión, la entalpía, la temperatura, la densidad o la entropía, y permite conocer el estado del refrigerante (líquido, vapor o mezcla de ambos) en función de las citadas magnitudes.

En el diagrama se distinguen tres zonas, separadas por dos líneas, tal y como se muestra en la figura siguiente.

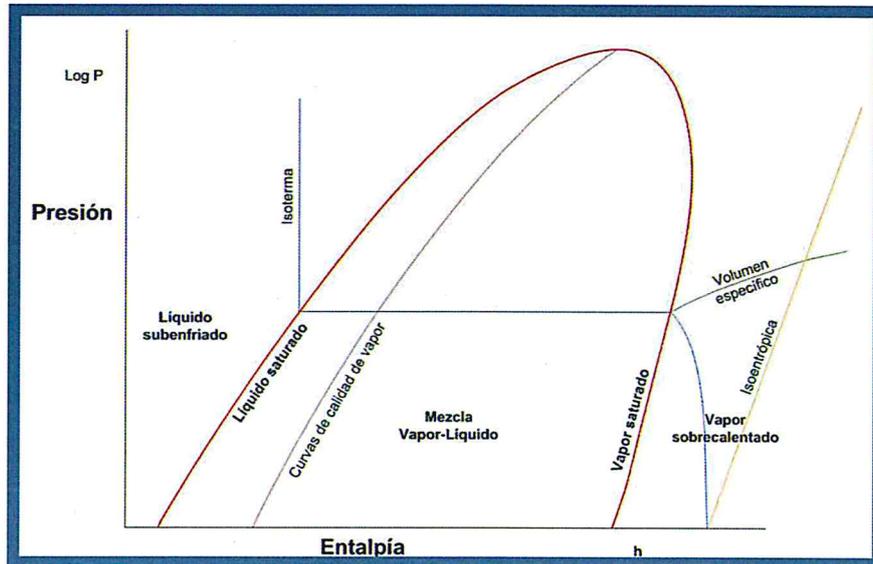


Figura 2. Diagrama P-h de Mollier.

- La **zona de líquido subenfriado**, donde se representan las condiciones de presión y entalpía que dan lugar a refrigerante en estado líquido, que necesita aporte de energía para vaporizarse.
- La **zona de líquido-vapor**, donde se dan las condiciones de presión y entalpía que propician equilibrio entre líquido y vapor, que se hallan mezclados en una proporción llamada título de vapor.
- La **zona de vapor sobrecalentado**, es donde las condiciones de presión y entalpía provocan que el refrigerante se halle completamente vaporizado, es decir en estado gaseoso.

Las tres zonas se hallan separadas por dos líneas muy importantes, que no pertenecen a ninguna de ellas. A la izquierda está la línea de líquido saturado, que representa los estados del refrigerante que, aun estando en estado líquido, si recibiesen un pequeñísimo aporte de energía formarían la primera burbuja de vapor. A la derecha tenemos la línea de vapor saturado, que representa los estados del refrigerante, que aun estando en estado vapor por completo, si cediesen una pequeñísima cantidad de energía, condensarían la primera gota de líquido. Ambas líneas, la de líquido saturado y la de vapor saturado confluyen en su punto más alto, en el llamado punto crítico del refrigerante. En la práctica habitual de la refrigeración interesa mantenerse alejado del punto crítico todo lo posible.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

A su vez, se observan cinco tipos de trazas a través de las cuales se describen los ciclos de refrigeración y los estados de agregación de la materia:

- **Isobaras:** rectas paralelas entre sí y perpendiculares al eje de ordenadas que unen puntos con iguales valores de presión.
- **Isoentálpicas:** rectas paralelas entre sí y perpendiculares al eje de abscisas que unen puntos con iguales valores de entalpía.
- **Isotermas:** rectas que en la zona de líquido subenfriado son paralelas a la ordenada y dentro de la campana de mezcla son paralelas a la abscisa, y en la zona de vapor sobrecalentado descienden en forma de curva.
- **Isocoras:** son curvas en las que coinciden los puntos con igual volumen específico y también son paralelas entre sí para distintos valores. Se desarrollan en la izquierda de la zona de mezcla líquido-vapor y se extiende hacia la derecha hasta la de vapor sobrecalentado hasta el final del diagrama.
- **Isoentrópicas:** Son las curvas en las que coinciden los valores de igual entropía en el sistema. Son paralelas entre sí y de una elevada pendiente.

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, a continuación se procede a explicar las características y el funcionamiento de cada ciclo de frío.

2.2.- Ciclos de compresión de vapor.

Esta es la forma práctica más habitual de llevar a cabo una refrigeración mecánica. Este dispositivo consta, esencialmente, de un condensador, un evaporador, un sistema de expansión y un compresor. Su funcionamiento es sencillo: se absorbe calor en el evaporador y se cede calor en el condensador. El calor viaja desde una zona de baja temperatura (en el evaporador) hasta una zona de alta temperatura (en el condensador). Pero el calor sólo se puede transmitir de forma natural desde una zona de alta temperatura hasta otra de baja, por lo tanto es necesario inyectar trabajo en el sistema con la ayuda del compresor. El agente encargado de transportar el calor es el fluido refrigerante.

Este ciclo se define de manera teórica como el resultante del **ciclo de Carnot invertido** con las siguientes diferencias:

- El fluido entra en el compresor en condiciones de vapor saturado. Esto tiene como consecuencia un sobrecalentamiento del mismo, que conduce a la necesidad de enfriar dicho vapor desde la temperatura a la salida del compresor hasta la de condensación a la misma presión.
 - A la salida del condensador (en condiciones de líquido saturado) el fluido se somete a una expansión isoentálpica en vez de isoentrópica, con el fin de simplificar la instalación. Esto se consigue por medio de una válvula de estrangulamiento.
 - Existen saltos de temperatura entre el fluido que circula por el ciclo y las temperaturas de los focos caliente y frío en el condensador y el evaporador.
-

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

Además, en el ciclo real de compresión:

- Hay pérdidas de presión en el condensador y el evaporador.
- La entrada al compresor puede estar por encima de la temperatura de vapor saturado. La salida del condensador puede estar por debajo de la temperatura de líquido saturado.
- El proceso de compresión no es isoentrópico.

Este ciclo puede adoptar diferentes configuraciones que se exponen a continuación.

2.2.1.- Simple etapa.

En el ciclo frigorífico de compresión mecánica de simple etapa tenemos los siguientes cuatro procesos:

- 1-2 Compresión.** El compresor comprime el fluido de manera isoentrópica consumiendo trabajo y consiguiendo pasar el fluido desde la presión baja a la presión alta del ciclo, aumentando también la temperatura del fluido.
- 2-3 Condensación.** El fluido a alta presión es enfriado sin pérdida de presión contra el foco caliente que se encuentra a la misma temperatura que el fluido de refrigeración. El calor cedido provoca que el refrigerante pase de fase vapor a fase líquida sin irreversibilidades mecánicas ni térmicas.
- 3-4 Expansión.** El refrigerante en estado líquido se expande isoentálpicamente extrayendo trabajo, bajando su presión desde la alta a la baja presión y disminuyendo la temperatura. Una parte del líquido se transforma en vapor.
- 4-1 Evaporación.** El fluido refrigerante a baja presión es calentado desde el foco frío de manera reversible (sin salto de temperatura con el foco frío y sin pérdida de presión) absorbiendo del foco frío el calor del ciclo para cambiar a fase vapor.

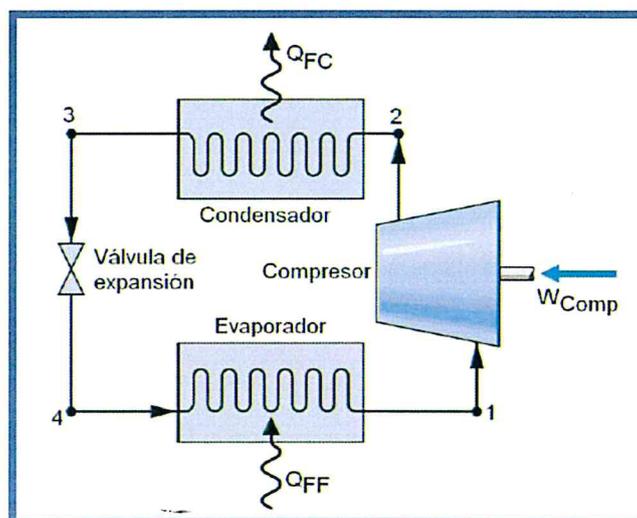


Figura 3. Componentes de un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

Los límites de funcionamiento de este tipo de ciclos son:

a) La temperatura de la cámara nunca podrá ser inferior a la del refrigerante en el evaporador; si esto no fuera así, el líquido no podría absorber calor de la cámara, con lo que no se podría evaporar.

b) La temperatura en el exterior del condensador ha de ser menor que la del fluido en el mismo; en caso contrario el vapor no podría ceder calor al ambiente exterior, de modo que no se podría licuar.

Este ciclo se puede utilizar para aprovechar el efecto frigorífico en el evaporador (máquina frigorífica) o para aprovechar el efecto calorífico en el condensador (bomba de calor). Puede representarse en los diagramas T-s, h-s y p-h tal y como se muestra en la siguiente figura.

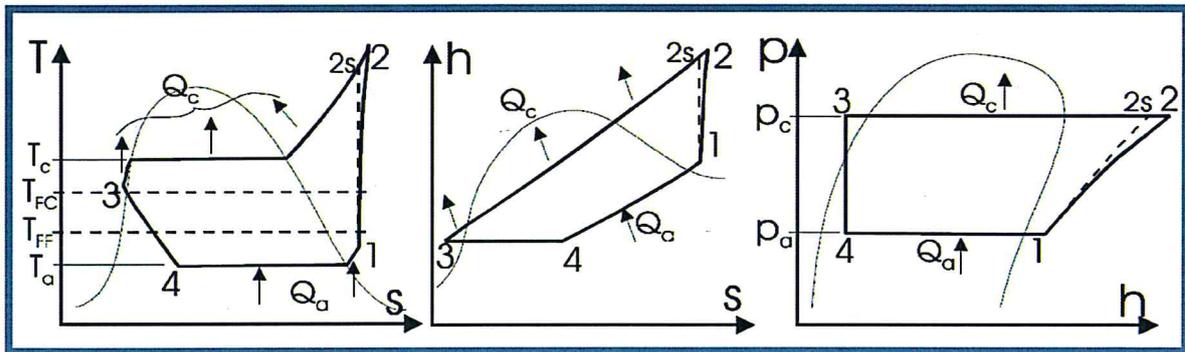


Figura 4. Ciclo de compresión de vapor real en los diagramas T-s, h-s y p-h.

De estos diagramas o de tablas se puede obtener las propiedades del fluido refrigerante en cada momento del ciclo, lo que permite calcular los **parámetros fundamentales** mediante balances energéticos en cada uno de los elementos del ciclo:

- EFFECTO REFRIGERANTE (producción frigorífica másica): $E.R. = q_e = h_1 - h_4$ [kJ/kg]
- CAUDAL MÁSIICO DE REFRIGERANTE: $\dot{m} = \frac{POTENCIA\ FRIGORÍFICA}{E.R.}$ [kg/min]
- PRODUCCIÓN FRIGORÍFICA VOLUMÉTRICA: $q_v = \frac{E.R.}{volumen\ específico}$ [kJ/m³]
- CAUDAL VOLUMÉTRICO REAL DESPLAZADO POR EL COMPRESOR:

$$\dot{V}_d = \dot{m} \cdot volumen\ específico \text{ [m}^3/\text{s]}$$

- CAUDAL VOLUMÉTRICO TEÓRICO DEL COMPRESOR:

$$\dot{V}_t = \frac{\dot{V}_d}{rendimiento\ volumétrico\ del\ compresor} = \frac{\dot{V}_d}{\nu} \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

- CALOR DE COMPRESIÓN: $w_i = (h_2 - h_1)$ [kJ/kg]
- TRABAJO TEÓRICO O ISENTRÓPICO: $W_i = w_i \cdot m$ [kJ], donde m es el total de kg de refrigerante en la instalación.
- POTENCIA ISENTRÓPICA: $P_i = \dot{m} \cdot w_i = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$ [kW]
- CALOR ELIMINADO por el condensador:

$$q_c = E.R. + w_i = (h_1 - h_4) + (h_2 - h_1) = h_2 - h_4 = h_2 - h_3 \text{ [kJ/kg].}$$

- COP (Coeficiente de Rendimiento Frigorífico): $COP = \frac{E.R.}{w_i} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

A veces, para que este tipo de sistemas funcione mejor, se necesita:

- Que haya un ligero sobrecalentamiento a la salida del evaporador (entrada del compresor), para asegurar que todo el refrigerante se ha vaporizado. El sobrecalentamiento no puede ser muy elevado, tomándose normalmente un valor por debajo de los 10 °C. Consecuentemente el caudal volumétrico que debe mover el compresor será mayor, aumenta la potencia necesaria y disminuye el COP del ciclo.
- Que haya un subenfriamiento a la salida del condensador para mejorar el efecto refrigerante (mayor diferencia de entalpía entre los puntos 1 y 4) y como consecuencia mejorar el COP.

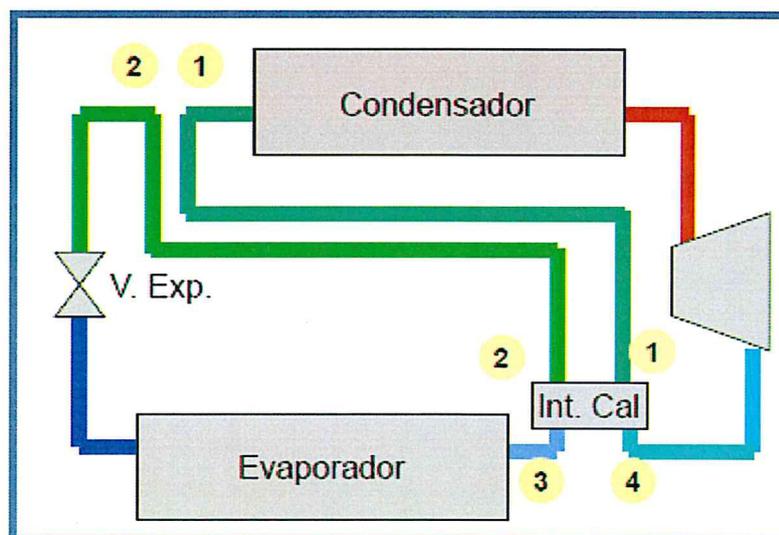


Figura 5. Intercambiador auxiliar que puede realizar simultáneamente el subenfriamiento y el sobrecalentamiento.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

2.2.2.- Múltiple etapa.

En estos sistemas el **proceso de compresión se realiza en varias etapas** (al menos dos), y por tanto se requieren varios compresores, o bien compresores de varias etapas de compresión. Su utilización surge porque cuando la diferencia de presiones entre la aspiración y escape del compresor es muy grande se producen los siguientes fenómenos:

- Aumento del trabajo específico de compresión, y en consecuencia, disminución de la eficacia del ciclo.
- Aumento de la temperatura de descarga del compresor, lo cual puede provocar la descomposición del lubricante con el consiguiente acortamiento de la vida media de la máquina.
- Disminución del rendimiento volumétrico del compresor (en el caso de compresores alternativos), debido al aumento del volumen específico del vapor refrigerante a la entrada. Esto implica, para un determinado tamaño de instalación, una reducción de la capacidad frigorífica de la instalación. Por el contrario, si se pretende mantener la capacidad frigorífica es necesario aumentar el tamaño del compresor.

De manera general, este tipo de ciclos se utilizan cuando la diferencia de temperatura del refrigerante entre la condensación y la evaporación es mayor de 40 °C. Esta diferencia es requerida para mantener un foco frío a temperaturas muy inferiores a la ambiental o para enfriar focos muy calientes hasta temperaturas ambientales. Por consiguiente, las **principales aplicaciones** de los sistemas de refrigeración por compresión múltiple son:

- Procesos de congelación a baja temperatura, o supercongelación (entre -30 y -40°C), con el objetivo de disminuir drásticamente la actividad biológica de materia orgánica, o de asegurar largos periodos de conservación a productos perecederos.
- Procesos de licuefacción de gases para lo cual se requieren temperaturas de alrededor de -160°C.
- Procesos de enfriamiento desde alta temperatura, en industrias como la química o de alimentación.

Entre estos ciclos se distinguen dos grandes tipos de instalaciones:

- **La compresión múltiple directa:** es el mismo fluido refrigerante el que se comprime más de una vez.
- **La compresión múltiple indirecta o en cascada:** el refrigerante es distinto en cada etapa de compresión.

Las **ventajas** de estos ciclos de múltiple etapa residen en un menor sufrimiento de la instalación y una temperatura de descarga más baja que permite la utilización de condensadores menores. Por otra parte, el principal **inconveniente** está en que el mantenimiento es mayor al ser necesario vigilar más compresores y un sistema de intercambio térmico intermedio.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

2.2.2.1.- Múltiple directa.

En este tipo de instalaciones el fluido refrigerante se comprime dos o más veces, sucesivamente, **existiendo un enfriamiento** del vapor recalentado **después de cada compresión**. Los más utilizados son los sistemas de compresión doble directa.

Dentro de los sistemas de refrigeración por compresión múltiple directa los equipos se clasifican en función de cuál sea el agente disipador de calor que provoca, por intercambio térmico, el enfriamiento entre las etapas de compresión. En función a esto, se tiene:

- **Enfriamiento entre etapas de compresión con agente externo**, donde el agente disipador de calor es ajeno al propio fluido refrigerante. Los agentes más utilizados son el agua y el aire, que pueden circular independientemente por el condensador y por el enfriador entre etapas de compresión o ser reconducido desde el condensador.
- **Enfriamiento entre etapas de compresión con agente interno**, donde el agente disipador de calor es el propio fluido refrigerante, aprovechando que en otras partes del ciclo termodinámico su temperatura es inferior. Dentro de esta clasificación se distinguen:
 - Los sistemas de **inyección de líquido** (con o sin intercambio térmico).
 - Los sistemas de **expansión escalonada** (con o sin inyección de líquido).
 - Los sistemas de **compresión partida** (inyección total o parcial).

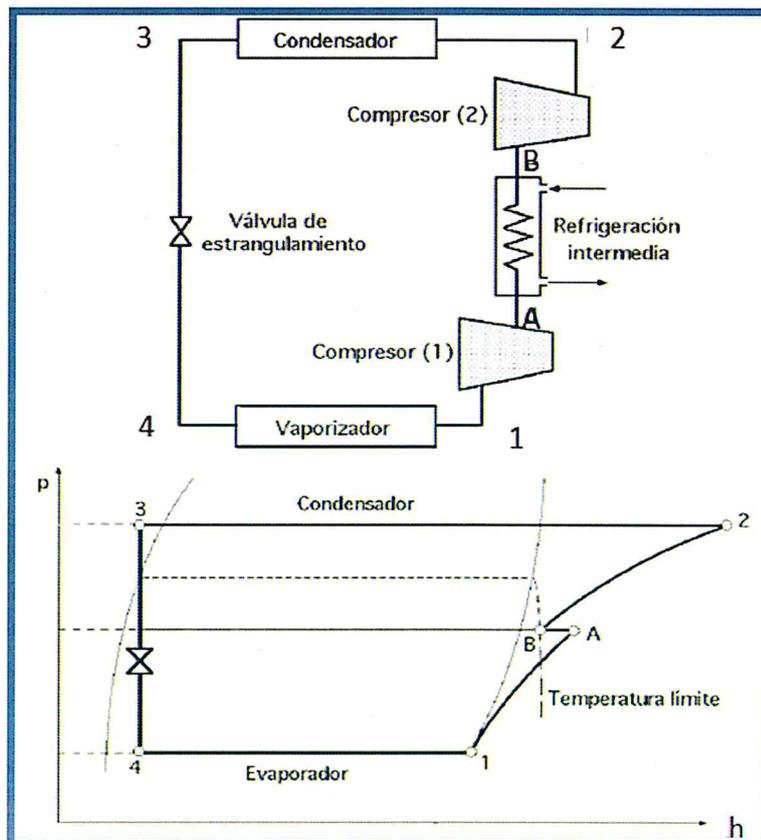


Figura 6. Esquema de una instalación de compresión en dos etapas con refrigeración intermedia exterior y diagrama p-h correspondiente.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

2.2.2.1.- Múltiple indirecta (sistemas en cascada).

Estos sistemas utilizan, como se ha mencionado anteriormente, **distintos fluidos refrigerantes en cada etapa de compresión**. Es por tanto una combinación en serie de sistemas de refrigeración por compresión simple, conectados por intercambiadores que actúan como condensadores evaporativos, en los que el fluido que trabaja en un rango de temperatura menor condensa a costa de evaporar al que trabaja en el rango térmico superior. Esta solución resulta interesante cuando los saltos térmicos totales son muy altos, mayores aún que los habituales en sistemas de compresión múltiple directa.

La principal particularidad de este tipo de ciclos es que, al poner en juego distintos refrigerantes, las distintas etapas son independientes y no mezclan fluidos. La fuente fría (evaporador) se alimenta de una fuente caliente (condensador) de la máquina correspondiente en la etapa inferior de la cascada. El número de escalones entre las distintas etapas puede variar en función de la instalación desde 2 en los casos más sencillos hasta 4 o 5 en instalaciones más complejas.

En la siguiente imagen se muestra un sistema en cascada de dos etapas en donde se han combinado un proceso con R-134a con un ciclo con CO₂ produciendo una temperatura de salida en torno a los -40° C, siendo la temperatura de condensación de 45° C.

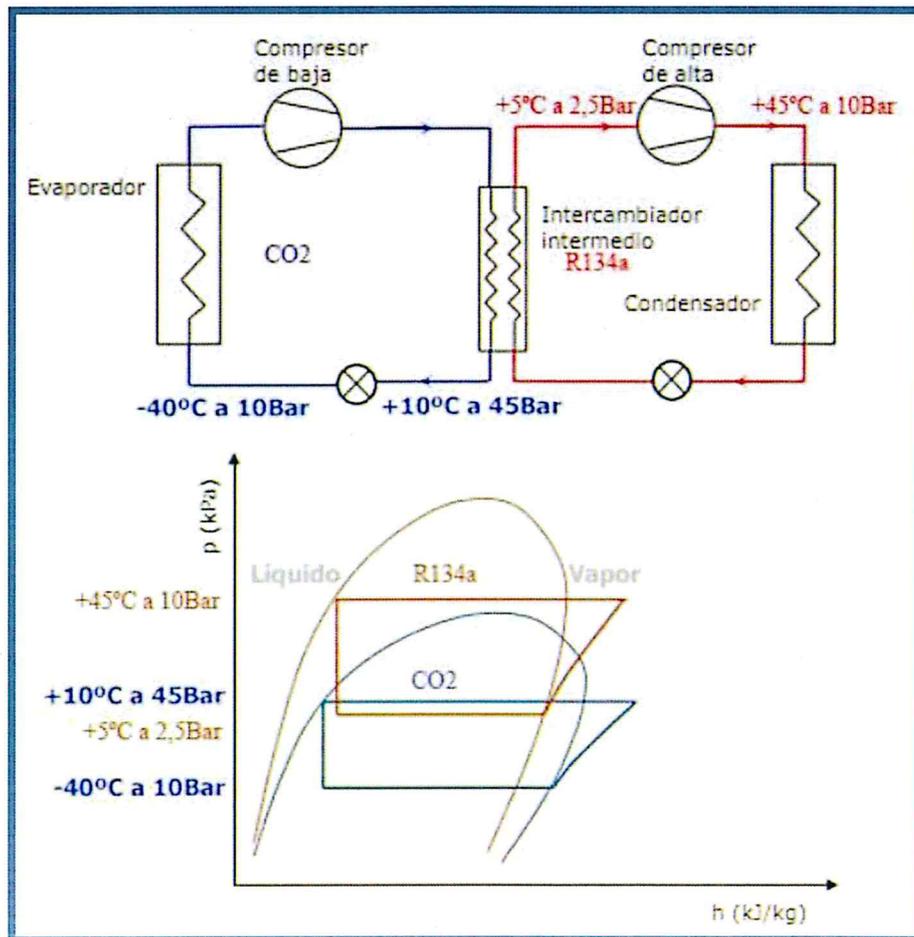


Figura 7. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor en cascada.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

La principal **ventaja** reside en que se pueden obtener temperaturas de evaporación muy bajas, necesarias para ciertos procesos industriales. El **inconveniente** principal es que se pierde eficacia en el intercambiador intermedio, pérdida que se acumula en cada etapa, por lo que se hace especialmente importante una buena selección de estos así como un adecuado aislamiento para evitar pérdidas.

La selección del número de etapas del sistema en cascada es un compromiso entre eficacia y coste de la inversión.

2.3.- Ciclos de absorción.

2.3.1.- De simple efecto.

Los equipos de absorción, al igual que los de compresión de vapor, se basan en el **principio de condensación y evaporación de un refrigerante para la obtención de frío o calor**. La principal diferencia está en cómo se lleva el refrigerante de la zona de baja presión a la de alta. En los ciclos de compresión mecánica se realiza por medio de un compresor, pero en el caso de una máquina de absorción, el proceso es más complejo. El refrigerante vaporizado en la zona de baja presión es captado por una solución (absorbente) que tiene afinidad físico-química hacia él. La mezcla se bombea a la zona de alta presión, y la separación absorbente-refrigerante se produce mediante la aportación de calor (generador).

Por todo esto, estos ciclos sustituyen la compresión del vapor por la **compresión de una disolución generalmente acuosa**. Básicamente, el vapor resultante del evaporador se absorbe y se diluye en un disolvente y posteriormente se comprime. En la siguiente figura se observan las partes básicas de un ciclo de absorción.

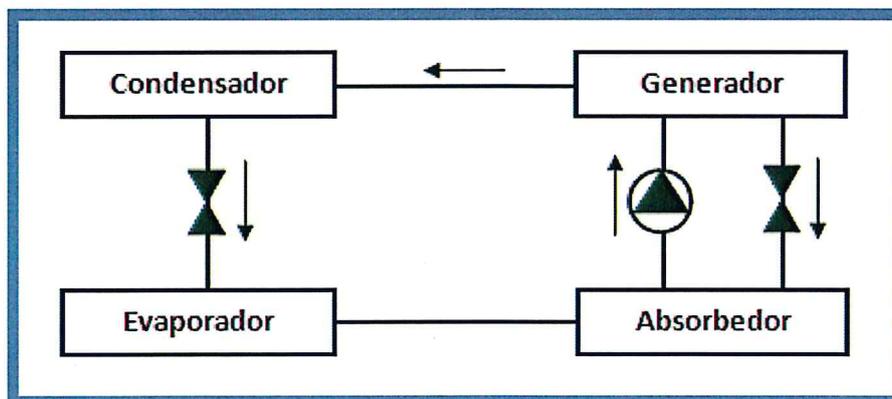


Figura 8. Esquema básico de una máquina de absorción.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

En las distintas zonas de una máquina de refrigeración por absorción pueden distinguirse tres fluidos de características diferentes:

- **Fluido refrigerante.** Es el fluido sobre el que se realiza la producción frigorífica de la máquina (en el evaporador), aunque nunca es de la máxima pureza, debido a la presencia de trazas del fluido absorbente, que puede tener algunas fracciones volátiles que acompañen al vapor refrigerante a la salida del generador.
- **Solución rica en refrigerante.** Tras el proceso de absorción de los vapores de refrigerante, el líquido absorbente incrementa su contenido en refrigerante. Este fluido no ejerce función frigorífica sino únicamente de transporte del vapor hasta condiciones de alta presión.
- **Solución pobre en refrigerante.** Tras el proceso de separación del vapor de refrigerante, el líquido absorbente se encuentra nuevamente con un bajo contenido en refrigerante. Este fluido tampoco ejerce función frigorífica, ni siquiera de fluido de transporte. Su única función es volver a las condiciones adecuadas para absorber de nuevo vapor de refrigerante y cerrar así el ciclo termodinámico que asegura un funcionamiento continuo.

Teniendo esto en cuenta, existen dos **ciclos básicos de absorción**:

- **De amoníaco:** utiliza NH_3 como fluido frigorífico y agua como absorbente. En estos ciclos las máquinas y tuberías tienen que ser de acero inoxidable, es necesario un rectificador entre el generador y el condensador (ya que con el amoníaco se evapora agua) y se requiere una temperatura entre 120 y 150°C en el generador.
- **De bromuro de litio:** utiliza agua como fluido frigorífico y una disolución de LiBr en agua como absorbente. Se requiere una temperatura de 100°C en el generador.

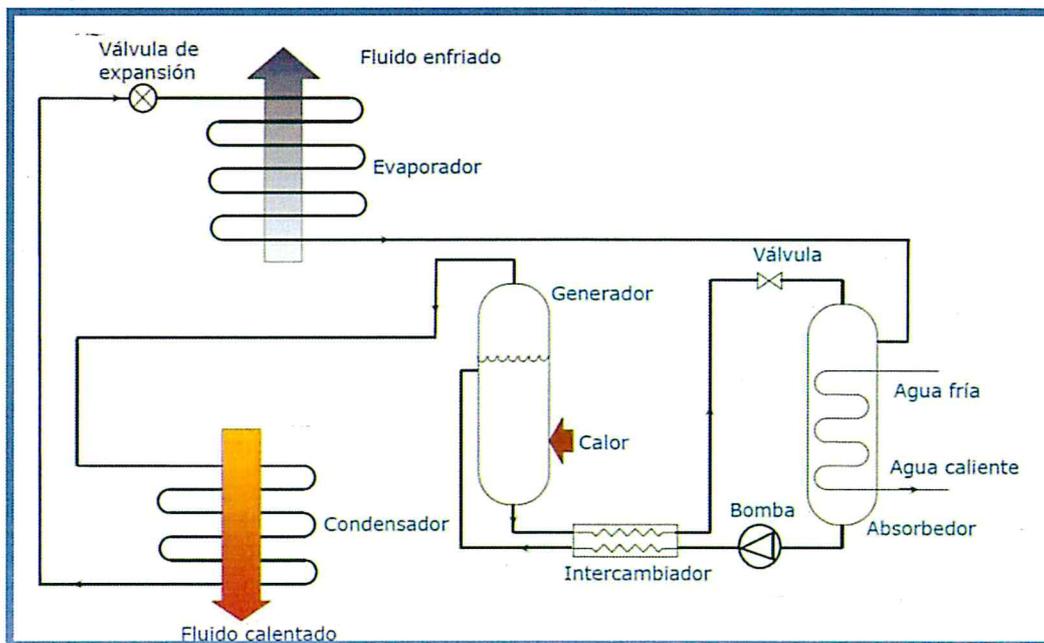


Figura 9. Esquema de equipos y fluidos de una máquina de absorción de simple efecto

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

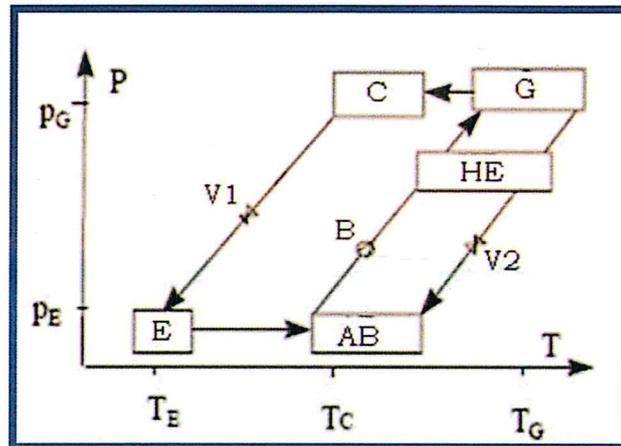


Figura 10. Equipos de una máquina de absorción de simple efecto sobre un diagrama p-T.

A continuación se detalla el funcionamiento de este tipo de ciclo explicando lo que ocurre en cada máquina:

1. **Generador** (refrigerante+absorbente). Mediante el aporte de energía térmica se produce la evaporación de parte del fluido refrigerante de la mezcla refrigerante-adsorbente, aumentando la concentración del adsorbente. El refrigerante se dirige al condensador, mientras que la solución concentrada se dirige al absorbente.
2. **Condensador** (refrigerante). El refrigerante cede su calor latente y se condensa. Normalmente la condensación se realiza mediante una corriente de agua, que circula por el lado de los tubos, por lo que es necesario enviar esta corriente de agua a una torre de refrigeración para evacuar dicha energía, si bien hay algunos equipos (pero pocos) que condensan con aire. La presión de trabajo del condensador varía en función del refrigerante que se esté empleando. Si se emplea vapor de agua, se trabaja por debajo de la presión atmosférica, pero si se emplea amoníaco la presión será muy superior a la atmosférica.
3. **Válvula de expansión** (refrigerante). El refrigerante pasa por la válvula de expansión para reducir su presión hasta el valor necesario para que la evaporación se produzca a la temperatura correcta. Aquí de nuevo hay que hacer distinciones según se use un refrigerante u otro. En el caso del vapor de agua, la diferencia de presiones para las temperaturas típicas de funcionamiento de una máquina de absorción es pequeña, por lo que con un dispositivo que produzca una pequeña pérdida de carga (como una trampa de líquido) es suficiente. Sin embargo, si el refrigerante es amoníaco, la diferencia de presiones es muy alta, por lo que si es necesario emplear una válvula de expansión para producir la pérdida de carga necesaria. Tras disminuir su presión, el refrigerante va al evaporador.
4. **Evaporador** (refrigerante). El refrigerante se evapora tomando la energía necesaria de otra corriente (normalmente agua) que circula por el lado de los tubos, produciéndose en dicha corriente el efecto frigorífico. En cuanto a las presiones de trabajo, en caso de trabajar con vapor de agua como refrigerante, se seguirá trabajando por debajo de la presión atmosférica, un poco más aún, mientras que si se emplea amoníaco se trabaja por encima de la presión atmosférica, aunque no tanto como en el condensador.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

5. **Absorbedor** (refrigerante+absorbedor). El absorbente absorbe el vapor refrigerante, diluyéndose la solución y volviendo por tanto a las condiciones de partida. Dicho proceso de mezcla es exotérmico, por lo que es necesario evacuar el calor generado para que dicho calor no eleve la temperatura del absorbedor y se ralentice el proceso de mezcla. Para ello se emplea una corriente auxiliar de agua que evacua dicha energía y posteriormente la disipa en la torre de refrigeración. Normalmente, es la misma corriente de agua la que se usa para refrigerar el absorbedor y el condensador, primero pasa por el absorbedor, y luego pasa por el condensador.
6. **Bomba** (refrigerante+absorbedor). Una vez se ha producido la mezcla, la bomba se encarga de elevar la presión de la solución hasta la presión de trabajo e impulsarla hacia el generador.
7. **Intercambiador de calor** (refrigerante+absorbedor). Por último, antes de llegar al generador, la solución pasa por un intercambiador de calor donde entra en contacto indirecto con la solución concentrada que proviene del generador y se dirige al absorbedor, disminuyendo la temperatura de ésta, y aumentando la suya. Con esto se consigue disminuir las necesidades de refrigeración del absorbedor (ya que al ingresar en él la corriente de solución concentrada a menor temperatura hay que evacuar menos energía) y también disminuye el aporte energético necesario a realizar en el generador (ya que la solución de partida ingresa en el generador a mayor temperatura).

El condensador y el generador operan en las mismas condiciones de presión (alta presión), mientras que el evaporador y el absorbedor son los dispositivos que trabajan a baja presión. Estos ciclos necesitan calor a alta temperatura (generador) para obtener efecto refrigerante a baja temperatura (evaporador), y como residuo se ha de extraer calor a temperatura media (absorbedor y condensador).

La eficiencia de estos ciclos se calcula igual que en los ciclos de compresión de vapor:

$$COP_r = \frac{EFECTO REFRIGETANTE}{ENTRADA DE CALOR}$$

Las **ventajas** fundamentales de estos ciclos son:

- Apenas tienen partes móviles, por lo que no generan vibraciones ni ruidos, y tienen un mantenimiento reducido.
- Ahorro de energía eléctrica debido a que el trabajo de bombeo es mucho menor que el necesario para mover el compresor en un ciclo de compresión mecánica.
- La energía básica que consume la máquina de absorción es el calor que se proporciona al generador. El calor, aportado por un combustible, es una energía cara. Sin embargo, el calor recuperado procedente de los humos de escape de una turbina de gas o de los humos de una caldera, es casi gratuito. Este aspecto convierte a la máquina de absorción en una máquina atractiva.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

Inconvenientes:

- Menos eficientes. Presenta un COP bastante inferior, en igualdad de condiciones, que el ciclo de compresión de vapor equivalente. Actualmente las máquinas de absorción de simple efecto tienen un COP en condiciones nominales de 0,65-0,75 aproximadamente.
- Existen pocos fluidos frigoríficos que se puedan utilizar en estas máquinas.
- Costosos, complejos y ocupan espacio.
- Requieren grandes torres de enfriamiento para liberar el calor residual.

2.3.2.- De doble efecto.

El ciclo de doble efecto surge a partir de la adición de equipos al ciclo de simple efecto, para poder mejorar su rendimiento. Esto es posible en las maquina que operan con LiBr-H₂O, ya que trabajan con niveles de presión muy bajos, mientras que no es posible en el caso de trabajar con la mezcla NH₃-H₂O, pues introducir una nueva etapa incrementaría la temperatura de trabajo, y el incremento de presión que esto conlleva es demasiado.

| COMPARACIÓN CICLOS DE ABSORCIÓN DE SIMPLE Y DOBLE EFECTO | | |
|--|---------------|--------------|
| Parámetro | Simple efecto | Doble efecto |
| T en el generador (°C) | 70-90 | 140-180 |
| COP | 0,65-0,75 | 1,2-1,35 |

Estas mejoras se consiguen añadiendo un generador, un condensador y un intercambiador de calor solución-solución al ciclo de simple efecto a un nivel de presión superior, tal y como se aprecia en la siguiente figura.

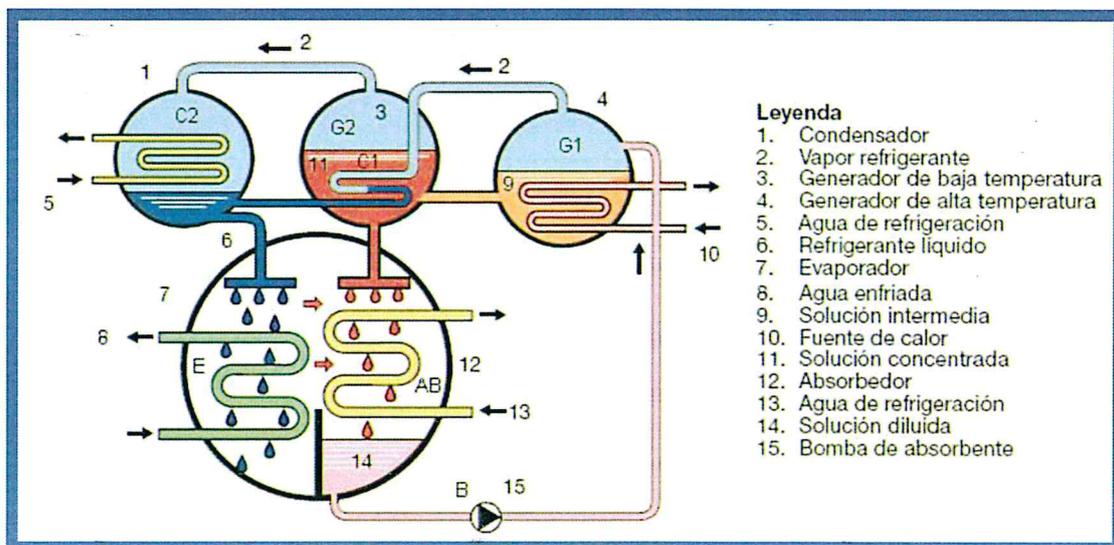


Figura 11. Esquema de equipos y flujos de una máquina de absorción de doble efecto.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

El funcionamiento de este tipo de ciclos es similar al de simple efecto, salvo que hay más corrientes en el sistema. Además, existen tres tipos de configuraciones:

- **Configuración en serie:** la solución procedente del absorbedor va hacia el generador de alta temperatura, y a la salida de éste, se dirige hacia el generador de baja temperatura.
- **Configuración en paralelo:** se divide el flujo a la salida del absorbedor, para alimentar de forma independiente cada uno de los dos generadores.
- **Configuración invertida:** la solución procedente del absorbedor es dirigida primero hacia el generador de baja presión para luego ser bombeada al generador de alta presión.

Las configuraciones en paralelo e invertida presentan un control más sencillo, pero al necesitar una segunda bomba, y al haber mejorado las técnicas de control, los fabricantes suelen optar por la configuración en serie.

2.3.3.- Mejoras.

Además de los ciclos de simple y doble efecto, la tecnología de absorción tiene un gran potencial de desarrollo, por lo que se han ido desarrollando mejoras encaminadas a aumentar la capacidad frigorífica, el rendimiento, o poder realizar el suministro térmico a temperaturas reducidas. Algunas de estas mejoras son:

- **El ciclo de absorción de triple efecto.** Se trata de añadir un tercer efecto al ciclo. Para ello habría que añadir un tercer generador y condensador que trabajaran a una temperatura superior al generador de alta temperatura. La máxima mejora del rendimiento se conseguiría colocando los tres efectos en serie. Colocando el tercero en paralelo la mejora del rendimiento del equipo sería menor, aunque mejoraría la operación del equipo.
- **Ciclo GAX o regenerativo.** Este ciclo es una mejora del ciclo de simple efecto H_2O-NH_3 que trata de aprovechar el solapamiento de temperaturas entre generador y absorbedor cuando la temperatura del primero es lo suficientemente alta, para transferir energía desde la parte caliente del absorbedor hacia la parte fría del generador, reduciendo así la necesidad de aporte energético exterior y mejorando el rendimiento del ciclo.

2.3.4.- Usos y aplicaciones.

Las máquinas de absorción pueden ser empleadas en diferentes situaciones. A continuación se muestran algunos ejemplos de implementación en plantas de diferentes industrias para poder emplear la energía residual de cada aplicación que anteriormente no era aprovechada.

- **Plantas de cogeneración:** Se puede usar los gases de escape de una turbina de gas o un motor alternativo a gas para generar agua caliente o vapor y producir frío mediante la máquina de absorción.
- **Plantas de tratamiento de residuos y EDAR:** se puede utilizar accionada directamente empleando el biogás como combustible o accionada con vapor obtenido del aprovechamiento del calor residual de los gases de escape del grupo de cogeneración.
- **Climatización solar para el sector terciario:** En zonas geográficas que dispongan de un número de horas de sol al año razonable, las máquinas de absorción accionadas por energía solar pueden ser una alternativa eficiente y ecológica a los sistemas convencionales de climatización para edificios de oficinas, hospitales, centros comerciales...
- **Refrigeración en turbina de gas:** se podría aprovechar el calor residual de los gases de escape para accionar una máquina de absorción (con los propios gases de escape o mediante una corriente intermedia y un intercambiador) que enfríe la corriente de aire antes de su entrada al compresor. De este modo mejoramos la eficiencia del ciclo de dos maneras: le damos uso a la energía residual de los gases de escape, y reducimos la potencia de accionamiento del compresor, lo que aumenta la potencia neta entregada por la turbina de gas.

2.4.- Ciclos de gas.

Los ciclos de gas son los que están basados, fundamentalmente, en el **ciclo termodinámico de Brayton invertido**, donde el fluido de trabajo permanece siempre como gas (no hay cambios de fase). Se basa en **aprovechar el efecto sensible** para enfriar la carga. Su funcionamiento es el siguiente:

El gas refrigerante que puede ser aire, entra al compresor en el estado 1 y se comprime hasta el estado 2. El gas se enfría entonces hasta el estado 3 cediendo calor al ambiente. A continuación, el gas se expande hasta el estado 4, donde su temperatura, T_4 , es mucho menor que la de la zona refrigerada. La refrigeración se produce por transferencia de calor desde la zona refrigerada hacia el gas cuando éste pasa desde el estado 4 al estado 1, completándose el ciclo. Por lo que de manera resumida lo que ocurre en cada proceso es:

- 1-2: compresión isoentrópica.
- 2-3: enfriamiento a presión constante.
- 3-4: expansión isoentrópica.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

- 4-1: calentamiento a presión constante.

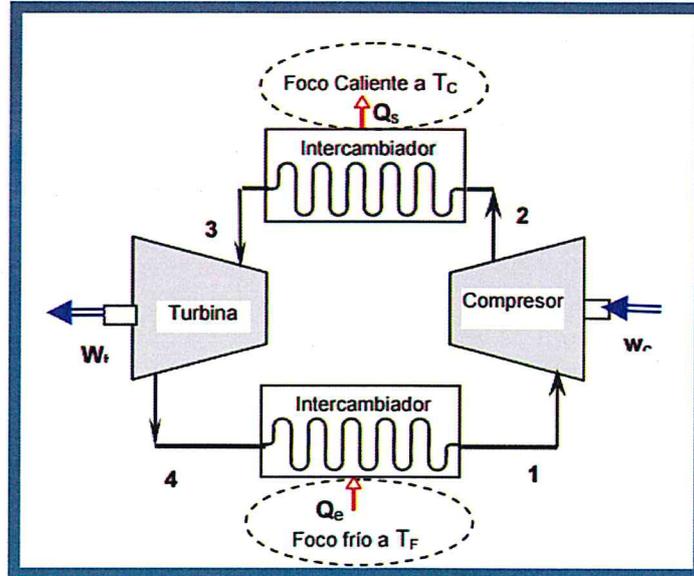


Figura 12. Ciclo Brayton invertido.

En el siguiente diagrama T-s se muestra un ciclo de Brayton invertido ideal, denotado por 1-2s-3-4s-1, en el que se asume que todos los procesos son internamente reversibles y que los procesos en la turbina y compresor son adiabáticos. También se muestra el ciclo 1-2-3-4-1, que muestra el efecto de las irreversibilidades durante la compresión y expansión adiabáticas. Se ha ignorado las pérdidas de presión por fricción.

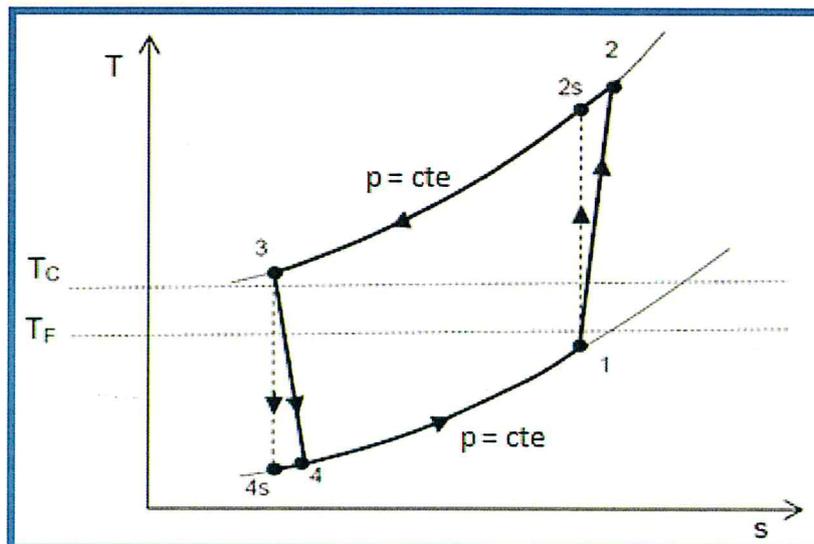


Figura 13. Diagrama T-s del ciclo de Brayton invertido.

En este diagrama, el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor removido del espacio refrigerado; el área encerrada 1-2-3-4-1 representa la entrada neta de trabajo. La relación de estas áreas es el COP para el ciclo, que se expresa como:

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

$$COP_R = \frac{q_L}{W_{neto,entrada}} = \frac{q_L}{W_{compresor,entrada} - W_{turbina,salida}}$$

Donde:

- $q_L = h_1 - h_4$
- $W_{turbina,salida} = h_3 - h_4$
- $W_{compresor,entrada} = h_2 - h_1$

Las irreversibilidades dentro del compresor y la turbina hacen descender significativamente el coeficiente de operación respecto al que corresponde al ciclo ideal debido a que el compresor necesita más trabajo y la turbina produce menos. Por ello, el COP_r de este tipo de ciclos es muy bajo, lo que los sitúa fuera del mercado frente a los ciclos de compresión de vapor y los de absorción. Sin embargo, se utilizan en aplicaciones específicas como para conseguir temperaturas muy bajas (hasta -150°C) que permiten la licuación de aire y otros gases o para la refrigeración de cabinas de aviones (debido a que sus componentes son más ligeros).

Por último, un caso especial de este tipo de ciclos es el **enfriamiento regenerativo**, que se logra al insertar un intercambiador de calor a contraflujo dentro del ciclo. Sin regeneración, la temperatura de entrada más baja de la turbina es la temperatura de los alrededores o de cualquier otro medio de enfriamiento. Con regeneración, el gas de alta presión se enfría aún más antes de expandirse en la turbina. La disminución de la temperatura de entrada de la turbina reduce automáticamente la temperatura de salida de la misma, que es la temperatura mínima en el ciclo. Por lo tanto, es posible conseguir temperaturas muy bajas cuando este proceso se repite.

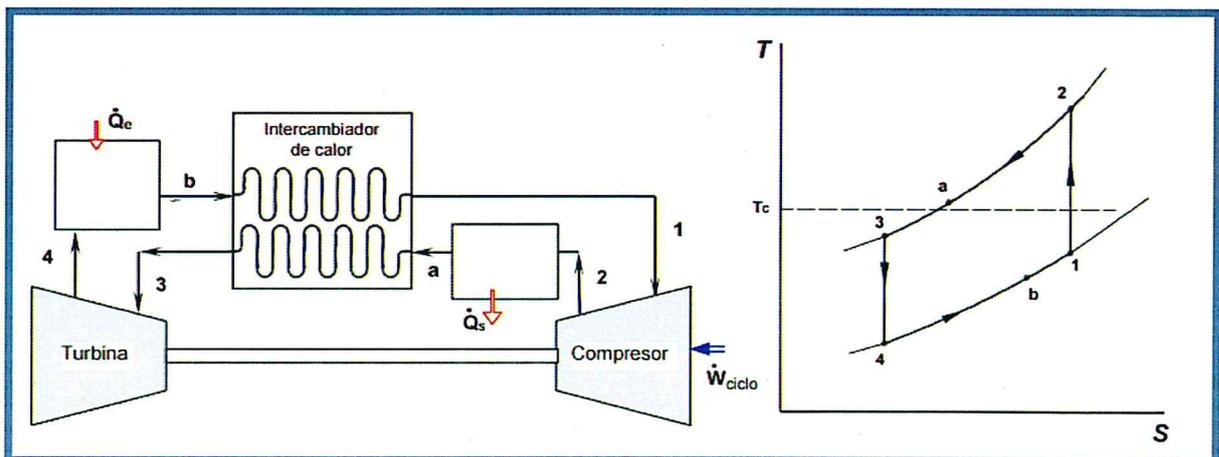


Figura 14. Ciclo Brayton invertido con un intercambiador de calor regenerativo.

DIFERENCIAS CON EL CICLO DE CARNOT INVERTIDO

El ciclo de refrigeración de gas se desvía del ciclo de Carnot invertido debido a que los procesos de transferencia de calor no son isotérmicos. De hecho, la temperatura del gas varía de manera considerable durante el proceso de transferencia de calor. En consecuencia, los ciclos de refrigeración de gas tienen COP menores respecto de los ciclos de refrigeración por

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

compresión de vapor o con relación al ciclo de Carnot invertido. Esto también se deduce del diagrama $T-s$ en la siguiente figura. El ciclo de Carnot invertido consume una fracción del trabajo neto (área rectangular $1A3B$), pero produce una cantidad mayor de refrigeración (área triangular bajo $B1$).

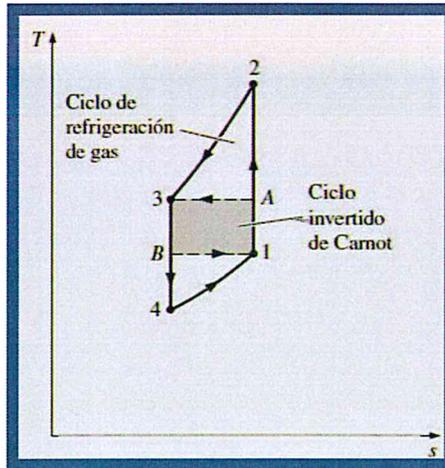


Figura 15. El ciclo de Carnot invertido produce más refrigeración (área bajo $B1$) con menos entrada de trabajo (área $1A3B$).

3.- Fluidos refrigerantes.

3.1.- Conceptos fundamentales.

Los ciclos termodinámicos de refrigeración requieren un **fluido de trabajo** que recibe el nombre de **fluido frigorífico, refrigerante o frigorígeno**. Según la naturaleza del ciclo (Compresión, absorción y ciclos de gas) se consideran más o menos aptas diferentes sustancias químicas.

Un fluido refrigerante es cualquier **fluido capaz de producir frío**, es decir, **evacuar calor** de un recinto o de otro fluido, con el objeto de enfriarlo. Debe presentar las siguientes **características de trabajo**:

- El **punto de congelación** debe ser inferior a cualquier temperatura que existe en el sistema para evitar congelaciones en el evaporado.
- El **calor latente de evaporación** debe ser lo más alto posible para que una pequeña cantidad de líquido absorba una gran cantidad de calor.
- El **volumen específico** debe ser lo más bajo posible para evitar grandes tamaños en las líneas de aspiración y compresión.
- La **densidad** debe ser elevada para usar líneas de líquidos pequeñas.
- Los fluidos refrigerantes **no** deben ser líquidos **inflamables, corrosivos ni tóxicos**. Además, deben tener una baja conductividad eléctrica.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

Hasta mediados de los noventa se han utilizado básicamente los siguientes fluidos refrigerantes, a los cuales denominaremos clásicos:

- **R-12**, $\text{Cl}_2\text{F}_2\text{C}$ (Diclorodifluormetano) – Aplicaciones de temperatura media (Conservación de productos frescos)
- **R-22**, HClF_2C (Clorodifluormetano) – Aplicaciones de alta temperatura (Aire acondicionado, bomba de calor, salas de preparación, etc.)
- **R-502**, mezcla azeotrópica de R-22 y R-115 ($\text{CClF}_2\text{-CF}_3$) – Aplicaciones de baja temperatura (Cámaras de congelación, túneles, etc.)
- **R-11**, Cl_3FC (Triclorofluormetano) – Instalaciones con compresores centrífugos y aerosoles
- **R-717**, NH_3 (Amoníaco) – Instalaciones frigoríficas industriales

3.2.- Clasificación.

Existen diferentes formas de clasificación para los refrigerantes. En este caso, para llevar a cabo la clasificación de los refrigerantes se utilizará el **criterio de ASHRAE** (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) y las **indicaciones de la EPA** (Environmental Protection Agency).

Los refrigerantes se clasifican de forma general en los distintos tipos que se va mostrando a continuación.

- **Derivados halogenados saturados**
 - Estos elementos proceden del **metano, etano y propano** por sustitución parcial o total de los átomos de **hidrógeno** por átomos de **cloro y/o flúor**.
 - Pueden ser del tipo:
 - **CFC**
 - Contienen **cloro, flúor y carbono** en su molécula. Son denominados clorofluorocarbonos.
 - **HCFC**
 - Contienen **hidrógeno, cloro, flúor y carbono** en su molécula. Son denominados hidrocloreofluorocarbonos.
 - **HFC**
 - Contienen **hidrógeno, flúor y carbono** en su molécula. Son denominados hidrofluorocarbonos.
 - Son compuestos que no dañan la capa de ozono.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

- **PFC**
 - Sólo contienen **flúor** y **carbono**. Son denominados perfluorocarbonados.
 - El prefijo “per” hace referencia a que el compuesto tiene el **máximo número posible** de átomos de flúor.
 - Son compuestos que no dañan la capa de ozono.
- **Halones**
 - Contienen **hidrógeno, bromo, flúor y carbono** en su molécula. Son denominados hidrobromofluorocarbonados.
- **Derivados halogenados insaturados**
 - Proceden de **hidrocarburos insaturados** por sustitución parcial o total de los átomos de **hidrógeno** por átomos de **flúor, cloro o bromo**.
- **Mezclas zeotrópicas**
 - Son **mezclas de refrigerantes puros** que se caracterizan por tener, a la **misma presión**, una **temperatura** diferente de **ebullición** y de **condensación**.
 - La diferencia de estas temperaturas es una característica fundamental de estos refrigerantes, denominada **deslizamiento**.
 - Son conocidos como la gama de los cuatrocientos, puesto que su numeración empieza por el número 4.
 - Si se da el caso de que una mezcla zeotrópica contenga un componente o más que sea del tipo **CFC** o **HCFC**, éste queda clasificado como tal.
- **Mezclas azeotrópicas**
 - Son **mezclas de refrigerantes puros** con la particularidad de que **tienen un único punto de ebullición**, es decir, que aun tratándose de mezclas, tienen un comportamiento similar al de una sustancia pura.
 - Su numeración comienza por el número 5.
- **Hidrocarburos saturados**
 - Pueden utilizarse directamente como refrigerantes.
 - Otros forman parte de mezclas que se han propuesto como **sustitutos de los CFC y HCFC**.
- **Hidrocarburos insaturados**
 - Pueden utilizarse directamente como refrigerantes al igual que los saturados.
 - Algunos, al igual que en el caso anterior, forman parte de mezclas propuestas como **sustitutos de los CFC y HCFC**.
- **Compuestos orgánicos no alquílicos**
 - Entre ellos están el **éter etílico**, la **metil-amina**, el **éter metílico** y algunos más.
 - Interesantes debido a su utilización pionera más que su utilización actual, puesto que son **inflamables y tóxicos**.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

- **Compuestos inorgánicos**
 - En ellos están los **gases simples**, **O₂**, **N₂**, etc., y los compuestos inorgánicos, **H₂O**, **NH₃**, **CO₂**, etc.

Utilización en los procesos estudiados.

A continuación se indica un ejemplo de los fluidos refrigerantes más utilizados en los ciclos anteriormente explicados.

- **Ciclo de compresión de vapor**
 - En este caso los que más se suelen utilizar son el R-134a y el R-123
- **Ciclo de absorción**
 - Para este tipo de ciclo los fluidos refrigerantes más utilizados son el R-717 (NH₃) y H₂O

3.3.- Identificación

La identificación de un refrigerante puede realizarse a partir de su **nombre químico** según la **formulación oficial vigente**, su **fórmula química**, el **nombre comercial** o el **código asignado por un organismo internacional**.

El código internacional a tener en cuenta en este trabajo está basado en la **instrucción Standard 34 de la ASHRAE** que asigna a cada refrigerante un número determinado según unas normas que se explican a continuación.

- **A-Derivados halogenados que no contienen bromo**
 - Se utiliza un número de **tres dígitos**. El **primero** a partir de la derecha es el número de átomos de **flúor**, el **segundo** es el número de átomos de **hidrógeno** más uno y el **tercero** es el número de átomos de **carbono** menos uno. Si este último número es cero, se omite.
 - Este tipo de compuestos pueden presentar **isómeros** (Sustancias con la misma fórmula empírica pero diferente distribución atómica), lo que les confiere el mismo peso molecular pero distintas propiedades físicas y químicas.
 - Teniendo en cuenta esta información se utiliza el siguiente criterio:
 - **A1-Derivados del etano**
 - Se acompañan los dígitos de una **letra minúscula**, **a**, **b**, **c**, o **ninguna letra**. Las letras indican el orden de **equilibrio** de la molécula, siendo la que no tiene letra la más equilibrada, seguida por la a, seguida por la letra b y por último seguida por la c. Esto se debe a que los átomos de cloro, flúor e hidrógeno tienen pesos atómicos diferentes, y según como estén dispuestos en un carbono u otro queda una molécula final más o menos equilibrada.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

- **A2-Derivados del propano**
 - Para este caso se utilizan **dos letras minúsculas**.
 - La **primera** letra indica que una de las combinaciones que se muestran a continuación está siendo utilizada **referidas al átomo central de carbono**.
 - Cl_2 - a
 - Cl y F - b
 - F_2 - c
 - Cl y H - d
 - H y F - e
 - H_2 - f
 - La **segunda** letra hace referencia al **equilibrio** de la molécula según el criterio, donde a corresponde al mayor equilibrio, b es el siguiente, etc.
- **B-Derivados halogenados que contienen bromo (Halones)**
 - Para este tipo de derivados se utiliza un número de cuatro dígitos, que indican directamente el número de átomos de carbono, flúor, cloro y bromo que poseen empezando por la izquierda. Estos dígitos van acompañados de la palabra halón para que de este modo no se confunda con los derivados halogenados insaturados.
- **C-Derivados halogenados insaturados**
 - En estos derivados también se utiliza un número de cuatro dígitos. El primero por la izquierda indica el número de enlaces saturados (normalmente 1), el segundo indica el número de átomos de carbono menos uno, el tercero el número de átomos de hidrógeno más uno y el cuarto número indica el número de átomos de flúor.

Ejemplos

A continuación se presentan ejemplos de cada grupo de elementos en donde se aplican las codificaciones según la instrucción Standard 34 de la ASHRAE.

- A-Derivados halogenados que no contienen bromo
 - Difluoroetano, CH_3CHF_2 . Para este caso el elemento tendría el código R-152.
- A1-Derivados del etano
 - R-141, $\text{CHCl-CH}_2\text{Cl}$ → Es el más equilibrado
 - R-141a, $\text{CHCl}_2\text{-CH}_2\text{F}$ → Está en medio
 - R-141b, $\text{CFCl}_2\text{-CH}_3$ → Es el menos equilibrado
- B-Derivados halogenados que contienen bromo (Halones)
 - Halon 1211 → CF_2ClBr
- C-Derivados halogenados insaturados
 - R-1114 → $\text{CF}_2=\text{CF}_2$

3.4.- Propiedades

Cuando se habla sobre las propiedades de los refrigerantes se está haciendo referencia a las relacionadas con su **comportamiento como fluidos frigoríficos**, lo que influye a la hora de **elegir** correctamente el refrigerante **más adecuado** en función de la aplicación deseada.

Las propiedades quedan clasificadas de la siguiente manera:

1. Propiedades físicas

- Estas propiedades dependen principalmente de la **temperatura**, excepto la masa molecular. Se tienen las siguientes propiedades físicas:
 - **Masa molecular**
 - **Densidad**
 - **Viscosidad**
 - **Conductividad**
 - **Calos específico**
 - **Calor latente de vaporización**
 - **Tensión superficial**

2. Propiedades químicas

- **Inflamabilidad** – Nos interesa conocer si el refrigerante es inflamable y la temperatura de **autoignición**.
- **Toxicidad** – Importante propiedad de gran riesgo en donde otro tema a considerar es la posible **descomposición** de los refrigerantes a elevadas temperaturas, causado ya sea por un accidente, explosión o incendio.
- **Seguridad** – Los refrigerantes son clasificados según la Standard 34 de ASHRAE mediante el código que se muestra, en donde se tienen dos letras, A y B y tres números, 1, 2 y 3.
 - El **grupo A** indica que **no hay toxicidad** manifiesta a una concentración inferior de 400 ppm en volumen y por tanto es una sustancia segura.
 - El **grupo B** indica que **hay algún tipo de toxicidad** a la misma concentración que en el grupo A.
 - El **número 1** indica que **no es inflamable** en condiciones ambientales estándar.
 - El **número 2** indica que **es inflamable** por encima de 0.10 kg/m³ a 21 °C y 1.013 bar y tiene un poder calorífico inferior a 19.000 kJ/kg.
 - El **número 3** indica que **es inflamable** por debajo del mismo límite anterior y que tiene un poder calorífico superior a 19.000 kJ/kg.

3. Compatibilidad con la carga

- Hace referencia al hecho de que en caso de **fuga** el refrigerante puede entrar en contacto con el producto refrigerante y hay que tener presente el **efecto de este contacto**.

4. Compatibilidad con los materiales

- Establece la **tolerancia** de los refrigerantes con los **materiales** con los que está **en contacto**.

5. Compatibilidad con los lubricantes

6. Estabilidad

- Esta propiedad evita muchos problemas relacionados con el uso seguro de estos productos. Una sustancia estable es casi sinónima de **inerte**. No es **ni oxidante ni reductora, ni ácida ni básica ni inflamable**. Por otra parte, si una sustancia estable resulta peligrosa por alguna causa, esta propiedad se vuelve un gran inconveniente si se propone su destrucción o sustitución.

7. Propiedades termodinámicas

- Estas propiedades son necesarias para poder **evaluar y estudiar** los **ciclos termodinámicos** de refrigeración. Se utilizan las siguientes propiedades:
 - **Presión y temperatura** para determinar el estado del fluido
 - **Entalpía, entropía y volumen específico** para el análisis de los ciclos termodinámicos.
 - Un fluido refrigerante experimenta los siguientes estados durante un ciclo de compresión de vapor:
 - Estado de líquido subenfriado
 - Estado de líquido saturado
 - Estado de mezcla líquido vapor
 - Estado de vapor saturado
 - Estado de vapor recalentado

8. Propiedades medioambientales

- Es importante tener en cuenta la **interacción** del refrigerante con el **medio ambiente**.
- El efecto de los refrigerantes en la **capa de ozono** es un tema muy importante a tener en cuenta.
- El **efecto invernadero** es un factor importante que se ve producido por algunos gases presentes en la atmósfera. Estos gases permiten el paso de la radiación solar de onda corta y retienen la de onda larga que reemite la superficie terrestre hacia el espacio exterior.

3.5.- Normativa

El descubrimiento del **efecto nocivo** de los gases refrigerantes sobre la capa de ozono provocó una alarma y preocupación internacional. No se tardó en realizar una acción conjunta para detener la producción de los refrigerantes perjudiciales.

Los hitos importantes de estas acciones son el “Protocolo Montreal” y el “**Protocolo de Kioto**”, donde el primero se dedica a la preservación de la capa de ozono y el segundo a la reducción del efecto invernadero.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

Protocolo Montreal

Es un protocolo de la Convención de Viena para la protección de la Capa de Ozono, diseñado para **proteger la capa de ozono** reduciendo la producción y el consumo de numerosas sustancias que se ha estudiado que reaccionan con el ozono y se cree que son responsables del agotamiento de la capa de ozono.

Protocolo Kioto

Es un protocolo que tiene por objetivo **reducir** las emisiones de seis gases de **efecto invernadero** que causan el **calentamiento global**: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), y los otros tres son gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

4.- Ejemplo de cálculo de un ciclo de refrigeración.

Visto los conceptos anteriores, se está en disposición de realizar el cálculo de un ciclo de frío, en concreto, de un **ciclo de compresión de vapor**, ya que son habitualmente los que más se usan.

EJEMPLO DE CÁLCULO. Un ciclo de compresión de vapor utiliza el refrigerante R-134^a. El sistema se supone que trabaja bajo condiciones tales que la presión (absoluta) de vaporización en el evaporador es $p_e = 2,43 \text{ bar}$ y la presión de condensación en el condensador es $p_c = 10,17 \text{ bar}$. Considerar 1 kW de potencia frigorífica.

Consideramos el ciclo teórico suponiendo que:

- El vapor refrigerante que sale del evaporador y entra al compresor es vapor saturado a la temperatura y presión de vaporización.
- El líquido refrigerante que sale del condensador y llega al sistema de expansión es líquido saturado a la temperatura y presión de condensación.

Este ciclo, aunque se desvía del real, es la base para entender e identificar con facilidad el ciclo de refrigeración real. Las hipótesis que se tienen son:

- Los vapores de la aspiración están apenas saturados ($x=1$).
- La compresión es una compresión pura adiabática.
- El líquido no experimenta subenfriamiento en el condensador.
- La circulación del refrigerante en las tuberías no da lugar a pérdidas de carga.

Teniendo lo anterior en cuenta, el primer paso será saber las características del refrigerante en cada momento del ciclo, para lo cual se utilizan tablas o el diagrama correspondiente al refrigerante utilizado.

Ciclos de frío. Fluidos refrigerantes

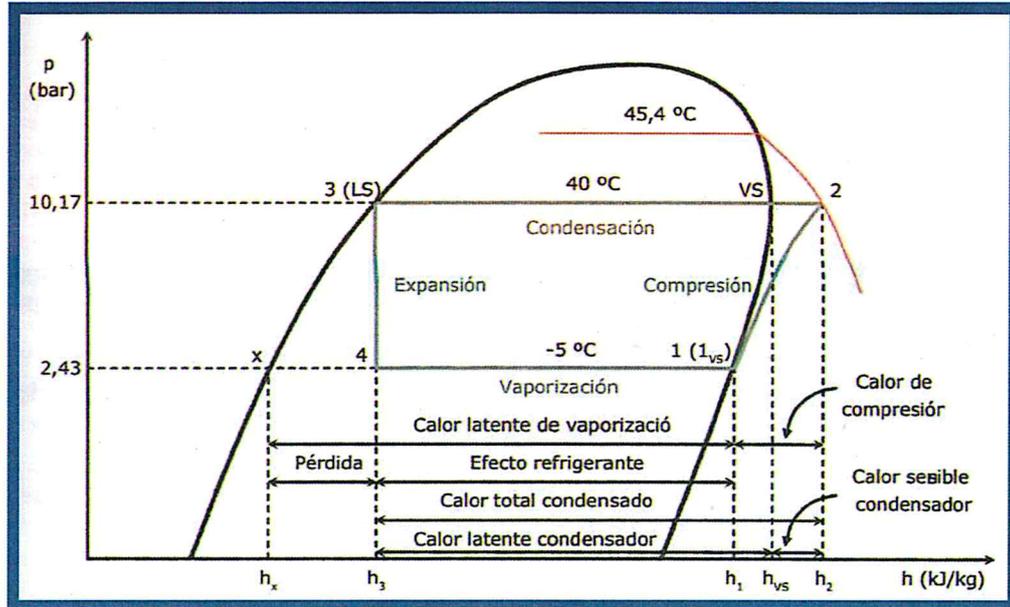


Figura 16. Diagrama p-h para R-134, ejemplo de cálculo.

| Punto | P (bar) | T (°C) | h (kJ/kg) | V _e (m ³ /kg) |
|-------|---------|--------|-----------|-------------------------------------|
| 1 | 2,43 | -5 | 395,56 | 0,0828 |
| 2 | 10,17 | 45,4 | 425,32 | 0,0207 |
| 3 | 10,17 | 40 | 256,43 | 0,0009 |
| 4 | 2,43 | -5 | 256,43 | 0,0262 |

Conociendo estos datos, se procede a calcular los parámetros característicos del ciclo:

- $E.R. = q_e = h_1 - h_4 = 395,56 - 256,43 = 139,13 \text{ kJ/kg}$
- $\dot{m} = \frac{\text{POTENCIA FRIGORÍFICA}}{E.R.} = \frac{1 \text{ kW}}{139,13} = 0,00719 \text{ kg/s}$
- $q_v = \frac{E.R.}{\text{volumen específico}} = \frac{139,13}{0,0828} = 1680,31 \text{ kJ/m}^3$
- $\dot{V}_d = \dot{m} \cdot \text{volumen específico} = \frac{0,00719 \text{ kg}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \cdot \frac{0,0828 \text{ m}^3}{\text{kg}} = 2,14 \text{ m}^3/\text{h}$
- $w_i = h_2 - h_1 = 425,32 - 395,56 = 29,76 \text{ kJ/kg}$
- $P_i = \dot{m} \cdot w_i = 0,00719 \cdot 29,76 = 0,214 \text{ kW}$
- $q_c = E.R. + w_i = h_2 - h_3 = 425,32 - 256,43 = 168,89 \text{ kJ/kg}$
- $COP = \frac{E.R.}{w_i} = \frac{139,13}{29,76} = 4,67$
- $COP_{\text{máx}} = \frac{T_1}{T_3 - T_1} = \frac{-5 + 273}{(40 + 273) - (-5 + 273)} = 5,96$

5.- Bibliografía.

- https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/motores/temas/ciclo_real.pdf
- <http://termo2-1mi131.blogspot.com.es/2013/11/ciclo-brayton-invertido.htm>
- <http://ieshuelin.com/huelinwp/download/Tecnologia/Tecnologia%20industrial/2-Circuito-frigorifico-y-bomba-de-calor.pdf>
- http://www.editorialdonostiarra.info/recursos/pdf/88_Tema9_TEC.INDUST_II.pdf
- https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2011/455/42611/1/Documento16.pdf
- http://www.editorialdonostiarra.info/recursos/pdf/88_Tema9_TEC.INDUST_II.pdf
- <http://www.salesianos-sevilla.com/tamayo/servicios/recursos/file/fr%C3%ADo%20industrial%20copia.pdf>
- <http://www.ingenierosindustriales.com/wp-content/uploads/downloads/2011/04/01.-M%C3%A1quina-Frigor%C3%ADfica-de-Compresi%C3%B3n-Mec%C3%A1nica.pdf>
- <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/frio-industrial-y-aire- acondicionado/materiales-de-clase-1/001%20Prod%20Frio.pdf>
- <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4701/fichero/Memoria%252F2.+Estado+del+a rte+de+las+maquinas+de+absorcion.pdf>
- http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/03-turbina_a_gas.pdf
- http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/sem_5_sistemas_de_refri geracion_y_bomba_de_calor.pdf
- *Frío Industrial y aire acondicionado.* Magin Lapuerta Amigo y Octavio Armas. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- *Manual Técnico de refrigerantes.* Ángel Luis Miranda (2012). Edición: MARCOMBO.
- *Refrigeración Industrial. Montaje y Mantenimiento de Instalaciones Frigoríficas.* Carlos González Sierra (2012). Edición: Ceysa.

ANEXO. Diagrama p-h R-314a.

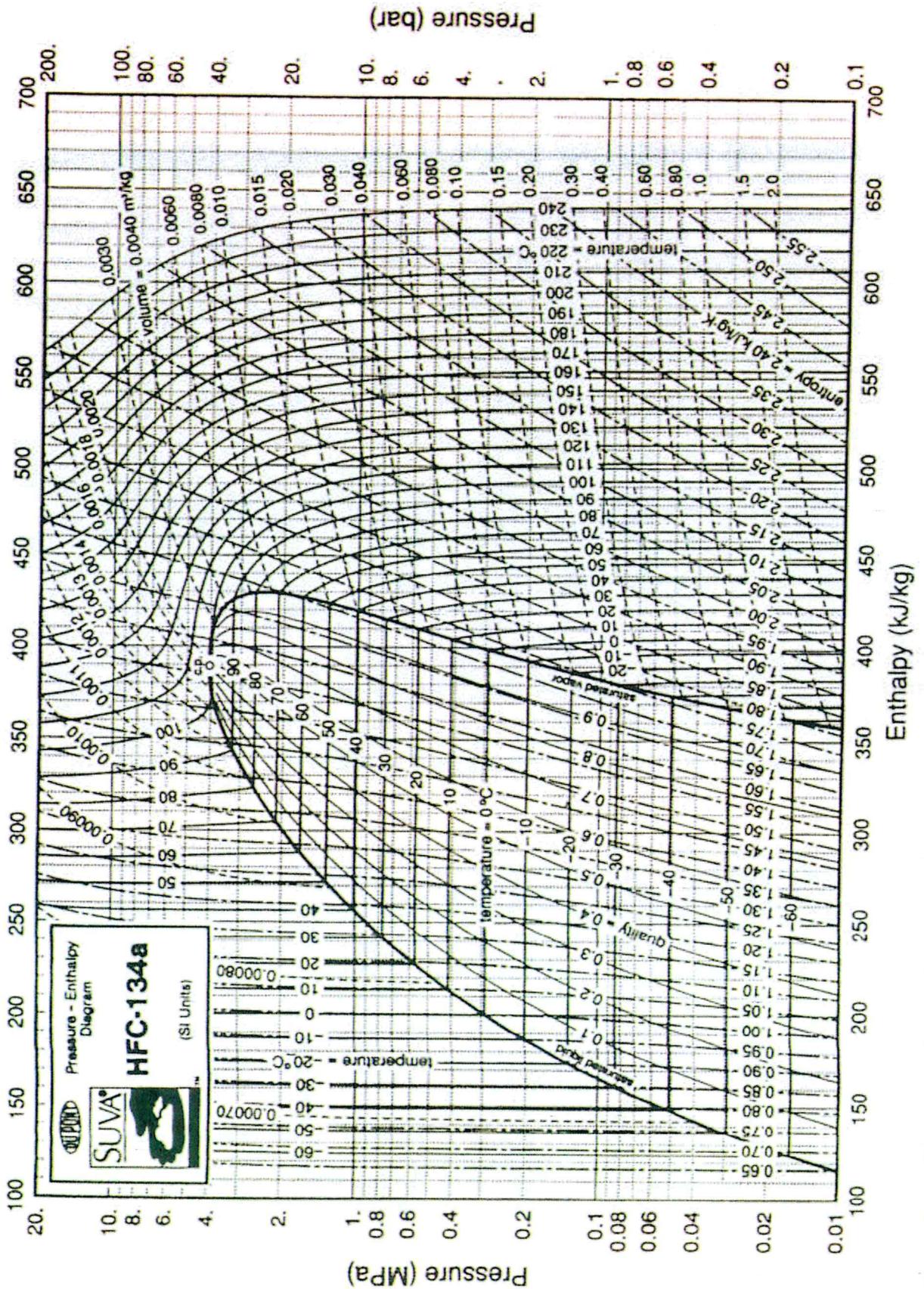


Figure 2.4-4 Pressure-enthalpy diagram for HFC-134a. (Used with permission of DuPont Fluorochemicals.)