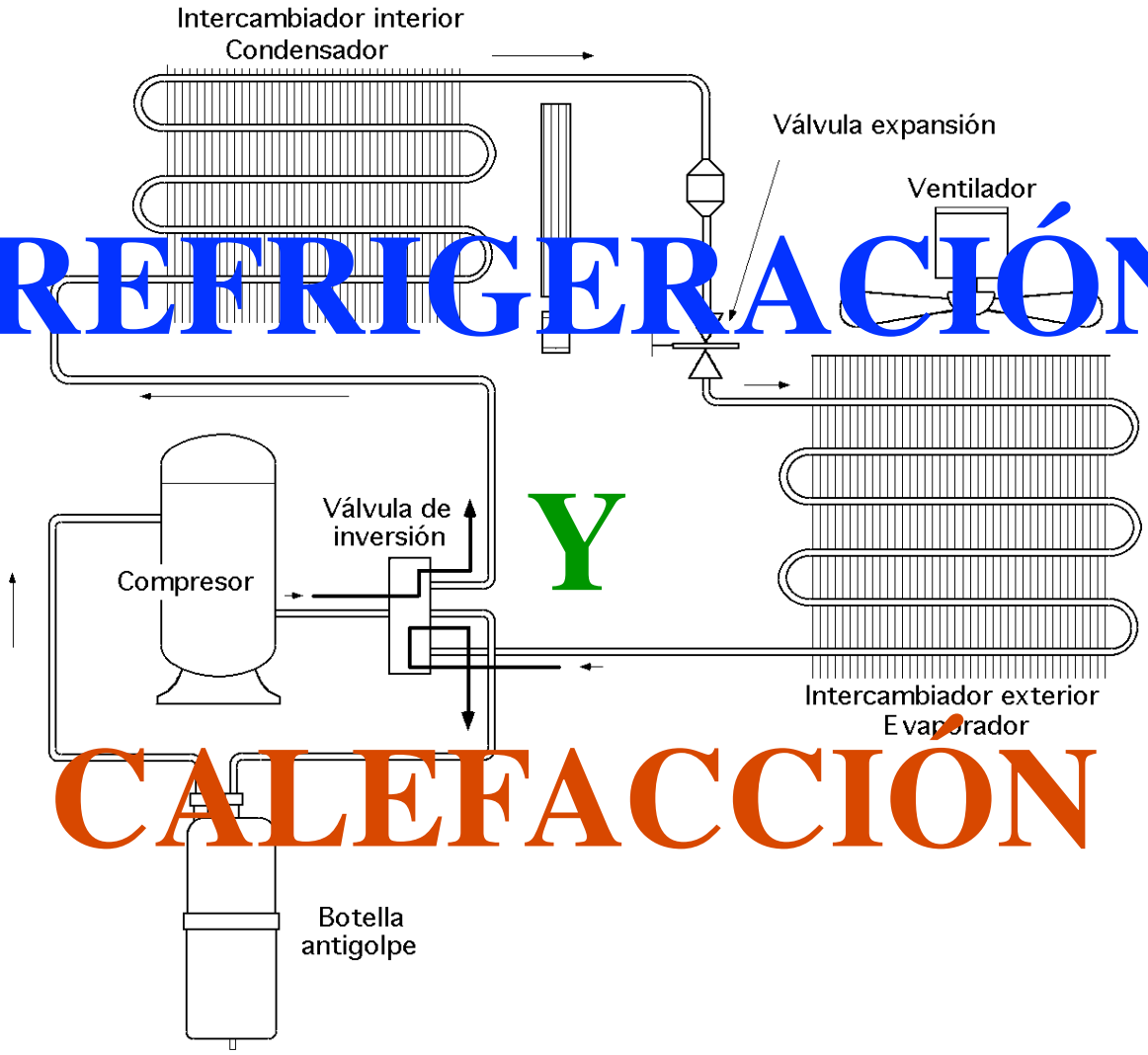
REFRIGERACIÓN Y CALEFACCIÓN



Pedro Fernández Díez

pfernandezdiez.es

REFRIGERACIÓN

I.- INTRODUCCIÓN A LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN Y BOMBA DE CALOR

pfernandezdiez.es

I.1.- INTRODUCCIÓN

El interés del hombre por la conservación de los alimentos se pierde en la noche de los tiempos; se puede decir que siempre ha existido una constante preocupación por procurarse no sólo los alimentos, sino también la conservación de los mismos para períodos menos favorables, sobre todo cuando se trataba de sustancias perecederas como las carnes, pescados y leche, es decir, alimentos de origen animal.

El primer sistema utilizado fue posiblemente la cocción y posteriormente la desecación, que se remontan a 40.000 años atrás. La salazón de la carne y del pescado era conocida entre los egipcios 4.000 años antes de Cristo; los romanos preparaban conservas combinando el uso del calor, del humo, de la sal y de las especias, sistemas que se utilizan actualmente; solían proteger los alimentos del calor estival, conservándolos en pozos y grutas en los que se hubiera acumulado hielo y nieve durante el invierno.

La importancia de la cadena del frío para la conservación de los alimentos no estuvo muy clara, hasta que en el año 1799, el explorador nórdico Pallas, encontró en la desembocadura del río Lena un mamut perfectamente conservado. Sin embargo el paso de técnicas empíricas a técnicas científicas de conservación se realizó sólo después de éste descubrimiento, sancionado por Pasteur en 1863, de que todos los procesos de alteración de los alimentos se deben a la proliferación de gérmenes y bacterias y no a procesos espontáneos de fermentación o putrefacción (que son procesos incontrolables).

Simultáneamente con los estudios de los mecanismos de desarrollo de las fermentaciones y de los procesos de putrefacción se comenzó a perfeccionar la técnica de producción del frío. El hielo arti-

ficial se produjo por primera vez en el año 1890. En 1918 se fabricó el primer refrigerador automático y en 1928 la primera unidad hermética. Es decir que el problema práctico de la conservación de los alimentos por medio del frío se ha resuelto en los últimos setenta años y, además de su utilización a nivel doméstico, el sistema ha tenido importantes aplicaciones industriales, ya que el uso del frío no sólo está considerado como un medio de conservación, sino también como un medio de preconservación vinculado con todas las industrias conserveras alimentarias.

I.2.- EL EQUIPO DE REFRIGERACION

Organos principales.- La producción de frío mediante sistemas mecánicos está basada en leyes físicas que regulan la evaporación y la condensación de un fluido.

En la Fig I.1 se presentan los órganos principales de un equipo de refrigeración:

1 el compresor

2 el condensador

3 la válvula de expansión termostática

4 el evaporador

5 los dispositivos de control y seguridad; tablero eléctrico de alimentación de la fuerza motriz

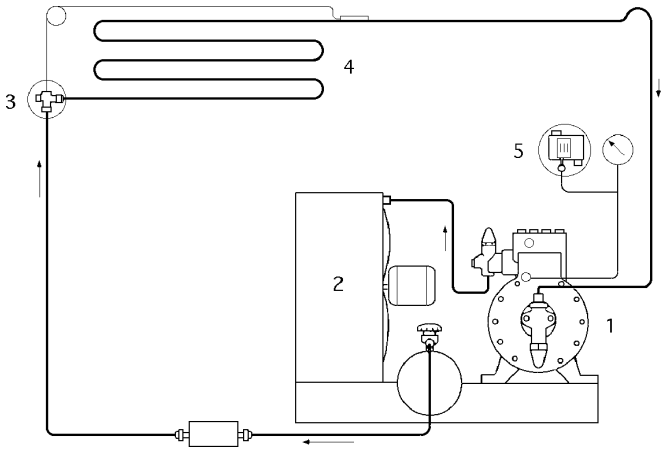


Fig I.1.- Organos principales de un equipo de refrigeración

El ciclo de refrigeracion.- El ciclo de refrigeración, si las transformaciones se producen en modo reversible, es el opuesto al ciclo de Carnot; las operaciones relativas a este ciclo se pueden esquematizar de la siguiente manera:

- Expansión adiabática con enfriamiento del fluido

- Absorción del calor a baja temperatura, isotérmica

- Compresión adiabática con calentamiento del fluido

- Cesión del calor a alta temperatura, isotérmica

El ciclo, se ha representado en el diagrama (p-v) de la Fig I.2a y en el diagrama (log p - i) de la Fig I.2.b comúnmente utilizado en los proyectos de equipos de refrigeración, dado que en él se pue-

den leer directamente las magnitudes que intervienen en el ciclo. La entalpía de una sustancia aumenta las magnitudes que intervienen en el ciclo y representa su contenido térmico a presión constante o calor total que dicha sustancia puede absorber o ceder al ambiente exterior.

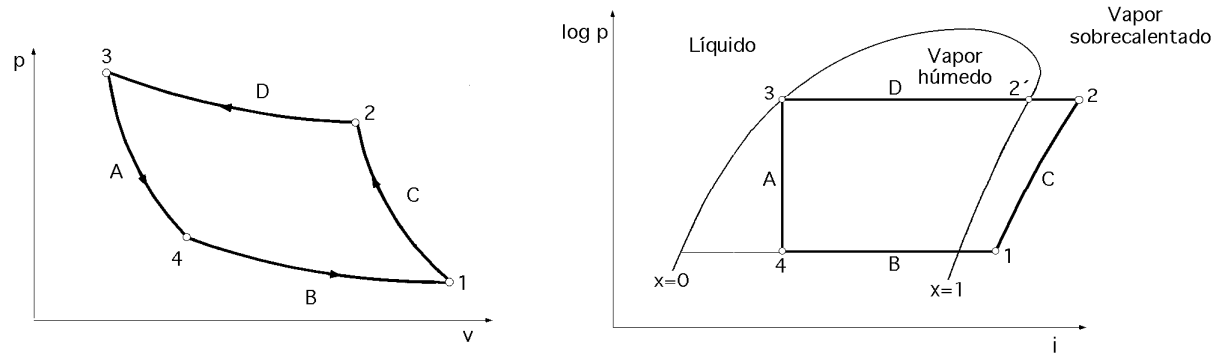


Fig I.2.- Ciclos frigoríficos elementales

En el diagrama (log p - i), cada segmento paralelo a las abscisas define las Kcal/kg que una sustancia refrigerante cede o absorbe del ambiente cuando pasa de uno a otro extremo de dicho segmento.

En la práctica, el ciclo inverso de Carnot no se sigue rigurosamente, dado que éste sirve solamente para establecer el máximo rendimiento posible que se podría llegar a alcanzar en condiciones ideales. Por lo tanto, la expansión A se reemplaza por una laminación a través de la válvula, (proceso irreversible). Además, en lugar de las isotermas, difíciles de realizar, se adoptan las isobaras, que, dentro de la curva limite de los vapores, llegan a coincidir con las primeras. El rendimiento del ciclo de refrigeración es inverso al de Carnot, y por esta razón, supera la unidad; ésto se explica puesto que no sólo se produce transformación de trabajo en calor, sino también transporte de calor desde una temperatura baja a una elevada. Por esto, más que de rendimiento, se habla de efecto refrigerante o potencia refrigerante y, en los paises anglosajones, de COP.

Mediante el análisis del ciclo de la Fig I.2b se pueden obtener los datos principales de funcionamiento de un equipo de refrigeración. Todas las magnitudes del ciclo se suelen referir a 1 kg de fluido; avanzando desde la izquierda hacia la derecha, en el sentido de las presiones constantes, entre la ordenada y la línea, x = 0, encontramos la zona de líquido subenfriado; entre la línea x = 0 y x = 1, la zona del vapor húmedo y a la derecha de la línea, x = 1, la zona del vapor sobrecalentado, es decir, vapor a una temperatura superior a la de evaporación.

La entalpía de un fluido está constituida por la suma de los calores sensible y latente, siendo el primero el que determina la elevación de la temperatura y el segundo el que se debe suministrar al fluido para hacerlo pasar del estado líquido al gaseoso y que el líquido restituye cuando se realiza el proceso inverso. Como punto de referencia para la entalpía, se puede adoptar convencionalmente la temperatura de 0°C, que no conduce a errores ya que siempre se trabaja en base a diferencias de en-

talpía y no de valores absolutos.

De acuerdo con la Fig I.2, $Q_1 = i_1 - i_4$, es el calor que un kg de líquido extrae al ambiente desde el evaporador, después de haber pasado de la presión p_2 a la presión p_1 a través de la válvula de laminación.

La expresión: $Q_2 = i_2 - i_1$, representa el trabajo de compresión necesario para hacer que el fluido pase de la presión de evaporación p_1 a la presión de condensación p_2.

El tramo (2-2') corresponde al sobrecalentamiento de compresión.

Teóricamente, esta transformación es adiabática, por lo que el tramo (1-2) describe la adiabática que, partiendo del punto 1 se encuentra en 2 con la isobara de condensación.

En el ciclo real la entropía aumenta; ésto se debe a las dispersiones térmicas del compresor y tuberías, a la pérdidas de presión en las válvulas y a las pérdidas por frotamiento que se verifican a lo largo del conducto que lleva hasta el condensador

El valor $Q_3 = i_2 - i_3$, es el calor que el fluido refrigerante cede al fluido de enfriamiento (aire o agua) y viene dado por la suma: $Q_1 + Q_2$

La transformación (3-4) en el ciclo de Carnot es $Q_4 = i_4 - i_3 = 0$, una adiabática, mientras que en el ciclo de refrigeración es una laminación.

La diferencia $i_3 - i_{3'}$ es el subenfriamiento del líquido con un aumento del efecto refrigerante

La diferencia, $i_1 - i_5$, es el sobrecalentamiento del vapor que, de producirse en el interior del ambiente a enfriar, lleva a un aumento del efecto refrigerante.

Si por el contrario, dicho sobrecalentamiento se produce entre el ambiente y el compresor, provoca un aumento del volumen especifico del gas y, en consecuencia. una disminución del rendimiento de este último órgano y un aumento de la temperatura al final de la compresión.

Cuanto mayor sea el sobrecalentamiento del vapor, mayor será la temperatura de compresión, que, en casos extremos, puede alcanzar valores que llegarían a comprometer las propiedades del aceite lubricante.

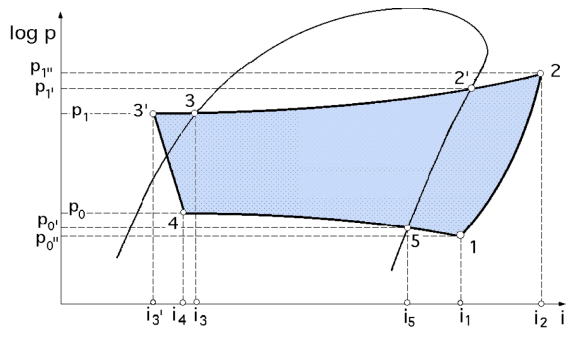


Fig I.3. - Caídas de presión en un diagrama (ln p,i)

$p_{1"} - p_{1'}$ es la caída de presión a lo largo de la tubería de alimentación

$p_{1'} - p_1$ es la pérdida de presión que se produce a lo largo de la tubería del líquido entre el condensador y la válvula termostática

$p_0 - p_{0'}$ es la caída de presión a lo largo del evaporador

$p_{0'} - p_{0"}$ es la caída de presión a lo largo de la tubería de aspiración

Los valores de estas caídas de presión en las tuberías del líquido, de la aspiración y de la alimentación tienen que estar contenidos dentro de unos límites muy estrechos, pues de no ser así, quedaría comprometido el rendimiento del equipo, como veremos más adelante.

I.3.- MAQUINAS FRIGORIFICAS DE FLUIDOS CONDENSABLES CON EXPANSION ISENTALPICA

Compresión en régimen húmedo.- La expansión isentálpica CD no es rentable y, por lo tanto, a partir del estado C del diagrama se efectúa la expansión de forma irreversible, sustituyendo el expansor por una válvula de estrangulamiento, por la que el fluido circula a entalpía constante, Fig I.4; ésto está motivado por una serie de dificultades técnicas y prácticas debido a que:

a) El posible trabajo que se puede obtener en el expansor sería una pequeña fracción del que debería suministrar el compresor, por cuanto el volumen específico del fluido (líquido) que se expande de C a D es más pequeño que el del fluido (vapor) que se comprime de A a B; el expansor debería trabajar con un fluido condensable de título muy pequeño, prácticamente cero, (líquido).

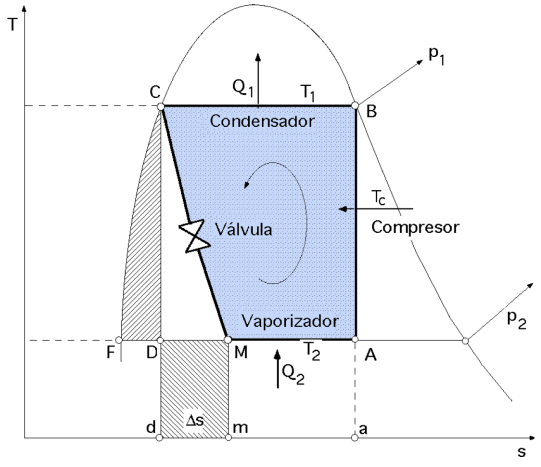


Fig I.4.- Compresión en régimen húmedo

b) Hay dificultades en la lubricación cuando existe un fluido de dos fases, por cuanto la parte líquida puede llegar a la solidificación.

c) La potencia recuperada en el expansor raras veces justifica el coste del mismo, lo que entraña, respecto al ciclo de Carnot, una disminución de la producción de frío, dada por el área (dDMmd) = $i_M - i_D$ y un aumento del trabajo de compresión igual al que se generaba en el expansor y se aprovechaba en el compresor.

El calor cedido al foco caliente es, $Q_1 = i_B - i_C$

El calor extraído de la fuente fría es, $Q_2 = i_A - i_M$ = *área (MAamM)*

El trabajo aplicado es, $T_C = i_B - i_A$

El coeficiente de efecto frigorífico es, $COP = \dfrac{Q_2}{T_C} = \dfrac{i_A - i_M}{i_B - i_A}$

Las pérdidas relativas debidas al reemplazamiento del expansor isentrópico por la válvula de estrangulamiento, dependen de la naturaleza del fluido frigorígeno y, en particular, de su calor específico en estado líquido y de su calor latente de vaporización, pérdidas que son proporcionales a $\dfrac{c_p}{\rho}$, y que, en general, son pequeñas.

Compresión en régimen seco.- En este tipo de frigoríficos, a la salida del evaporador se añade

un separador de líquido, de forma que el compresor sólo pueda aspirar vapor saturado seco en lugar de vapor húmedo, como sucedía en el caso anterior, Fig I.5.

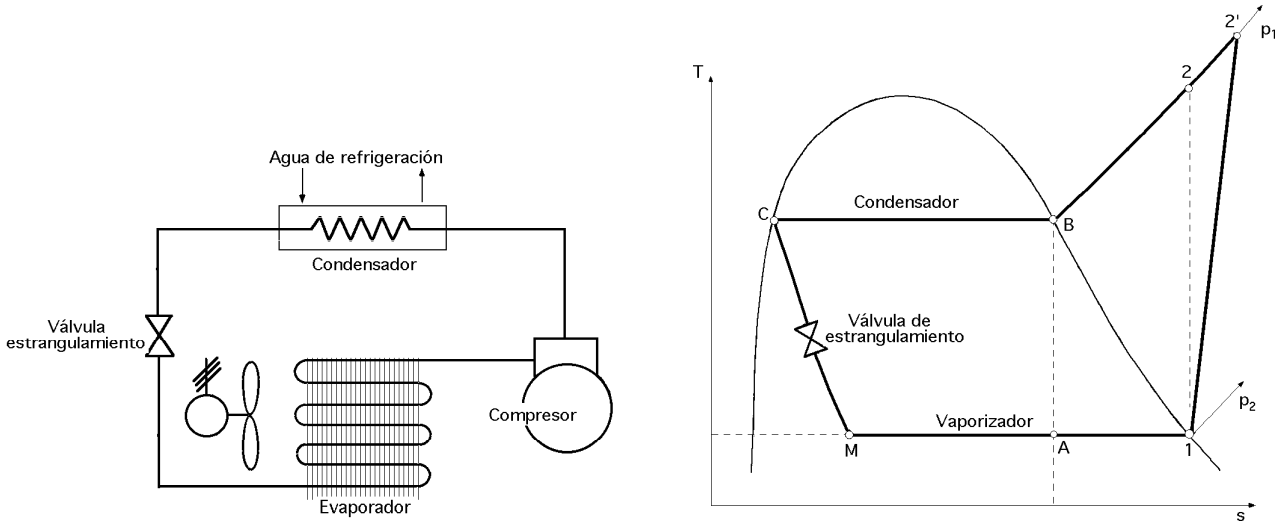


Fig I.5.- Compresión en régimen seco

Las transformaciones del ciclo son las siguientes:

(1-2') $\Rightarrow$ *Compresión real,* $T_C = i_{2'} - i_1$

(2'- C) $\Rightarrow$ *Enfriamiento (2'B) y condensación (BC),* $Q_1 = i_{2'} - i_C$

(C-M) $\Rightarrow$ *Estrangulación,* $i_C = i_M$

(M-1) $\Rightarrow$ *Vaporización,* $Q_2 = i_1 - i_M$

(A-1) $\Rightarrow$ *Separador de líquido*

El coeficiente de efecto frigorífico es, $COP = \dfrac{Q_2}{T_C} = \dfrac{i_1 - i_M}{i_{2\phi} - i_1}$

Una razón para realizar la compresión en régimen seco consiste en que la parte líquida del vapor húmedo frigorígeno pudiera quedar detenida en la culata del compresor, o tener un volumen mayor que el volumen muerto del compresor (golpe de líquido), con la posibilidad de averiar las válvulas o la propia culata; otro peligro es que el líquido llegue a arrastrar el aceite de lubricación de las paredes del cilindro, acelerando así su desgaste. Esto requiere un trabajo adicional en el compresor, por cuanto a la salida del mismo, estado 2´, el fluido está recalentado. Además, la presencia de la fase líquida a la entrada podría provocar efectos corrosivos en el compresor.

Por otro lado, se puede someter al líquido condensado a un subenfriamiento CC´, Fig I.6.7, mediante un intercambiador de calor, antes de proceder a su expansión en la válvula de estrangulamiento. Este proceso aumenta el efecto frigorífico, llevándose la compresión hacia la región de vapor recalentado $(1 \rightarrow 1')$, donde el trabajo de compresión es mayor.

El estado 1´ tiene un volumen específico mayor que el 1, por lo que el compresor debe proporcionar un caudal másico mayor. No obstante, el intercambiador queda justificado cuando haya que ga-

rantizar que no entre líquido al compresor $(1 \rightarrow 1')$; también hay que asegurar que en la válvula de estrangulamiento entre sólo líquido, para un correcto funcionamiento de la misma.

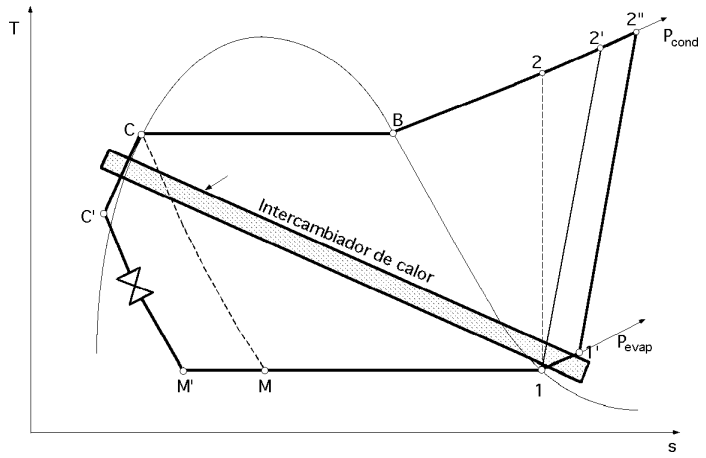


Fig I.6.- Ciclo frigorífico con subenfriamiento del líquido condensado mediante un intercambiador de calor

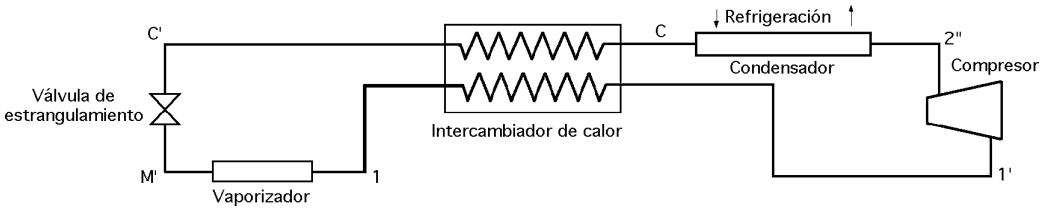


Fig I.7- Esquema de ciclo frigorífico con subenfriamiento del líquido condensado mediante un intercambiador de calor

I.4.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR

Del análisis del consumo de energía que se produce en nuestro país, la mayor parte, 50%, es consecuencia de la actividad industrial, del que el 67% se utiliza en procesos térmicos, y entre el 35% y el 40% se elimina en procesos de bajo nivel térmico que, a priori, no se pueden aprovechar, y que son la fuente ideal para las bombas de calor, siendo el sector industrial su principal campo de aplicación.

Otra aplicación importante de las bombas de calor, se presenta en los acondicionamientos invierno-verano, puesto que el circuito de la bomba de calor es un circuito frigorífico y en estas instalaciones se precisa eliminar calor al exterior en verano, y absorberlo en la época invernal.

Para que la bomba de calor pueda realizar esta doble función, dispone de una válvula conmutadora que permite invertir el sentido de circulación del fluido.

Desde un punto de vista termodinámico, el ciclo que tiene lugar en la bomba de calor es un ciclo Rankine recorrido en sentido inverso. Se suministra energía a un compresor y se considera como energia útil la obtenida en forma de calor en el proceso de condensación.

En la práctica, este valor varía entre 2,5 y 3,5 llegando en algunos casos a valores de 4 y 5.

El siguiente cuadro resume el rendimiento total obtenido del petróleo crudo considerado como energía primaria siguiendo el proceso de transformación y transporte hasta su consumo en calefacción, según sea la fuente energética utilizada (gas o gasóleo, electricidad y bomba de calor).

Como se puede observar, la utilización de la bomba de calor supone una mejor utilización de la energía primaria.

Objetivo de la bomba de calor.- Es un sistema convencional de refrigeración, de forma que de un foco a baja temperatura se absorbe una cierta cantidad de calor que se cede, incrementada, a un foco caliente, en el que se disipa, sin ser normalmente utilizada. Sin embargo, este calor desprendido por el condensador se puede utilizar, y las máquinas térmicas, diseñadas para este fin, se denominan bombas de calor, por cuanto realizan un *transporte de calor* desde un nivel de baja temperatura hasta otro nivel energético de mayor temperatura.

La bomba de calor permite recuperar la energía que en muchos procesos es necesario evacuar, sin posibilidad de ser aprovechada, debido a su baja temperatura, y mediante un proceso térmico, hacerla nuevamente útil.

El principio de la bomba de calor, fue debido a Kelvin, que vió la posibilidad de calentar una casa en invierno tomando calor del exterior, y refrigerarla en verano enviando calor al medio exterior que ahora se encuentra a mayor temperatura.

Un fluido frigorígeno extrae calor q_2 de una fuente fría y elimina un calor q_1 hacia los alrededores (medio exterior), siendo el objetivo principal la extracción de calor de la fuente fría. Sin embargo, el mismo ciclo básico se puede utilizar para el suministro de calor q_1 a un espacio habitable, como una casa, un edificio comercial, una residencia, oficinas, etc, de forma que en estos casos el calor proviene de los alrededores que están más fríos.

Produccion simultánea de frío y de calor.- El ciclo frigorífico de Carnot está representado en la Fig I.8 por el contorno (1234), mientras que el ciclo de la bomba de calor por el (abcd). Si se intenta obtener simultáneamente calor y frío, se pueden reunir los dos ciclos en un ciclo común (ABCD), que tiene la ventaja de poder trabajar con un solo fluido, un sólo compresor y un sólo expansionador.

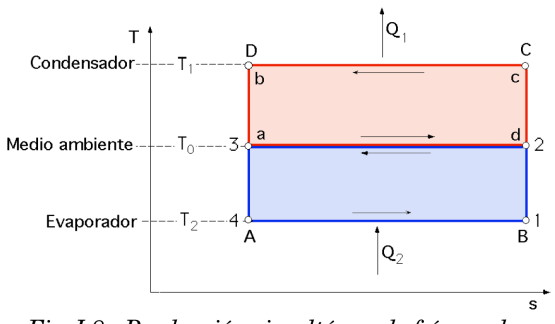


Fig I.8.- Producción simultánea de frío y calor (ciclo combinado)

El inconveniente del ciclo combinado radica en la relación constante entre el calor y el frío producidos, ya que no se intercambia calor con el medio ambiente.

La cantidad de calor tomada del local a refrigerar viene dada por Q_2 y viene relacionada con el calor cedido a la calefacción Q_1, por: $Q_1 = Q_2 + T$

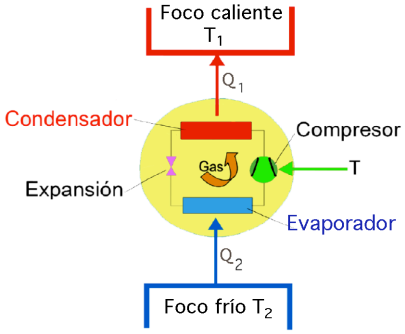


Fig I.9.- Esquema de bomba de calor

El coeficiente de efecto frigorífico del ciclo es, $COP = \frac{Q_2}{T}$

El coeficiente de utilización, efecto útil ε_u, está caracterizado por la suma de los calores puestos en juego, respecto al trabajo aplicado, en la forma:

$$\varepsilon_u = \frac{Q_1 + Q_2}{T} = \left| Q_1 = Q_2 + T \right| = \frac{Q_2 + T + Q_2}{T} = 2\ COP + 1$$

por lo que el calor cedido al foco de mayor temperatura es superior al trabajo suministrado.

Las irreversibilidades reducen el valor del coeficiente de utilización ε_u ; en la práctica, el ciclo común (máquina frigorífica-bomba de calor), se puede realizar en instalaciones con fluidos condensables, o con aire.

En un frigorífico a régimen seco, la temperatura de condensación es similar a la temperatura del medio ambiente, y el calor de recalentamiento se aplica al fluido frigorífico a una temperatura superior a la del medio ambiente. De esta forma, el condensador puede ir precedido por un intercambiador de calor en el que el calor de recalentamiento se emplea para recalentar agua, que posteriormente se puede utilizar como calefacción; la temperatura que adquiere el agua de calefacción puede ser sensiblemente la misma que tenga el fluido al final de la compresión.

En una máquina clásica, el calor cedido al agua de la calefacción viene a ser del orden de un 50% del calor cedido al condensador. En la instalación combinada puede aumentarse la presión de compresión para elevar el nivel de temperatura de condensación. Sin embargo, este aumento de presión no siempre es posible, dependiendo sobre todo del tipo de fluido que evolucione, que tal vez la relación de compresión haga el proceso impracticable.

Por ejemplo, en una instalación de amoniaco, en principio se puede realizar el ciclo combinando (máquina frigorífica-bomba de calor). Para obtener una temperatura de condensación de 120°C a partir de una temperatura de evaporación de -20°C, la relación de compresión debe ser del orden de 55, valor difícilmente realizable con las condiciones tecnológicas actuales.

Si el fluido es gas carbónico, para una temperatura de vaporización $T_0 \approx$ - 20°C, la presión final de compresión es del orden de 120 atm y la relación de compresión del orden de 8.

Si por necesidades técnicas se utiliza el calor sólo en el intervalo de temperaturas 70°C÷125°C, mientras que el resto de la refrigeración se efectúa con intercambio de calor con el medio ambiente, la energía eléctrica necesaria para la compresión es prácticamente igual al calor utilizado, mientras que en el mismo tiempo se produce una cantidad notable de frío. Para 1 cal/seg de energía eléctrica utilizada, se obtiene 1,2 cal/seg de frío. La bomba de calor moderna combina, en la misma máquina, la calefacción y la refrigeración de un cierto espacio.

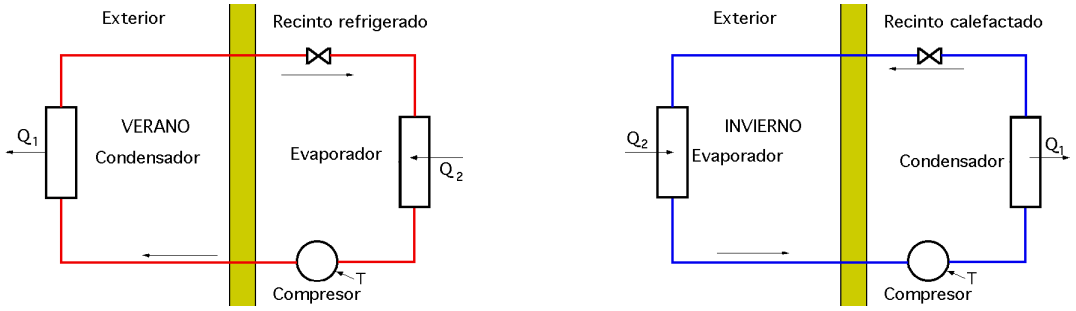


Fig I.10.- Esquemas de funcionamiento de una bomba de calor, con válvula de inversión

a) Cuando se necesita enfriamiento, el sistema de bomba de calor funciona como un acondicionador de aire, extrayendo un calor Q_2 de un espacio habitable y eliminando al exterior del edificio un calor Q_1. En esta operación, el COP viene dado por la expresión:

$$COP_{Refrigeración} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1}$$

b) Cuando la bomba de calor funciona como calefacción, en invierno, extrae calor del medio y la disipa en el espacio habitable, siendo:

$$COP_{Calefacción} = \frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_1}$$

La eficiencia de la bomba de calor o COP, es la relación entre la energía útil obtenida de la bomba de calor (calefacción y refrigeración) y la empleada en el compresor, de la forma:

$$COP_{Bomba\ de\ calor} = \frac{(i_2 - i_3) + (i_1 - i_4)}{i_2 - i_1}$$

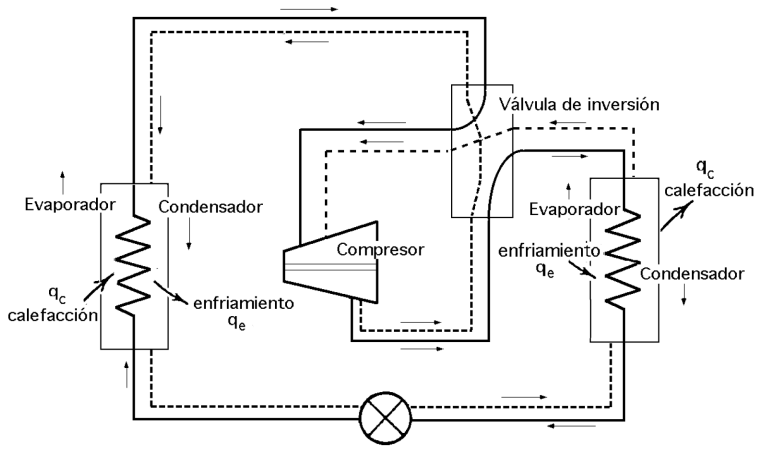


Fig I.11.- Ciclo de la bomba de calor

El rendimiento de una bomba de calor cuando opera como calefacción aumenta si la diferencia de temperatura $T_2 - T_1$, disminuye, al igual que ocurre en un refrigerador a un acondicionador de aire. Si se usa una bomba de calor para el acondicionamiento de aire de un edificio, el evaporador se encuentra dentro del edificio y el condensador en el exterior; en la operación como calefactor, el evaporador se encuentra, en el exterior del edificio y el condensador en el interior. No es rentable tener dos juegos del equipo o tener que darle la vuelta, por lo que cada uno de los intercambiadores de calor (uno dentro y el otro fuera del edificio) deben funcionar como condensador y como evaporador, según el tipo de operación; ésto se consigue mediante una válvula de inversión del ciclo, Fig I. 11. La línea llena indica la dirección del flujo

para el funcionamiento como calefactor y la línea a trazos es para el modo de enfriamiento. Se observa que la dirección del flujo por el compresor es siempre la misma, sin importar el modo de operación. En la Fig I.12 se presenta el esquema de una bomba de calor funcionando en situación de verano y en la Fig I.13 funcionando en situación de invierno.

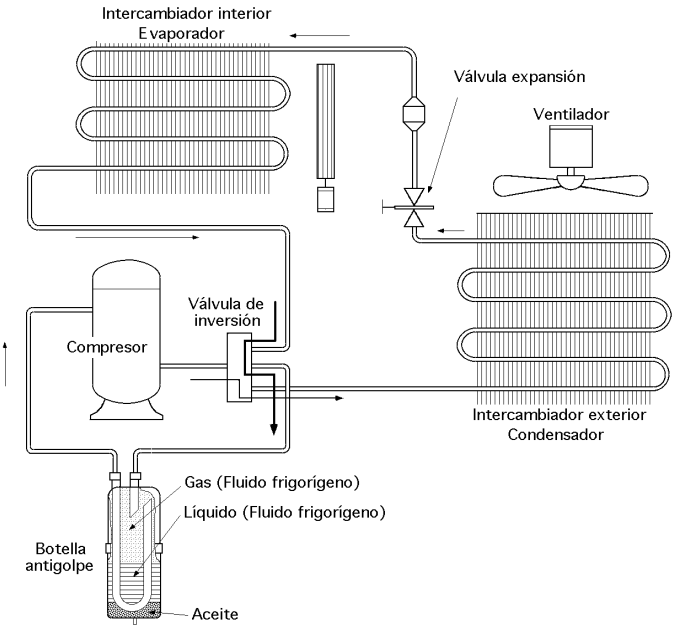


Fig I.12.- Bomba de calor funcionando en situación de verano, Refrigeración

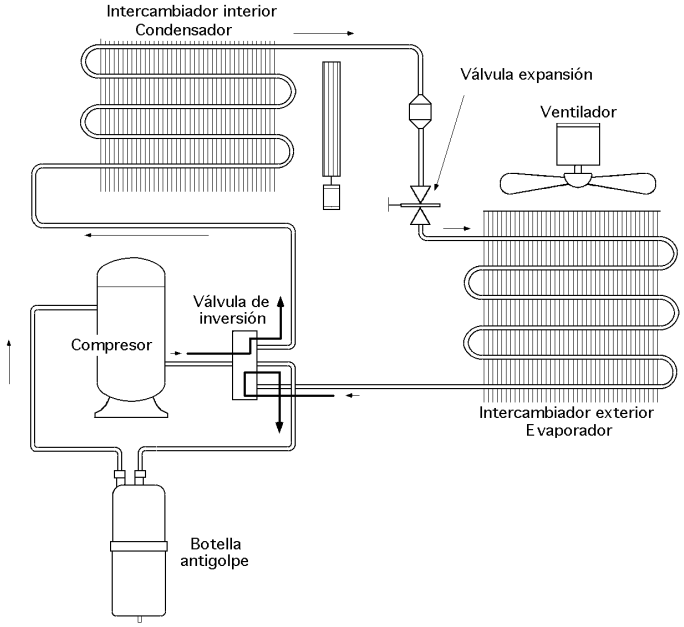


Fig I.13.- Bomba de calor funcionando en situación de invierno, Calefacción

Tabla I.1.- Cuadro de transformación de unidades

Para pasar de	*a*	*multiplicar por*
ft/seg²	*ACELERACION*	*0,305*
in/seg²		*0,025*
gr/cm³	*DENSIDAD*	*1000*
lbm/ft³		*16,018*
slug/ft³		*515,379*
Btu/ft²hora	*ENERGIA/SUPERFICIE TIEMPO*	*3,152*
cal/cm²min		*697,333*
W/cm²		*10000*
Kcal/m²hora		*1,162*
Btu/seg	*POTENCIA (W)*	*1054,350*
cal/seg		*4,184*
ft lbf/seg		*1,356*
HP (550 ft lbs/seg)		*745,700*
HP (Eléctrico)		*746,000*
HP (métrico)		*735,499*
Atm	*PRESION (N/m²)*	*1,0133.10⁵*
Bar		*10000*
mm Hg (0°C)		*133,322*
cm H_2O (4°C)		*98,064*
dinas/cm²		*0,1*
kg_f/cm²		*98066,5*
lb_f/in²		*6894,76*
Pascal, Pa		*1*
Torr (0°C)		*133,322*
ft/seg	*VELOCIDAD (m/seg)*	*0,305*
Km/h		*0,278*
Nudo (internacional)		*0,514*
Milla/h (americana)		*0,447*
Btu in/ft²seg°F	*CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m°K)*	*518,873*
Btu/ft.h °F		*1,730*
Kcal/h.m.°C		*1,162*

Tabla I.2.- Cuadro resumen del rendimiento total obtenido del petróleo crudo considerado como energía primaria

