



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CAMPUS ARAGÓN**

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

“LA BOMBA DE CALOR”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A:
JOEL GARCÍA ZÁRRAGA**

ASESOR: ING. DÁMASO VELÁZQUEZ VELÁZQUEZ



SAN JUAN DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO

2009.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico el presente trabajo a mis padres:
L. Ernesto Baños y Lucía Zárraga,
por el apoyo que en vida me dieron,
guiándome por el camino correcto
siempre estarán presentes en mis logros.

A mi esposa Araceli, por estar siempre conmigo,
por su ejemplo y dedicación y demostrar
que se puede lo que uno se propone.

A mi hijo Yahel, por ser lo mejor
que me ha pasado en la vida, y
ser la fortaleza que siempre me
acompaña.

A mis hermanos:
Leticia, Mario, Jorge y Ernesto,
que aunque nos separan las distancias
siempre estamos juntos.

Un agradecimiento especial a mi asesor
Ingeniero Dámaso Velázquez Velázquez
por su dedicada orientación.

Al Maestro Fidel Gutiérrez Flores
por su aliento, ejemplo y por creer en mí,
sobre todo por su amistad.

A los maestros por sus enseñanzas y apoyo,
a lo largo de la carrera.

A Jorge, Juan, Alejandro por su compañía
y amistad durante y después de la carrera.

A la Universidad Nacional Autónoma de México,
por que ha sido, es y será siempre,
nuestra Máxima Casa de Estudios

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón,
por ser nuestra Alma Mater, y brindarme la oportunidad
de llegar a este momento en mi carrera profesional.

ÍNDICE

Página

INTRODUCCIÓN	I
---------------------	----------

CAPÍTULO I CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TERMODINÁMICA

1.1. Principios Físicos de Funcionamiento de la Bomba de Calor	1
1.2. Obtención de Calor del Foco Frío y Caliente	8
1.3. Ciclos Teóricos y Reales	15

CAPÍTULO II CONCEPTUALIZACIÓN DE LA BOMBA DE CALOR POR SU NATURALEZA

2.1. Clasificación de las Bombas de Calor	27
2.2. Clasificación De Acuerdo a la Fuente	33
2.3. Ventaja de los Fluidos Utilizados	36

CAPÍTULO III SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA BOMBA DE CALOR

3.1. Componentes de la Bomba de Calor (Materiales de Construcción)	38
3.2. Refrigerantes	46

CAPÍTULO IV ANÁLISIS PRELIMINAR DE VIABILIDAD

4.1. Criterios Medioambientales	79
4.2. Rentabilidad de la Bomba de Calor	82

CONCLUSIONES	84
---------------------	-----------

Definiciones de Términos	86
---------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	88
---------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

Denominamos BOMBA DE CALOR a una máquina térmica capaz de transferir calor de una fuente fría a otra más caliente. Podríamos definirlo como un equipo de aire acondicionado, que en invierno toma calor del aire exterior, a baja temperatura y lo transporta al interior del local que se ha de calentar; todo este proceso se lleva a cabo mediante el accionamiento de un compresor.

Sus ventajas fundamentales son su consumo. El ahorro de energía, que es lo mismo que decir, ahorro de dinero. Sirva como ejemplo: por 1 KW de consumo de la red eléctrica, da 3 KW de rendimiento en calor; lo cual equivale a decir que consumiendo la misma energía eléctrica, la Bomba de Calor suministra 3 veces más calor que un aparato de calefacción eléctrica.

Resumiendo, la Bomba de Calor tanto en invierno como en verano; actúa como un equipo acondicionador.

Para investigar, desarrollar y difundir los intereses de la Bomba de Calor se constituyó en 1996 el Equipo Nacional Español de la Bomba de Calor 1(ENEBC), integrado por 16 miembros entre los que se encuentran asociaciones, empresas y organismos relacionados con este sector. La Bomba de Calor aporta soluciones energéticas y medioambientales acordes con la demanda de la época actual. Se utiliza en el campo de la calefacción de viviendas, locales comerciales, enfriamiento y calentamiento de agua, refrigeración, así como en distintos procesos industriales.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) anima a los países a asociarse en la investigación y desarrollo de nuevas soluciones energéticas basadas en la Bomba de Calor en todas sus variantes, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, alcanzar una mayor eficiencia energética y proveer de alternativas a los combustibles tradicionales. El organismo que recoge y disemina esta información es el centro de la bomba de calor con sede en Holanda.

IMAGEN DE ALGUNAS BOMBAS EXISTENTES



¹ EQUIPO NACIONAL ESPAÑOL DE LA BOMBA DE CALOR (ENEBC)

El interés mostrado hacia la bomba de calor radica en la poca difusión que se tiene en nuestro país, sin embargo, también es debido a que es una nueva tecnología en vías de desarrollo e incluso experimental, que pretende apoyar la reducción en los índices de contaminación, además de aprovechamiento de energías alternativas.

La realización de este estudio pretende la incorporación de estos mecanismos en la vida doméstica, desarrollo industrial, además de ampliar los usos de estos equipos; estos sistemas son muy versátiles, compactos y no requieren personal de planta para su operación debido a que no son equipos peligrosos por no manejar presiones altas, voltajes riesgosos o partes que generen un riesgo hacia los usuarios de éstos.

Debido a lo compacto de los equipos no se requiere de cimentaciones especiales, instalaciones demasiado elaboradas o costosas, por si fuera poco, la operación de estos equipos no requiere de conocimientos muy amplios o específicos.

El calor fluye de forma natural desde las altas temperaturas a las bajas temperaturas. Sin embargo, la Bomba de Calor es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Las Bombas de Calor pueden transferir este calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (foco frío), tales como aire, agua o la propia tierra, hacia las dependencias interiores que se pretenden calefactar, o bien para emplearlo en procesos que precisan calor en la edificación o la industria. Es posible, así mismo, aprovechar los calores residuales de procesos industriales como foco frío, lo que permite disponer de una fuente a temperatura conocida y constante que mejora el rendimiento del sistema.

Las Bombas de Calor también pueden ser utilizadas para refrigerar. En este caso, la transferencia de calor se realiza en el sentido contrario, es decir, desde la aplicación que requiere frío al entorno que se encuentra a temperatura superior. En algunas ocasiones, el calor extraído en el enfriamiento es utilizado para cubrir una demanda simultánea de calor. Para transportar calor desde la fuente de calor al sumidero de calor, se requiere aportar un trabajo. Teóricamente, el calor total aportado por la Bomba de Calor es el extraído de la fuente de calor más el trabajo externo aportado. El principio de funcionamiento de las Bombas de Calor no es reciente. Sus orígenes provienen del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas evolucionaba cíclicamente, era comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor.

El desarrollo de los equipos de refrigeración tuvo un rápido progreso en aplicaciones como la conservación de alimentos y el aire acondicionado. Sin embargo, las posibilidades de utilizar la otra fuente térmica, el calor o el frío y calor simultáneamente no se aprovecharon. Esto fue debido por una parte a las dificultades tecnológicas que presentaba la construcción de la Bomba de Calor, y por otra, al bajo precio de la energía, que hacía que ésta no fuera competitiva con los sistemas tradicionales de calefacción a base de carbón, fuel-oil o gas, que presentaban una clara ventaja en relación con sus costos. Por ejemplo, en 1965, en Estados Unidos, sólo las Bombas de Calor con un COP superior a 5 conseguían acercarse a los costos del combustible más caro, que en esos años era el gas ciudad.

A finales de los años cincuenta se inició la expansión de la Bomba de Calor en Estados Unidos y su producción en serie, con la siguiente evolución en el número de ventas: 1954 (2.000 unidades), 1957 (10.000 unidades), 1963 (76.000 unidades). En Europa no se inicia su comercialización hasta 1970. Así, en 1973 se vendieron en Francia 600 Bombas de Calor de tipo doméstico y 7.000 unidades en 1977. En España en 1980, del orden de 2.500 unidades. En 1968 se realizó la primera instalación con Bomba de Calor a gas en Europa, en una pista polideportiva holandesa.

La crisis del petróleo y el alza de los precios de los combustibles a partir de 1973, impulsó las investigaciones en nuevos equipos de alta eficiencia, además de cambiar el posicionamiento de los costos de calefacción, situación que benefició el desarrollo de la Bomba de Calor. A lo largo de estos años, además de los cambios coyunturales que han propiciado el aumento de las ventas, las Bombas de Calor han tenido una evolución positiva desde el punto de vista tecnológico.

En un principio, el desarrollo se centró en equipos reversibles aire-aire. El fin principal de estas bombas era la refrigeración, en consecuencia, el diseño estaba orientado a las condiciones del ciclo para obtener frío en verano. Por esta razón, existían una serie de defectos de la máquina al funcionar para dar calefacción, que hoy en día se encuentran superados gracias al desarrollo de los compresores y a la introducción de la electrónica para el control de desescarche.

Estos defectos eran:

- Fallas del compresor por golpes de líquido, falta de engrase o sobrecarga del motor de accionamiento.
- Formación de hielo en el evaporador.

- Potencia calorífica baja.
- Costos de explotación superiores a los previstos.

En el momento actual, la utilización de Bombas de Calor se justifica, además del ahorro energético que suponen, por su contribución a la reducción de las emisiones de CO₂. Las Bombas de Calor consumen menos energía primaria que los medios tradicionales de calefacción. Sin embargo, a nadie se le escapa que el efecto sobre el medio ambiente de las Bombas de Calor depende mucho de cómo se genere la energía eléctrica. Si la energía eléctrica proviene de fuentes como la hidroeléctrica ó eólica, es clara la reducción de las emisiones, pero incluso cuando la electricidad que alimenta las bombas es generada mediante centrales térmicas de combustibles fósiles, se demuestra que la reducción total de emisiones es importante.

Considerando lo descrito, en este trabajo se contemplan los siguientes temas, estructurados en cuatro capítulos a saber.

En el Primer Capítulo se establecen los conceptos básicos de la termodinámica y sus efectos que producen en las Bombas de Calor.

En el Segundo Capítulo se proporciona una explicación amplia de las Bombas de Calor y su clasificación.

El Tercer Capítulo está destinado a los materiales constitutivos de las partes de la Bomba de Calor.

Finalmente, en el Capítulo Cuatro se plasman los análisis para la viabilidad del empleo de las Bombas de Calor.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TERMODINÁMICA

1.1. Principios Físicos de Funcionamiento de la Bomba de Calor

La bomba de calor se fundamenta en un ciclo cerrado cuya utilidad es la extracción de calor de un medio de baja temperatura (y por ello no utilizable) cediéndolo a otro medio a la temperatura necesaria para su utilización. La transferencia se logra a través de un circuito frigorífico clásico, formado por: Compresor, Condensador, sistema de Expansión y Evaporador, del que interesa la energía calorífica cedida por el condensador, en forma de agua o aire caliente y no la que se absorbe en el evaporador, fuente fría, del aire ambiente o del agua de un pozo o de un río.

El calor fluye de forma natural desde las altas temperaturas a las bajas temperaturas. Sin embargo, la Bomba de Calor es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. La Bomba de Calor puede transferir este calor desde la fuente natural (aire, agua o la propia tierra) del entorno a baja temperatura (foco frío), hacia las dependencias interiores que se pretenden aclimatar, o bien para emplearlo en procesos que precisan de calor en la industria. Es posible, así mismo, aprovechar los calores residuales de procesos industriales como foco frío, lo que permite disponer de una fuente a temperatura conocida y constante que mejora el rendimiento del sistema. Las Bombas de Calor también pueden ser utilizadas para refrigerar. En este caso la transferencia de calor se realiza en el sentido contrario, es decir, desde la aplicación que requiere frío al entorno que se encuentra a temperatura superior. En algunas ocasiones, el calor extraído en el enfriamiento es utilizado para cubrir una demanda simultánea de calor.

Para transportar calor desde la fuente de calor al sumidero de calor, se requiere aportar un trabajo. Teóricamente, el calor total aportado por la Bomba de Calor es el extraído de la fuente de calor más el trabajo externo aportado. El principio de funcionamiento de las Bombas de Calor no es reciente. Sus orígenes provienen del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas que evolucionaba cíclicamente, era comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor.

El interés de la bomba de calor reside en que la cantidad de energía consumida en el compresor que gira (mediante un motor eléctrico) es en general pequeño, en comparación con la cantidad de energía desprendida por el condensador, siendo ésta, la energía útil necesaria para aclimatar el medio deseado. Lo anterior da lugar, en una primera estimación, a que la relación entre la potencia calorífica suministrada al medio que se pretende aclimatar y la potencia consumida o absorbida en los bornes del compresor es de $r = 3.6$.

Definiendo, como el rendimiento mecánico del motor, es decir:

$$W = rE \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

W = Energía mecánica absorbida en el eje del compresor.

E = Energía consumida por el motor

Si se compara esta relación con la correspondiente a la calefacción por resistencia eléctrica (efecto joule), que resulta ser $r = 1$, se observa que para un consumo igual de energía, una bomba de calor suministra de tres a cuatro veces más calor útil que la calefacción eléctrica convencional, de ahí el gran interés de la bomba de calor. En el momento actual la utilización de Bombas de Calor se justifica, además del ahorro energético que suponen, proporciona una reducción considerable de las emisiones de CO_2 .

➤ **Sistema termodinámico:** Es una porción de espacio ó cantidad de materia que se selecciona para propósitos de análisis y en donde todo lo ajeno a dicho sistema se conoce como alrededores.

➤ **Sistema abierto:** Es aquel en el cual se permite a la masa cruzar los límites que se hayan seleccionado, al igual que la energía en forma de trabajo y calor. Ejemplo: Bomba de agua, Turbina de gas o vapor, compresor, etc.

➤ **Sistema cerrado:** En este sistema no hay intercambio de materia con los medios circundantes, es decir, la masa no atraviesa sus límites.

➤ **Estado:** El estado de un sistema, es el que queda identificado por el conjunto de valores que tienen las propiedades termodinámicas en un instante dado.

➤ **Calor:** Es la energía de transición debido a la diferencia de temperaturas entre el sistema y el medio ambiente. Esta forma de energía que se manifiesta por la presencia de un gradiente de temperatura (+ ó -), fluyendo ésta de mayor a menor temperatura. Dicha transmisión se realiza de tres formas que son: Conducción, Convección y Radiación. Definiéndose de la siguiente manera.

➤ **Conducción:** Se presenta generalmente en los sólidos opacos bajo un gradiente de temperatura, por la transferencia de energía cinética entre las moléculas adyacentes, sin que exista desplazamiento entre ellas. El fenómeno de transferencia se puede imaginar a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre las moléculas, en el que las partículas menos energéticas ganan energía al chocar con las que tienen mayor energía.

➤ **Convección:** Es la transferencia de calor entre las moléculas relativamente calientes o frías de un fluido por medio de mezcla, es decir, que es estrictamente un medio de mover energía de un lugar a otro (transporte de energía), debido a que un fluido en movimiento recoge energía de un cuerpo caliente y la entrega a un cuerpo más frío.

➤ **Radiación:** Se presenta cuando a un cuerpo sólido se le mantiene caliente y éste emite radiaciones que al ser recibidas por otro cuerpo le aumenta su temperatura.

➤ Eficiencia ($\eta = \%$): La eficiencia de un ciclo es la relación entre la entrega total deseada y la demanda requerida por la máquina.

$$\eta = W_T/Q_A \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$$W_T = \text{Trabajo total (Kg}_f\text{-m, lb}_f\text{-ft, joules).}$$

$$Q_A = \text{Flujo de calor (KJ/ Kg).}$$

De la primera ley de la termodinámica tenemos:

$$W = Q_A - Q_B \quad (\text{Ec. 1. 2})$$

$Q_B =$ Flujo de calor no aprovechado KJ/ Kg).

➤ **Trabajo:** Involucra siempre una cantidad de movimiento y se define como la fuerza capaz de desplazar un objeto a una distancia determinada, y se expresa como:

$$W = (F) (dX) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Considerándose positivo cuando el sistema sede o entrega trabajo. Ejemplo: Cuando el gas se expande aumenta el volumen y la presión disminuye.

Se considera negativo cuando el sistema recibe trabajo. Ejemplo: Cuando el gas se comprime, el volumen disminuye y la presión aumenta.

➤ **Entropía ($S =$ KJ/ Kg °K, kcal/ Kg):** La medida del desorden en un sistema se puede cuantificar (que es posible medir) mediante la entropía; dicho de otra manera un aumento en el desorden equivale a un aumento en la entropía.

➤ **Entalpía** ($H = \text{KJ/ Kg, cal/ Kg}$): La entalpía es la energía calorífica de un sistema termodinámico, cuya magnitud depende de los estados inicial y final del mismo. Se representa mediante la siguiente ecuación.

$$H = U + PV \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde:

P: Presión del sistema ($\text{N/m}^2, \text{bars, Kg}_f/\text{cm}^2, \text{lb}_f/\text{in}^2$).

V: Cambio de Volumen (ft^3, m^3).

U: Energía interna (cal/ Kg).

➤ **Presión** ($\text{N/m}^2, \text{bars, atm, Kg}_f/\text{cm}^2, \text{lb}_f/\text{in}^2$): Es una variable termodinámica que se define como. La magnitud de la fuerza normal por unidad de área.

$$P = F / A$$

Donde:

F: Fuerza ejercida por el sistema ($\text{Kg}_f, \text{Newton, Dinas, lb}_f$).

A: Área o superficie donde se aplica la fuerza ($\text{m}_2, \text{ft}_2, \text{in}_2$).

Como se sabe, la atmósfera ejerce presión sobre la superficie terrestre y esto implica que la presión se verá afectada por la altura, se ejercerá una mayor presión y viceversa. La presión atmosférica, generalmente recibe el nombre de presión Barométrica, debido a que el aparato para medir la presión del aire es un barómetro.

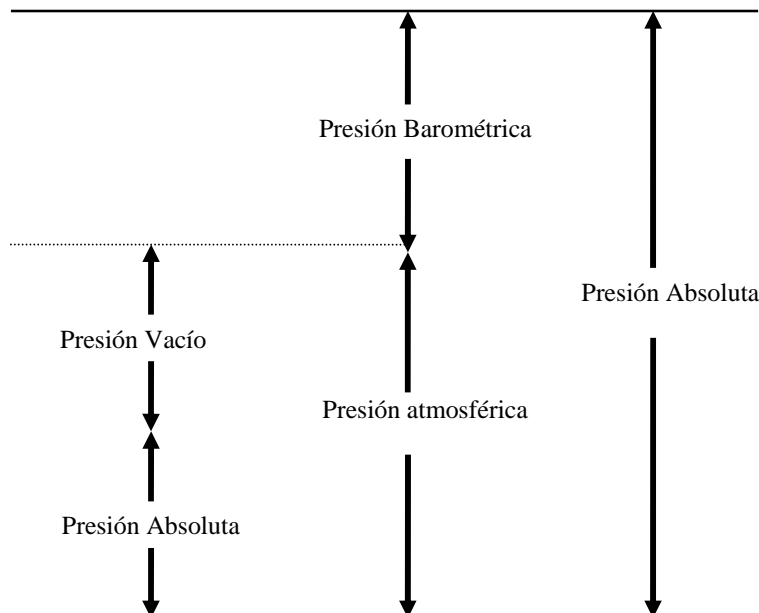


Figura 1.1 Relación entre las Presiones: Absoluta, Atmosférica, Manométrica y Vacío

Presión Absoluta: Es la presión verdadera o total en una posición cualquiera en un sistema y se expresa como.

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{bar}}$$

➤ **Proceso adiabático:** Se define como aquel en el que no se permite la salida ó entrada de calor de un sistema, es decir $Q = 0$.

En realidad no existen procesos adiabáticos ya que no existe un aislante perfecto del calor entre un sistema y su medio circundante, sin embargo, hay procesos casi adiabáticos, Ejemplo: Si se comprime (o expande) un gas con mucha rapidez, fluye muy poco calor hacia adentro(o hacia fuera) del sistema y por tanto el proceso es casi adiabático.

➤ **Máquina térmica:** Es un dispositivo que convierte la energía térmica en otras formas útiles de energía, como la mecánica y la eléctrica.

➤ **Ley cero de la termodinámica:** Si dos cuerpos A y B por separado están en equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí. Es decir, la temperatura es una medida de la energía cinética media de traslación de las moléculas, pero también puede decirse que la temperatura de un cuerpo es su estado térmico considerado con referencia a su poder de comunicar calor a otros cuerpos.

Siendo las dos escalas más usuales en termodinámica: la escala Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) para el SI, llamada absoluta; la escala Ranking ($^{\circ}\text{R}$) llamada también absoluta. Otras dos escalas de uso común son: la escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

➤ **Primera Ley de la termodinámica:** Establece que la energía no puede crearse ni destruirse, sino sólo se transforma.

➤ **Segunda Ley de la termodinámica:** (Kelvin – Planck), Es imposible construir una máquina térmica que operando continuamente, no produzca otro efecto que la extracción de calor desde un solo depósito y proporcione una entrega igual ó equivalente en trabajo.

➤ **Clausius:** Es imposible construir un aparato que operando continuamente, sólo produzca el efecto de transferir calor desde un cuerpo más frío hacia uno más caliente sin suministrarle trabajo.

Las propiedades termodinámicas son una característica que posee un sistema, las cuales se pueden observar directa o indirectamente y se clasifican en:

a) Propiedad extensiva: Es aquella cuyo valor es igual a la suma de sus valores en las partes del sistema. Ejemplo: pueden ser, la masa y el volumen.

b) Propiedad intensiva: Es la que no depende de la cantidad de materia en el sistema. Ejemplo: pueden ser, la densidad, el volumen específico, la presión y la temperatura.

➤ **Ley de Boyle:** Establece que; a temperatura constante, los volúmenes de una masa de gas son inversamente proporcionales a las presiones que soportan.

$$P_1V_1 = P_2V_2 = C \quad (\text{Ec. 1.5})$$

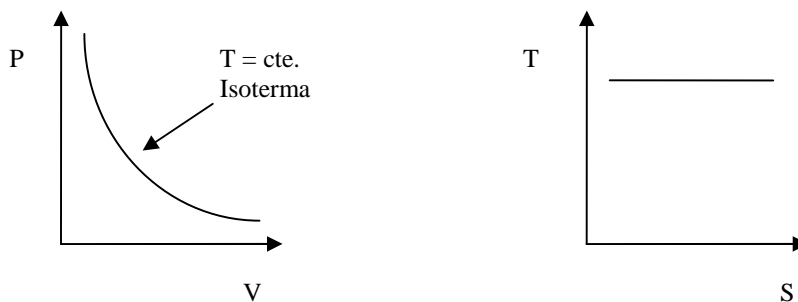


Figura 1.1.1 Comportamiento mostrado gráficamente mediante los diagramas P-V y T-S.

Los procesos a $T = \text{cte.}$ los constituyen básicamente las compresiones y las expansiones.

➤ **Ley de Charles:** Establece que las presiones ejercidas por un gas en las paredes del recipiente que lo contiene son proporcionales a sus temperaturas absolutas, si el volumen permanece constante, $V = \text{cte.}$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2 = C \quad (\text{Ec. 1.6})$$

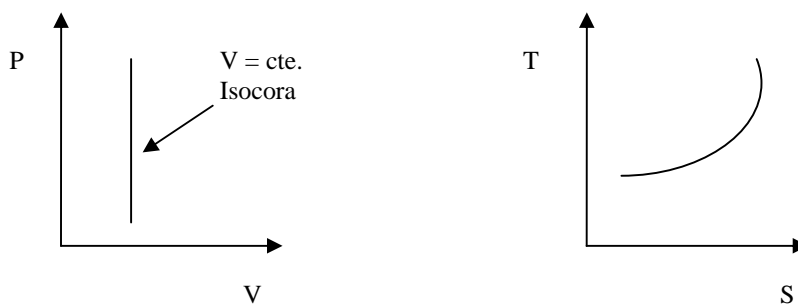


Figura 1.1.2 Comportamiento mostrado gráficamente mediante los diagramas P-V y T-S.

Los procesos a $V = \text{cte.}$ los constituyen los enfriamientos o calentamientos.

➤ **Ley de gay lussac:** Establece que a presión constante el volumen de una masa de gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 = C \quad (\text{Ec. 1.7})$$

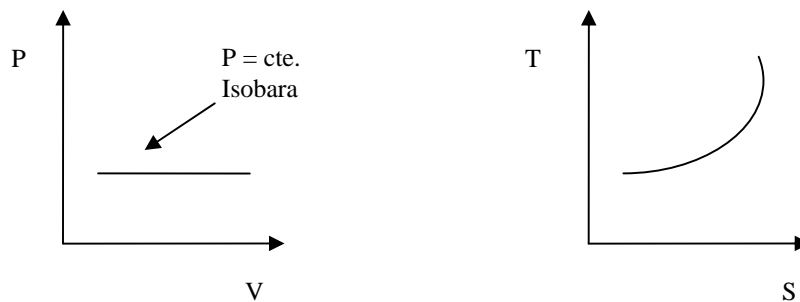


Figura 1.1.3 Comportamiento mostrado gráficamente mediante los diagramas P-V y T-S.

Los procesos a $P = \text{cte.}$ los constituyen también los enfriamientos y calentamientos.

➤ **Energía Potencial (E_P):** Es una propiedad del sistema, por lo que se considera el campo gravitacional como parte del sistema, es decir, que si un cuerpo se aleja del centro de la tierra o se acerca a él, la fuerza de la gravedad efectúa un trabajo, y se expresa como:

$$E_P = mgZ/g_c \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde:

g_c = Aceleración de la gravedad (ft/s^2 , m/s^2)

g = Aceleración local de la gravedad.

m = masa del cuerpo (lb, Kg.)

Z = Altura del sistema (ft, m)

➤ **Energía cinética (E_C):** Como se sabe, la masa de un sistema lleva cierta energía cinética, la cual es función de la rapidez global del sistema (v) respecto de sus alrededores e igual a:

$$E_C = (1/2) m (v^2/g_c) \quad (\text{Ec. 1.9})$$

➤ **Energía Interna (U):** Es la energía que posee el sistema aislado y que depende únicamente de su temperatura. La energía interna incorpora las formas microscópicas resultantes del movimiento molecular.

➤ **Energía total** (E_T): Contenida dentro de las fronteras de un sistema queda constituida por la suma de las energías; potencial (E_P), Cinética (E_C) e interna (U).

$$E_T = E_P + E_C + U \quad (\text{Ec. 1.10})$$

1.2. Obtención de Calor del Foco Frío y Caliente

Una bomba de calor es una máquina frigorífica capaz de suministrar calor a una fuente caliente a expensas de absorberlo de una fuente fría. Se va a estudiar cómo es posible extraer calor de dicha fuente fría, que está a temperatura ambiente ó muy próxima a ella. El frío se genera cuando existen elementos capaces de absorber el calor del medioambiente en el que se encuentran, de tal forma que se genere el calentamiento de los primeros y el enfriamiento del medio de donde se extrae el calor. Hablando ya del término calor, conviene aclarar el concepto de calor total de un cuerpo:

Calor total de un cuerpo (Q_T): Es el calor necesario para transformar el estado de un cuerpo desde una temperatura dada en su estado sólido hasta otra cierta temperatura en su estado de vapor; Integrándose por los siguientes conceptos:

- **Calor sensible de un sólido** (Q_S): Es el suministro de calor desde la temperatura del sólido hasta el punto de conversión a líquido (fusión).
- **Calor latente de fusión** (Q_{LF}): Es el incremento adicional de calor proporcionado a un cuerpo desde que inicia su cambio de estado (fusión) hasta que se convierte totalmente en líquido.
- **Calor sensible de líquido** (Q_{SL}): Cantidad de calor necesaria para pasar de la temperatura de fusión de éste hasta la temperatura de evaporación.
- **Calor latente de evaporación** (Q_{LV}): Una vez alcanzada la temperatura de saturación, este calor es el necesario para convertir todo el líquido en vapor.
- **Calor sensible de un vapor** (Q_{SV}). Sobrecalentamiento a temperatura X: es la cantidad de calor que hay que añadir al vapor para que éste alcance una temperatura X.

El calor sensible viene definido como:

$$Q_s = mC_e \Delta T \quad (\text{Ec. 1.2.1})$$

Siendo:

m : La masa del producto (Kg.)

C_e : Calor específico del elemento o cantidad de calor que es preciso comunicar a un **Kg.** de un elemento para que su temperatura aumente un grado °C. (kg.cal./kg. °C.).

ΔT : Diferencia de temperatura entre la temperatura actual de un cuerpo y la temperatura que se quiere obtener (°C.)

El calor latente es una variable que depende de la presión en la que se encuentra el elemento. Si aplicamos todos los sumandos a la fórmula.

$$Q_T : Q_S + Q_{LF} + Q_{SL} + Q_{LV} + Q_{SV} \quad (\text{Ec. 1.2.2})$$

Se sabe que se puede conseguir extraer calor de un foco frío gracias a la existencia de ciertos líquidos que son capaces de absorber gran cantidad de calor al vaporizarse, siempre a presiones determinadas y controladas. De esta forma, las ventajas de los refrigerantes líquidos con respecto a los sólidos (por ejemplo, hielo) son las siguientes:

- Se puede controlar la temperatura y presión de vaporización.
- Se puede controlar la refrigeración con gran facilidad.
- No se desaprovecha el líquido refrigerante, ya que se puede recoger y condensar repetidas veces, de tal forma que se produzca una fuente continua de vaporización.

Con esta última ventaja, se entra en el concepto de ciclo termodinámico, el cual, necesita obligatoriamente tres elementos:

1. **Foco frío**
2. **Foco caliente**
3. **Agente externo**

Y en forma esquemática se muestra en la figura 1.2.1

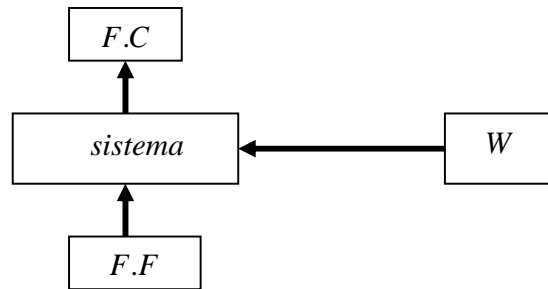


Fig. 1.2.1 Esquema clásico del ciclo frigorífico

$F.C$: Es el ambiente (a aclimatar)

$F.F$: Es la cámara frigorífica, o foco frío del que se extrae calor.

W : Trabajo aportado.

Obsérvese que se está definiendo ciclo frigorífico, en el cual se extrae calor de un foco frío a expensas de un consumo eléctrico y de aclimatar un lugar previamente definido. Una vez visto esto se definirán y analizarán los elementos necesarios para la obtención de un ciclo frigorífico. (Véase Fig. 1.2.2)

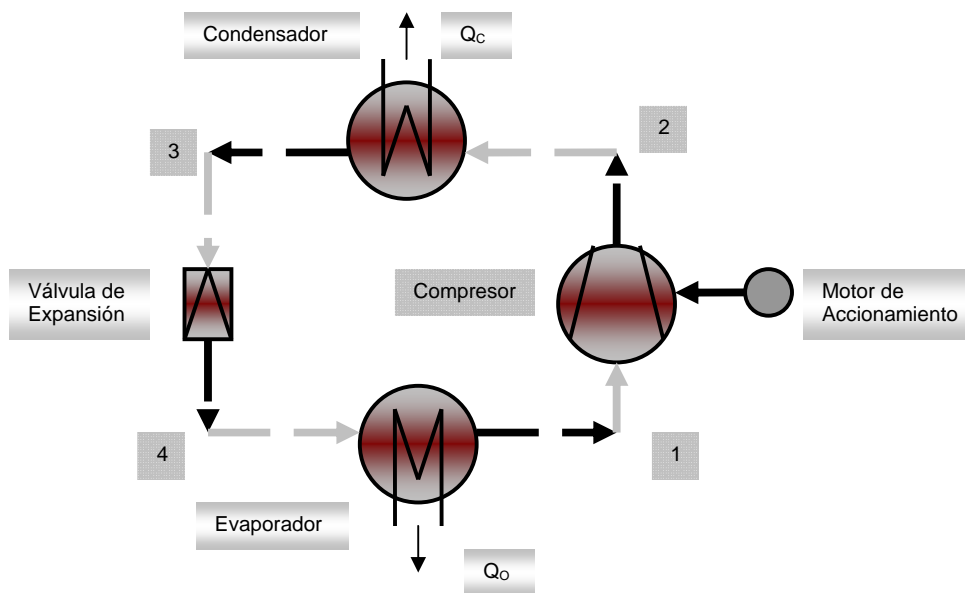


Fig. 1.2.2 Componentes del ciclo frigorífico bomba de calor

Tal y como se estableció anteriormente, la utilización del foco frío es para obtener el calor necesario para evaporar una sustancia comúnmente llamada refrigerante, obligándolo a realizar un ciclo para aclimatar un lugar previamente definido. El concepto de vaporización entra en consonancia con el concepto temperatura de saturación (temperatura de paso de líquido a vapor), la cual está íntimamente relacionada con la presión de saturación. Efectivamente, así como en la zona de líquido o vapor es necesario definir dos conceptos: presión y temperatura, para poder obtener todas las características termodinámicas de un elemento, en la transición líquido - vapor, con definir una variable la otra queda ya fija. La relación entre estas variables es que a menor presión de saturación, menor temperatura de saturación y menor temperatura de vaporización y, en consecuencia, se podrá obtener calor del foco frío aunque éste se encuentre a menor temperatura. Por tanto, se deben conseguir presiones de saturación aptas únicamente para producir una temperatura de vaporización menor que la temperatura del foco frío.

Volviendo al caso del agua, es lógica la imposibilidad de utilizarla como refrigerante debido a su alta temperatura de saturación; para vaporizar el agua a temperaturas bajas, harían falta presiones sumamente bajas, difíciles de obtener y mantener económicamente. Para ello, existen otros fluidos (frigoríficos) capaces de tener presiones de saturación técnicamente favorables y que impliquen una temperatura de saturación adecuada.

Si se toma el ejemplo del Freón 12; éste tiene a la presión atmosférica una temperatura de saturación de 30 °C aproximadamente. Si se introduce en el medio al cual se va a robar calor (foco frío) un recipiente de Freón 12 líquido con salida directa al exterior, a medida que va absorbiendo calor, éste se irá evaporando y escapando al exterior. De esta forma se ha enfriado el medio circundante al freón, pero lógicamente, por funcionalidad y economía no es permitido hacer esto. El vapor, como se ha dicho antes, hay que recuperarlo y regresarlo nuevamente al estado líquido mediante un condensador de forma que el ciclo quede cerrado. En el condensador se realiza la sustracción del calor al líquido refrigerante y el agente a utilizar debe ser de fácil obtención, como puede ser el aire o el agua.

Para que se produzca la transferencia de calor del elemento refrigerante al agua o aire, la temperatura del vapor debe ser superior a la temperatura del agua o aire. De esta forma se incorpora otro elemento a la instalación: el compresor, cuya misión es elevar la presión de vaporización a otra más alta, cuya temperatura sea superior a la del agente condensante.

Puesto que un vapor no puede enfriarse a una temperatura inferior a su temperatura de saturación, la pérdida continua de calor en el condensador provocará la condensación total a la nueva presión más alta y a una nueva temperatura de saturación. El líquido condensado, cuya temperatura y presión serán las mismas que el vapor que se condensa, fluirá del condensador al tanque de almacenamiento del líquido, estando dispuesto para ser recirculado al evaporador.

Como resumen, se puede decir que una máquina frigorífica genera un proceso que hace evolucionar cíclicamente un fluido, el cual fuerza un flujo de calor contrario al de la naturaleza desde los cuerpos fríos hacia los cuerpos calientes, gracias al trabajo que desde el exterior se realiza sobre dicho fluido, Cuando el fluido intercambia calor con los cuerpos fríos los enfría aún más, y cuando intercambia calor con los cuerpos calientes los calienta aún más. De aquí que una máquina frigorífica pueda utilizarse en una doble función: enfriar, en cuyo caso es una máquina frigorífica propiamente dicha, y calentar, en cuyo caso se denomina bomba de calor

Focos

La Bomba de Calor extrae energía de un medio; mediante el trabajo externo aportado, esta energía es cedida a otro medio. El medio del que se extrae la energía se llama foco frío y el medio al que se cede se llama foco caliente. A continuación se analizan algunos medios susceptibles de ser utilizados como focos fríos o calientes para Bombas de Calor. En el esquema de la figura 1.2.3 se presentan algunos focos entre los que se puede bombear calor.

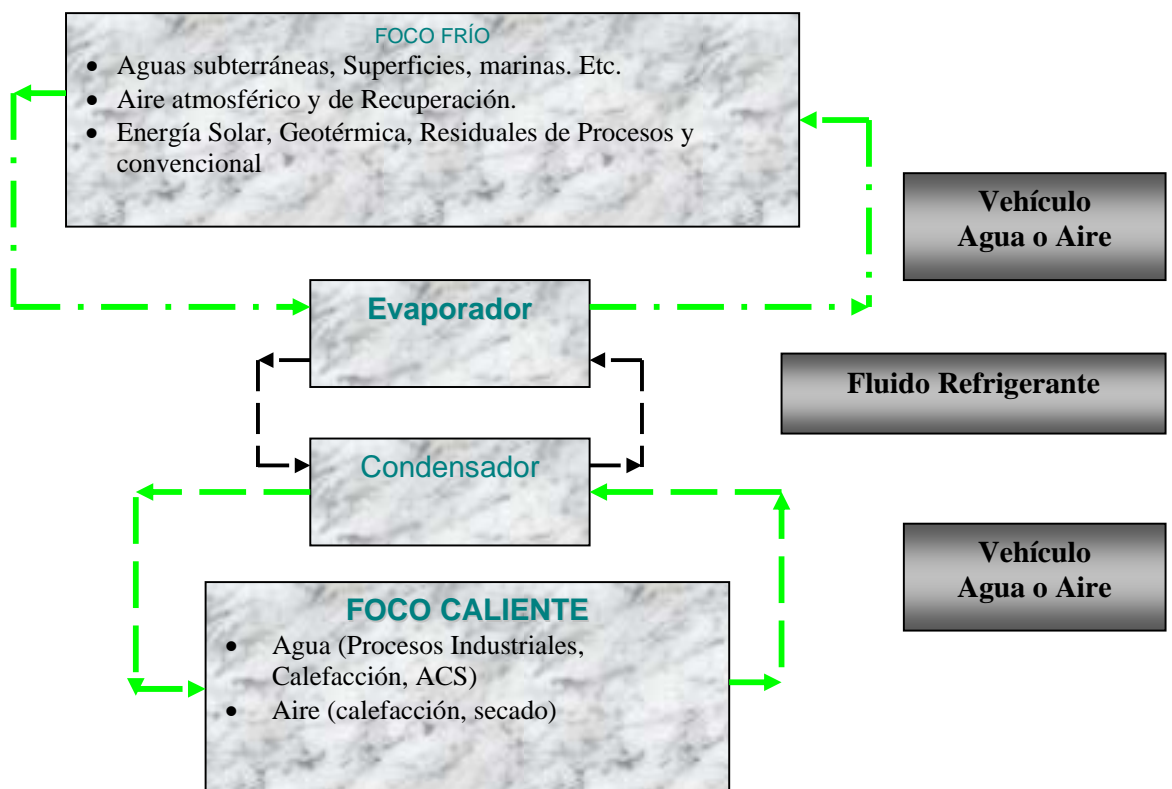


Figura 1.2.3 Elementos comúnmente empleados en la transportación de calor

FOCOS FRÍOS

Un foco frío ideal es aquel que tiene una temperatura elevada y estable a lo largo de la estación (en que se pretende calentar ó refrigerar), además que esté disponible en abundancia, no sea corrosivo o contaminante y tenga propiedades termodinámicas favorables, además, no requerir costos elevados de inversión o mantenimiento. En la tabla 1.2.4 se presentan las temperaturas de las fuentes de calor normalmente utilizadas:

Fuente de calor o foco frío	Rango de temperaturas (°C)
Aire ambiente	-10 a 15
Aire de extracción	15 a 25
Agua subterránea	4 a 10
Agua de lagos o ríos	0 a 10
Agua de mar	3 a 8
Suelos	0 a 5
Subsuelo	0 a 10
Aguas residuales y de procesos	> 10

Figura 1.2.4 Rangos de temperatura normalmente utilizados

Aire atmosférico

Su calefacción presenta problemas de formación de escarcha. A temperaturas menores de 5 °C., superior a ese margen es eficiente su funcionamiento.

Aire de calefacción

Esta es una fuente de calor común en edificios residenciales y comerciales. La Bomba de Calor recupera el calor del aire de calefacción y proporciona calefacción. Existen sistemas diseñados para trabajar con una calefacción de aire natural y de aire de calefacción en función de las necesidades.

Aguas naturales

Se pueden utilizar como focos fríos las aguas de ríos, lagos, aguas subterráneas o del mar. La eficiencia obtenida con estos focos es muy elevada y no presenta problemas de desescarche. La temperatura del agua del mar a cierta profundidad (25 a 50 m) es constante (5 a 8 °C) e independiente de cambios climáticos en el exterior, además la congelación no tiene lugar hasta -1 ó -2 °C. Cuando se utiliza agua del mar hay que prever problemas de corrosión y de proliferación de algas en la superficie del intercambiador.

Energía solar

Consiste en la captación de energía solar mediante paneles solares, en combinación con la Bomba de Calor.

Energía geotérmica del suelo y subsuelo

Estas bombas se suelen utilizar en climas fríos donde las temperaturas extremas no permiten el funcionamiento de bombas que utilicen como foco frío el aire exterior. Para aprovechar la energía del suelo es necesario un sistema de tuberías. Estas instalaciones tienen un costo elevado, y requieren una gran superficie de terreno.

Energías residuales y procedentes de procesos

Como foco frío se pueden utilizar efluentes industriales, aguas utilizadas para enfriar procesos de la industria o de los condensadores de producción de energía eléctrica, aguas residuales, etc. Son fuentes con una temperatura constante a lo largo del año. Los principales problemas para su utilización son: La distancia al usuario, la variabilidad del caudal y en el caso de aguas residuales la corrosión y obstrucción del evaporador como consecuencia de las sustancias contenidas en las mismas.

FOCOS CALIENTES

Aire

El calor obtenido del foco frío se cede al aire que pasa directamente a la habitación por la unidad interior o es forzado a través de un sistema de conductos.

Agua

Apropiados para la producción de agua para calefacción o agua caliente sanitaria y procesos industriales.

En la tabla 1.2.5 se presentan las temperaturas de distribución de agua y aire para las diferentes aplicaciones de calefacción:

Aplicación	Temperatura de distribución (°C)
<ul style="list-style-type: none"> Distribución de aire para calefacción 	30-50
Distribución de agua para calefacción: <ul style="list-style-type: none"> Calefacción a través del suelo Fan-coils Radiadores convencionales 	30-45 45-55 60-90
Calefacción de distrito: <ul style="list-style-type: none"> Agua caliente Agua caliente - vapor 	70-100 100-180

Figura 1.2.5 Temperaturas de Distribución

1.3. Ciclos Teóricos y Reales

Ciclos frigoríficos

Se entiende por ciclo aquel sistema en un estado inicial dado, que pasa por varios cambios o procesos y finalmente regresa a su estado inicial, el sistema ha realizado un ciclo. Por lo tanto, al concluir el ciclo todas las propiedades tienen el mismo valor que al principio. De una forma genérica, los ciclos frigoríficos pueden clasificarse de la siguiente manera.

Ciclo	Sustancia que evoluciona	Tipos
Teórico	Cualquiera	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Carnot ➤ Otros
Real	Fluidos Condensables	<ul style="list-style-type: none"> ➤ De Compresión ➤ De Absorción
	Gas no condensable	<ul style="list-style-type: none"> ➤ De Compresión

Ciclo Teórico

Se entiende por ciclo teórico aquel en el cual los estados por los que pasa un fluido se realizan idealmente (sin pérdidas de energía), entendiéndose que sería una máquina perfecta si se cumplieran las siguientes características:

- Los cambios térmicos entre el condensador y el medio exterior a calentar, y entre el evaporador y su medio exterior, se efectúan de forma reversible, lo que supone una diferencia de temperatura infinitamente pequeña y, por tanto, superficies de intercambio infinitamente grandes y un caudal de fluidos exteriores también infinitamente grandes.
- La circulación del fluido frigorífico se hace sin pérdida de carga.
- El compresor es isentrópico.

Generalmente el estudio de los ciclos termodinámicos se lleva a cabo suponiendo que se trata de un fluido perfecto, que funciona en una máquina igualmente perfecta.

El Ciclo Teórico de Carnot.

Un ciclo termodinámico se produce cuando un sistema experimenta dos o más procesos y vuelve a regresar a su estado original. La mayoría de las máquinas se analizan y se investigan por medio de ciclos. Todos los ciclos tienen un rasgo distintivo en común que es operar entre dos límites de temperaturas (alta y baja). Sadi Carnot (1796 – 1832) descubrió un ciclo de trabajo, conocido ahora como ciclo de Carnot. Aplicando la segunda ley de la termodinámica demostró que una máquina térmica que opere en este ciclo ideal reversible, entre dos depósitos de calor, sería la máquina más eficiente posible.

Una máquina ideal de este tipo establece un límite superior para los rendimientos de todas las máquinas. Es decir, el trabajo neto realizado por una sustancia de trabajo llevada a través del ciclo de Carnot es el máximo posible para una cantidad dada de calor que se suministre a la sustancia. Para describir el ciclo de Carnot, se supondrá que la sustancia de trabajo es un gas ideal contenido en un cilindro con un émbolo movable en uno de sus extremos, las paredes del cilindro y el émbolo son térmicamente no conductoras. A continuación se describe dicho ciclo en la figura 1.3.1.

1) El proceso de $a \rightarrow b$ es una expansión isotérmica a T_1 , el gas absorbe el calor Q_c del depósito a través de la base del cilindro y realiza el trabajo W_{ab} al elevar el émbolo.

2) En el proceso de $b \rightarrow c$ la base del cilindro se reemplaza por una pared térmicamente no conductora y el gas se expande adiabáticamente. Durante el proceso la temperatura cae de T_1 a T_2 y el gas realiza el trabajo W_{bc} al elevar el émbolo.

3) En el proceso de $c \rightarrow d$ el gas se coloca en contacto térmico con un depósito de calor a la temperatura T_2 y se comprime isotérmicamente. Durante este tiempo, el gas expulsa el calor Q_f hacia el depósito y el trabajo realizado sobre el gas por un agente externo es W_{cd} .

4) En el paso final $d \rightarrow a$ la base del cilindro se reemplaza por una pared no conductora y el gas se comprime adiabáticamente, la temperatura del gas aumenta hasta T_1 y el trabajo realizado sobre él por un agente externo es W_{da} .

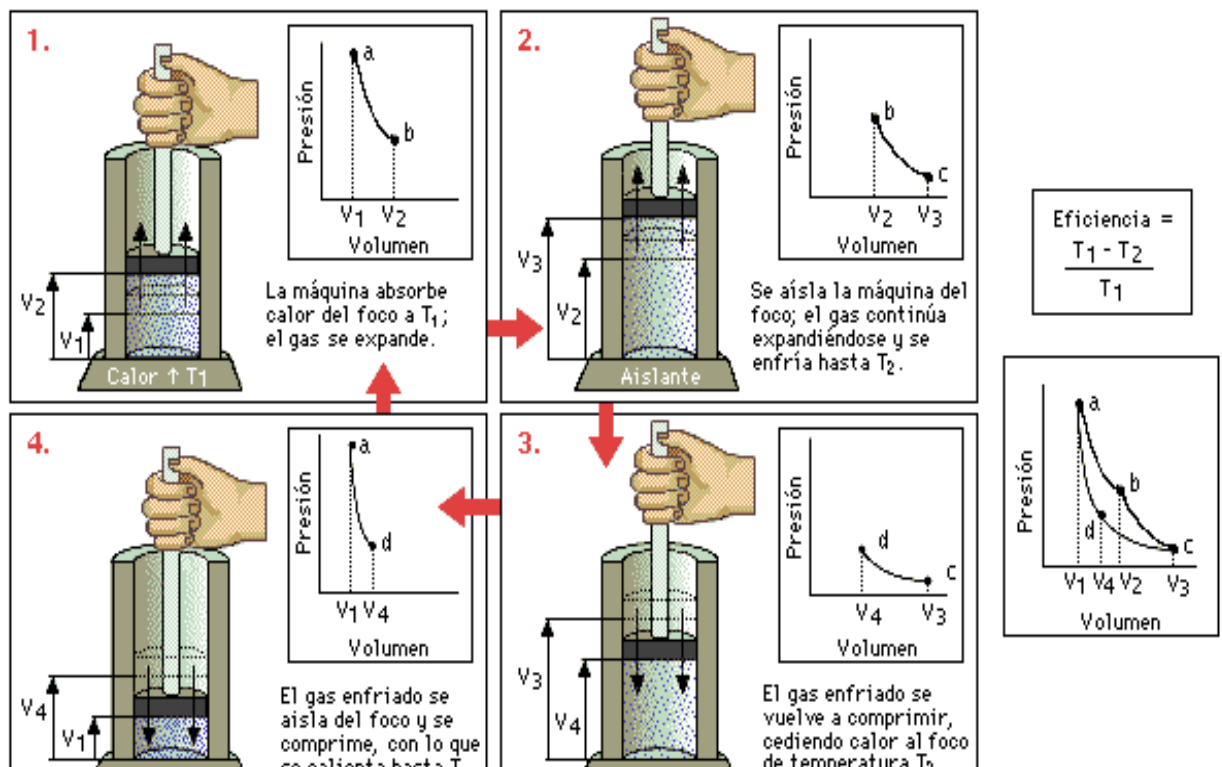


Figura 1.3.1 CICLO TEORICO DE CARNOT

En la figura 1.3.2 se muestra el diagrama temperatura \rightarrow entropía ($T \rightarrow S$), en donde el ciclo de Carnot queda representado por dos líneas horizontales isotérmicas (temperatura constante) y dos líneas verticales adiabáticas (sin transferencia de calor). Por lo tanto un ciclo de Carnot es un rectángulo.

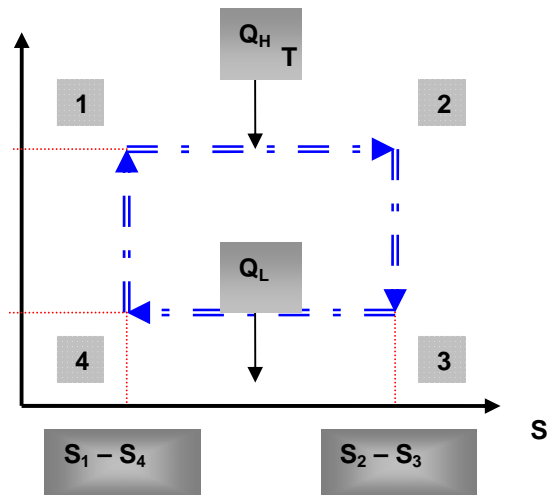


Fig.1.3.2. Ciclo de Carnot en un diagrama de temperatura, entropía

Representando el ciclo de Carnot para una bomba de calor en la figura 1.3.3 tenemos: Un ciclo térmico en el que el fluido toma calor designado por Q_2 del foco frío a temperatura constante T_2 ($^{\circ}K$), suministrando del exterior una cantidad de trabajo W . El paso de la temperatura T_2 a T_1 , y viceversa, se realiza reversible y adiabáticamente. Las representaciones en el diagrama $T - S$ y la convencional se indican en el diagrama antes mencionado.

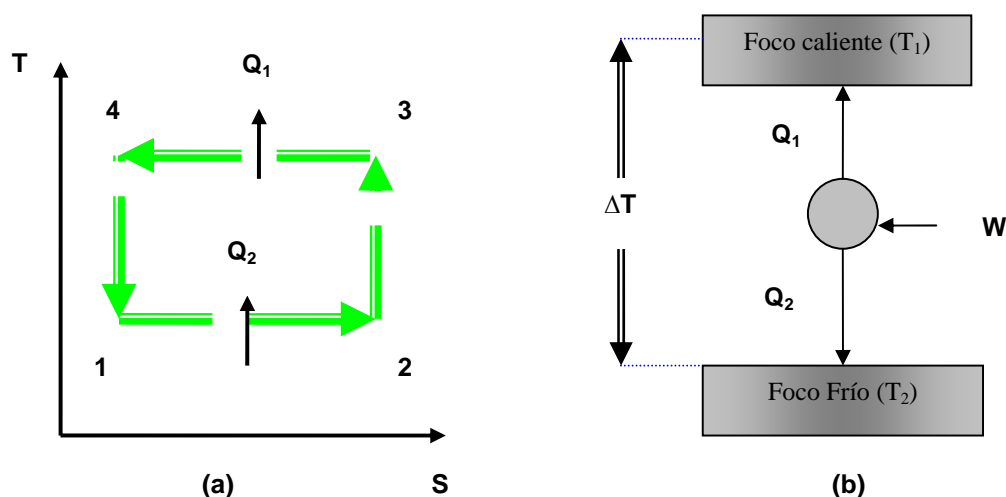


Figura 1.3.3. Ciclo de Carnot.

Proceso adiabático o isentrópico a $S = \text{cte.}$ este estado comprende las expansiones y compresiones de un sistema sin pérdidas de energía por fricción o transferencia de calor.

En el ciclo teórico de Carnot Frigorífico se define la eficacia (COP: Coeficiente de operación) como el cociente entre el efecto perseguido y el trabajo empleado para conseguirlo. Por tanto, se puede hablar de dos valores COP:

$$(\text{COP})_f : \text{Eficacia como frigorífico.} \quad = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$(\text{COP})_{bc} : \text{Eficacia como bomba de calor.} \quad = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

$$\text{Recordando que;} \quad Q_1 = Q_2 + W$$

$$\text{Es decir:} \quad \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_2}{W} + 1$$

$$\text{Resulta:} \quad (\text{COP})_{bc} = (\text{COP})_f + 1$$

En el ciclo de Carnot, los calores intercambiados son proporcionales a las temperaturas absolutas de los focos, luego:

$$(\text{COP})_f = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$(\text{COP})_{bc} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Lo que define al ciclo teórico, es que los procesos son reversibles, para lo cual no debe haber rozamientos mecánicos y además entre foco y fluido que evoluciona no debe haber diferencias finitas de temperatura, presión ni potencial químico. Es decir, foco y fluido han de estar en cada instante a la misma presión, temperatura y potencial químico, salvo diferencias infinitesimales.

Puesto que tales condiciones no son realizables, el estudio del ciclo teórico solo sirve como referencia. Evidentemente, el ciclo completo de la máquina es irreversible, pues la expansión lo es; la reversibilidad completa del ciclo, implicaría que la expansión se realizaría en una turbina isoentrópica, recogiendo el correspondiente trabajo mecánico.

Ciclos Reales

Dado que en los procesos reales no se cumplen los supuestos de conservación de energía de los ciclos teóricos, hay que hablar de su eficiencia en forma diferente que en éstos últimos. A continuación se van a definir varios valores del COP.

a) COP real

Se define del efecto buscado, como se ha definido anteriormente.

$$(\text{COP real})_f = \frac{Q_2}{W}$$

$$(\text{COP real})_{bc} = \frac{Q_1}{W}$$

Donde: Q1 y Q2 son los valores absolutos de los calores cedido y quitado a los focos caliente y frío, respectivamente.

b) COP Teórico

Es el que tendría la máquina si evolucionase según un ciclo perfecto de Carnot. Por tanto, según lo visto anteriormente, al existir proporcionalidad entre calores y temperaturas se tiene:

$$(\text{COP teórico})_f = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$(\text{COP teórico})_{bc} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$(\text{COP teórico})_{bc} = (\text{COP teórico})_f + 1$$

c) COP Práctico.

El COP teórico es una aproximación científica e implica que el fluido que evoluciona y las fuentes de calor, tendrían durante el intercambio, la misma temperatura, salvo diferencias infinitesimales. Esto no es posible, en realidad el fluido al quitar calor a la fuente fría está a temperatura más baja que la fuente fría ($T_{F2} < T_2$), y para ceder calor al medio que interesa calentar éste se deberá encontrar a una temperatura mayor que la fuente caliente ($T_{F1} > T_1$). Además el paso del fluido desde la fuente caliente a la fría y viceversa no se realiza en condiciones isentrópicas, siendo los procesos irreversibles y no perfectamente adiabáticos. En consecuencia, hay que realizar dos cambios en el COP teórico: modificación de temperatura y afectación por falta de condiciones ideales (α).

Luego:
$$(\text{COP práctico})_f = \frac{T_{F2}}{T_{F1} - T_2}$$

$$(\text{COP práctico})_{bc} = \alpha \frac{T_{F2}}{T_{F1} - T_{F2}} \quad (\text{véase Fig. 1.3.5})$$

$$(\text{COP práctico})_{bc} = (\text{COP práctico})_f + \alpha$$

Este coeficiente α varía desde 0.4 en máquinas pequeñas hasta 0.65 en las de gran potencia. Se estima como valor medio aceptable $\alpha = 0.5$; El COP práctico es la forma empírica de calcular el COP real.

d) COP Global.

Se define COP global de energía primaria como aquel que incluye o engloba los distintos rendimientos y el COP práctico.

$$(\text{COP global})_f = E_1 E_2 \alpha \frac{T_{F2}}{T_{F1} - T_{F2}}$$

$$(\text{COP global})_{bc} = E_1 E_2 \alpha \frac{T_{F1}}{T_{F1} - T_{F2}}$$

$$(\text{COP global})_{bc} = (\text{COP global})_f + E_1 E_2 \alpha$$

Donde:

E_1 : Rendimiento del motor eléctrico que acciona el compresor.

E_2 : Rendimiento en la transformación de energía primaria en eléctrica y en la distribución de la energía eléctrica (aproximadamente igual a 0.35).

En la Figura 1.3.4 se refleja el balance energético a modo de diagrama Sankey para aclarar los conceptos antes definidos.

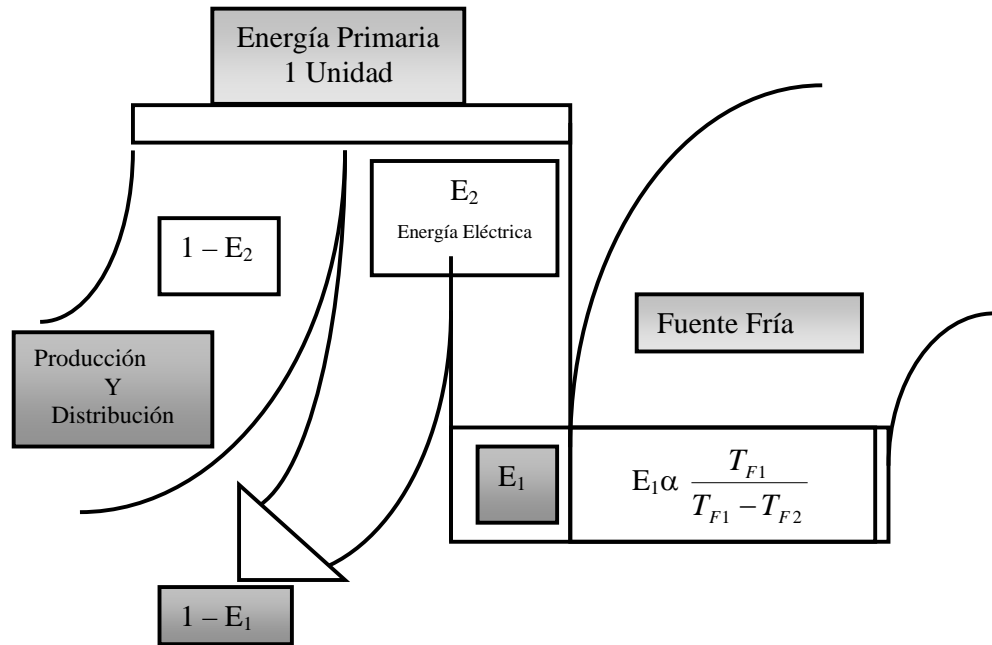


Figura 1.3.4 Diagrama de Sankey Balance Energético Teórico

$$(\text{COP práctico}) \text{ Bomba de calor} = \frac{E_1 \alpha \frac{T_{F1}}{T_{F1} - T_{F2}}}{E_1} = \alpha \frac{T_{F1}}{T_{F1} - T_{F2}}$$

$$(\text{COP global}) \text{ Bomba de calor} = E_2 E_1 \alpha \frac{T_{F1}}{T_{F1} - T_{F2}}$$

e) COP Medio Estacional

Las condiciones de la fuente fría y de la fuente caliente van variando a lo largo del tiempo; en consecuencia, las temperaturas del fluido al intercambiar calor con las fuentes también varían. Asimismo, puede que sea preciso aportar al sistema otras energías adicionales a las del compresor.

Luego:

$$(\text{COP medio estacional})_f = \frac{Q_2}{W + W'}$$

$$\text{COP medio estacional})_{bc} = \frac{Q_1}{W + W'}$$

Donde:

Q_1 : Calor total cedido en su misión de calentar en el periodo considerado, en valor absoluto.

Q_2 : Calor absorbido en su misión de enfriar en el periodo considerado, en valor absoluto.

W : Trabajo realizado por el compresor sobre el fluido en el periodo considerado, en valor absoluto.

W' : Resto de energía consumidas en el periodo considerado (incluirla pérdidas en el motor eléctrico, aportaciones extras de calor, etc.).

Pérdida de Carga

La circulación del fluido frigorífico en las tuberías e intercambiadores, origina pérdidas de carga que se traducen en:

- La presión de descarga del compresor es superior a la presión media de condensación del fluido frigorífico.
- La presión de aspiración del compresor es inferior a la presión media de evaporación.

La compresión no es Isentrópica

Conviene precisar que en una bomba de calor es importante recuperar las pérdidas térmicas del compresor, proceso que puede hacerse de varias maneras.

- Circulando agua de refrigeración (en grandes compresores), el agua del condensador circula después por el compresor.
- Situando al compresor en la corriente de aire del condensador.
- Recuperar el calor en el condensador (evitando que el compresor se enfríe).

Evolución Real

1.- COMPRESIÓN, refiérase a la figura 1.3.5

- Si el compresor esta mal refrigerado, la temperatura será la 2_3
- Si el compresor esta bien refrigerado, la temperatura será la 2_1
- Si el calor producido por las imperfecciones es igual al calor extraído, el punto será el 2_3

También el tipo de compresor afecta a la temperatura de descarga:

- Con compresor hermético, el punto estará en 2_3 puesto que este tipo se refrigera mal debido a la envolvente.

En cierto sentido es una ventaja, pues todo el calor de las pérdidas del compresor y del motor, se recogen en el condensador.

Herméticos: El motor y el compresor, además de compartir el eje, se alojan en la misma envolvente, con lo que la recuperación del calor generada en el motor es mayor. En las Bombas de Calor eléctricas se utilizan compresores herméticos para potencias inferiores a 60 ó 70 KW, para potencias superiores (normalmente Bombas de Calor aire-agua) se utilizan compresores semiherméticos. Únicamente se utilizan compresores abiertos en aplicaciones aisladas y nunca en equipos de serie.

- En el caso del compresor semihermético, la refrigeración de los cilindros al medio ambiente es más fácil, Ubicando la descarga estará entre 2_1 y 2_2 sólo parte de las pérdidas del motor son transmitidas al condensador.

Semiherméticos: El compresor y el motor comparten el eje. Parte del calor generado en el motor se recupera en el fluido refrigerante, con lo que el rendimiento es superior al de los abiertos.

- Si el compresor es abierto, la descarga será en 2_1 ó 2_3 , si la culata está refrigerada.

Las pérdidas del motor no se transmiten al condensador.

Abiertos: El motor y el compresor son independientes. Los ejes se acoplan en el montaje asegurándose la estanqueidad en el paso del eje.

2.- CONDENSACIÓN

De 2_1 , 2_2 ó 2_3 a 4, el gas se refrigera, se condensa y se subenfria. Normalmente, la temperatura de subenfriamiento es algunos grados menor que la de condensación.

- Es conveniente no perder calor en la tubería de descarga.
- En la figura 1.3.5 se ha representado la pérdida de carga desde la descarga del compresor hasta la salida del condensador, que es:

$$\Delta p_k + \Delta p_d$$

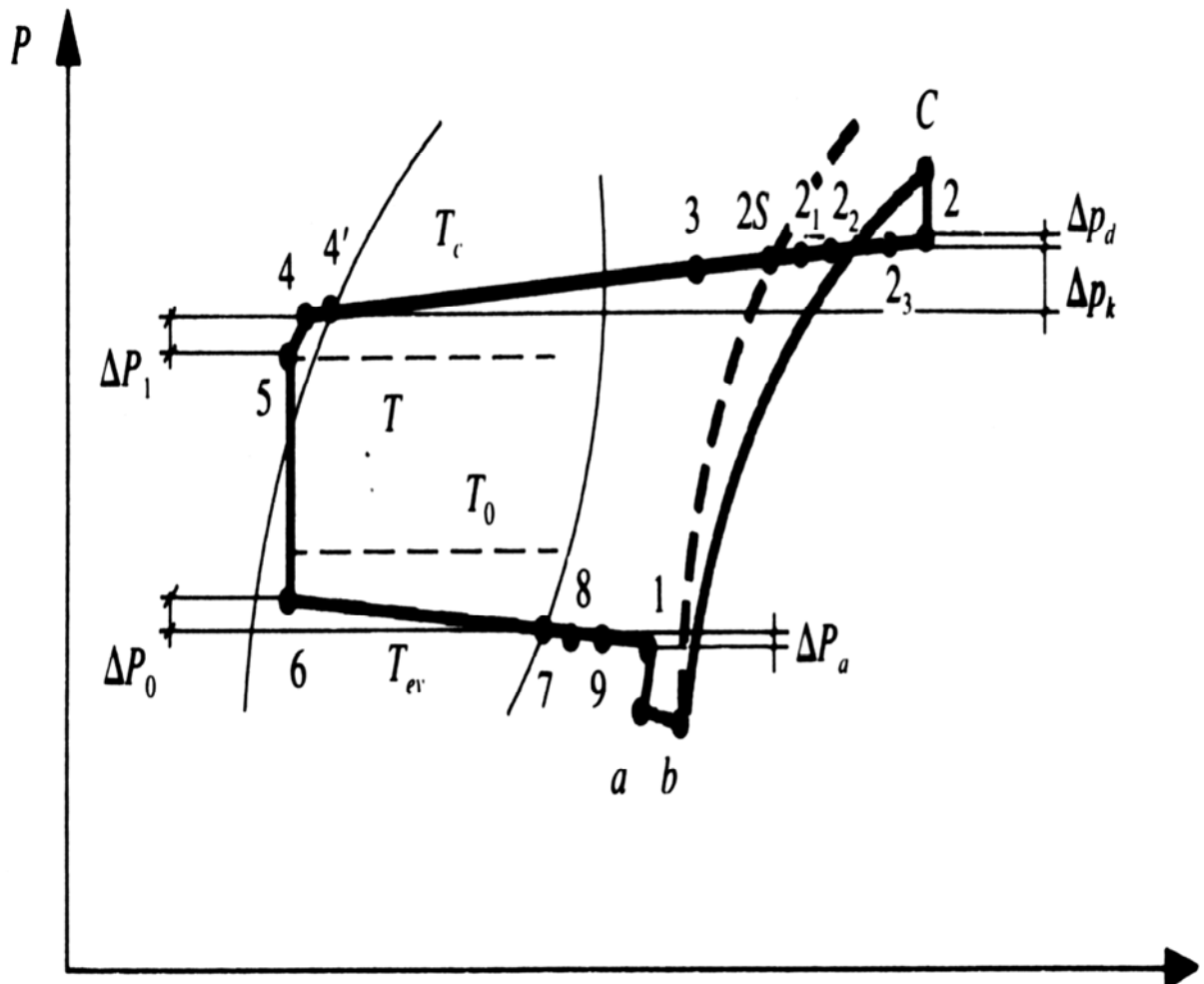


Figura 1.3.5 Ciclo Real Diagrama Entálpico

Donde:

- T_c ; Temperatura de entrada del medio que baña el condensador
- T_e ; Temperatura de entrada del medio que baña el evaporador.
- 1-a; Pérdida de carga en la válvula de aspiración del compresor.
- a-b; Calentamiento debido a la transmisión de calor desde el cilindro.
- b-c; La compresión real no es isentrópica.
- c-2; Pérdida de carga en la válvula de escape del compresor
- 1-2s; Evolución en una compresión isentrópica.
- 1-2; Evolución en una compresión real.
- 2-3; Enfriamiento y pérdida de carga en tuberías de descarga.
- 3-4; Evolución en el condensador con su pérdida de carga.
- 4'-4; Posible subenfriamiento en el condensador.
- 4-5; Transferencia de calor y pérdida de carga en tuberías más la variación de presión por diferencia de cotas.
- 5-6; Expansión isoentálpica en la válvula
- 6-8; Evolución en el evaporador y pérdida de carga y recalentamiento útil.
- 7-8; Recalentamiento útil en el evaporador.
- 8-9; Recalentamiento útil en la línea de aspiración.
- 9-1; Recalentamiento no útil en la línea de aspiración.
- ΔP_k ; Pérdida de carga en el condensador.
- ΔP_o ; Pérdida de carga en el Evaporador.
- ΔP_a ; Pérdida de carga en tuberías de aspiración
- ΔP_d ; Pérdida de carga en tuberías de descarga.
- ΔP_i ; Pérdida de carga en tuberías de líquido.

3.- EXPANSIÓN

De 5 a 6, el fluido se expande a entalpía constante.

4.- EVAPORACIÓN

De 6 a 1, el fluido se evapora y se recalienta en el evaporador y en las tuberías de evaporación. El recalentamiento en la tubería de aspiración es también benéfico, pues es calor que luego se cederá en el condensador.

CAPÍTULO II CONCEPTUALIZACIÓN DE LA BOMBA POR SU NATURALEZA.

2.1. Clasificación de las Bombas de Calor

Las bombas de calor se pueden clasificar de distintas maneras:

- **Según el Tipo de Proceso:**

- Bombas de Calor, cuyo compresor está impulsado mecánicamente por un motor eléctrico de gas, diesel, o de otro tipo.
- Bombas de Calor de accionamiento térmico (Bombas de Calor de absorción), en las que el ciclo se impulsa mediante calor a temperaturas elevadas.
- Bombas de Calor electrotérmicas, que funcionan según el efecto Peltier.

- **Según el medio de origen y destino de la energía**

Esta clasificación es la más utilizada. La Bomba de Calor se denomina mediante dos palabras. La primera corresponde al medio del que absorbe el calor (foco frío) y la segunda al medio receptor (foco caliente). Este cuadro en un principio puede parecer un poco complicado pero lo explico más abajo.

	Medio del que extrae la energía	Medio al que se cede la energía
Según medio de origen y de destino de la energía	AIRE	AIRE
	AIRE	AGUA
	AGUA	AIRE
	AGUA	AGUA
	TIERRA	AIRE
	TIERRA	AGUA

- Las bombas de calor aire-aire: son las que más se usan, sobre todo en climatización.
- Bombas de calor aire-agua: se utilizan para producir agua fría para refrigeración o agua caliente para calefacción y agua sanitaria.
- Bombas de calor agua-aire: Permiten aprovechar la energía contenida en el agua de los ríos, mares, aguas residuales, etc. Producen unos rendimientos energéticos mejores que las que utilizan aire exterior.
- Bombas de calor agua-agua: son bastante parecidas a las anteriores.

- Bombas de calor tierra-aire y tierra-agua: Aprovechan el calor contenido en el terreno. Son instalaciones muy raras, por su costo y la gran superficie de terreno requerido.

○ **Según su construcción**

- Compacta: Todos los elementos que constituyen la Bomba de Calor se encuentran alojados dentro de una misma carcasa.

-Split o partidas: Están constituidas por dos unidades separadas. Una exterior donde se aloja el compresor y la válvula de expansión y una unidad interior. De esta manera se evitan los ruidos en el interior local.

-Multi-split: Están constituidas por una unidad exterior y varias unidades interiores.

○ **Según funcionamiento**

-Reversibles: Pueden funcionar tanto en ciclo de calefacción como en ciclo de refrigeración invirtiendo el sentido de flujo del fluido.

-No reversibles: Únicamente funcionan en ciclo de calefacción.

-Termofrigobombas: Producen simultáneamente frío y calor.

Funcionamiento de una bomba de calor

Bomba de Calor de Compresión Mecánica

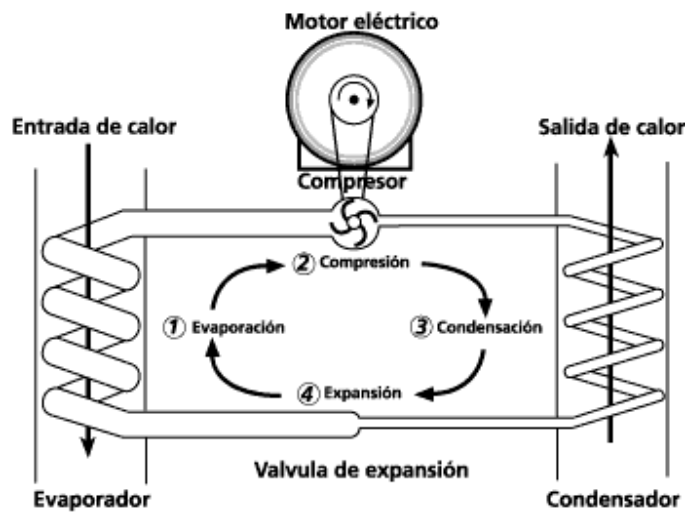
La mayor parte de las Bombas de Calor existentes trabajan con el ciclo de compresión de un fluido condensable.

Sus principales componentes son:

- Compresor
- Válvula de expansión
- Condensador
- Evaporador

Los componentes se conectan en un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante.

BOMBA DE CALOR DE COMPRESIÓN MECÁNICA ACCIONADA POR MOTOR ELÉCTRICO



Etapas del ciclo

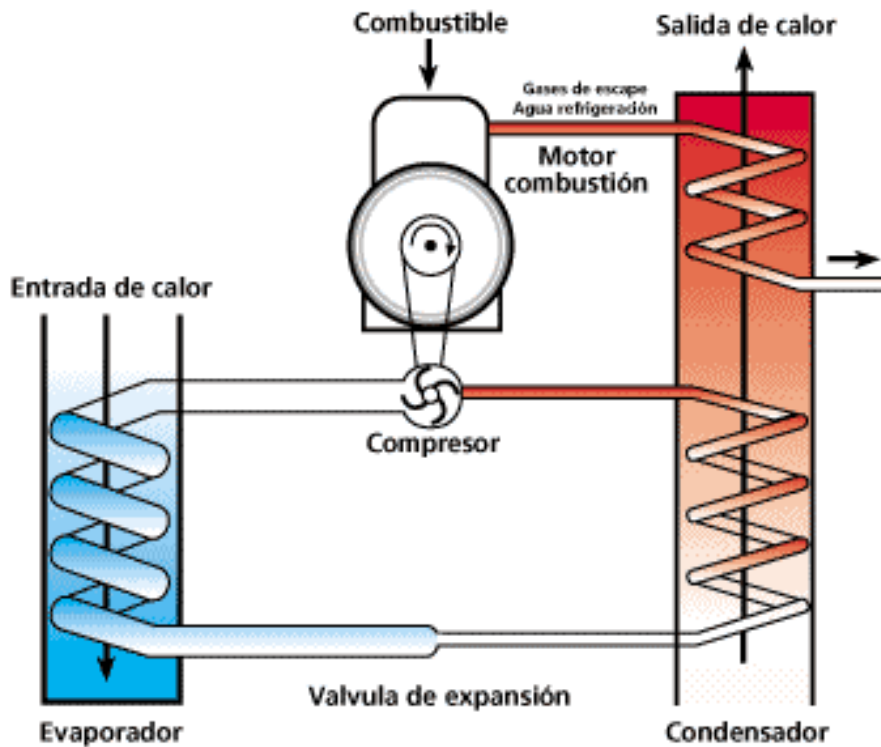
1. En el evaporador la temperatura del fluido refrigerante se mantiene por debajo de la temperatura de la fuente de calor (foco frío), de esta manera el calor fluye de la fuente al fluido refrigerante propiciando la evaporación de éste.
2. En el compresor el vapor que sale del evaporador es comprimido elevando su presión y temperatura.
3. El vapor caliente accede al condensador. En este cambiador, el fluido cede el calor de condensación al medio.
4. Finalmente, el líquido a alta presión obtenido a la salida del condensador se expande mediante la válvula de expansión hasta alcanzar la presión y temperatura del evaporador. En este punto, el fluido comienza de nuevo el ciclo accediendo al evaporador.

El compresor puede ser accionado por un motor eléctrico o por un motor térmico.

- Bombas de calor eléctricas: En este tipo de bombas el compresor es accionado por un motor eléctrico (como la imagen del dibujo anterior).

- Bomba de calor con motor térmico: El compresor es accionado mediante un motor de combustión, alimentado con gas o con un combustible líquido. Las más extendidas son las Bombas de Calor con motor de gas (como el dibujo siguiente).

BOMBA DE CALOR CON MOTOR DE GAS



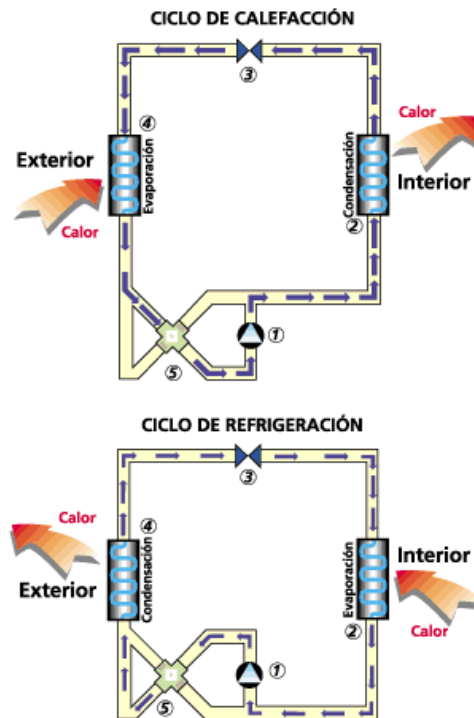
Ciertos tipos de Bombas de Calor (reversibles) son capaces de proporcionar calefacción y refrigeración. Las Bombas de Calor reversibles incorporan una válvula de 4 vías que permite la inversión de circulación del fluido frigorífico. De esta forma se consigue:

Que se bombee calor del exterior hacia el interior en el ciclo de calefacción.
Que se bombee calor del interior hacia el exterior en el ciclo de refrigeración.

En el siguiente dibujo se esquematizan los ciclos de calefacción y refrigeración.

El funcionamiento de una Bomba de Calor reversible es el siguiente:

CICLOS DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN



1. Compresor
2. Intercambiador (condensador o evaporador según ciclo)
3. Válvula de expansión
4. Intercambiador (condensador o evaporador según ciclo)
5. Válvula de 4 vías

Ciclo de calefacción:

- El compresor eleva la presión y temperatura del fluido frigorífico. (1)
- En el intercambiador, situado en el interior del recinto a calentar, el fluido cede al aire del recinto el calor de su condensación. (2)
- El fluido en estado líquido y a alta presión y temperatura se expande en la válvula de expansión reduciendo su presión y temperatura, evaporándose en parte. (3)
- En el intercambiador situado en el exterior el fluido refrigerante completa su evaporación absorbiendo calor del aire exterior, retornando al compresor (1) a través de una válvula de cuatro vías. (5)

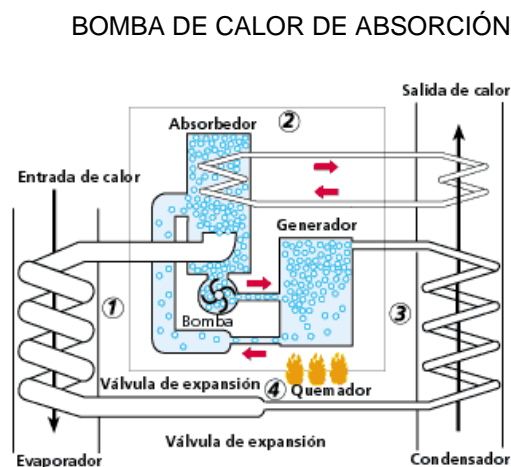
Ciclo de refrigeración:

- El compresor eleva la presión y temperatura del fluido frigorífico (1), siguiendo su camino a través de la válvula de 4 vías. (5)
- En el intercambiador, situado en el exterior, el fluido se condensa cediendo su calor al medio exterior. (4)
- El fluido en estado líquido y alta presión se expande en la válvula de expansión reduciendo su presión y evaporándose en parte. (3)
- En el intercambiador (2), situado en el interior del recinto a refrigerar, el fluido frigorífico completa su evaporación absorbiendo calor del medio interior.

Bomba de Calor de Absorción

Las Bombas de Calor de absorción son accionadas térmicamente, esto quiere decir que la energía aportada al ciclo es térmica en vez de mecánica, como en el caso del ciclo de compresión. El sistema de absorción se basa en la capacidad de ciertas sales y líquidos de absorber fluido refrigerante.

Las parejas de fluidos más utilizadas actualmente son: agua como fluido refrigerante en combinación con bromuro de litio como absorbente, o bien el amoníaco como refrigerante utilizando agua como absorbente.



Los ciclos de absorción son análogos a los de compresión, únicamente se sustituye el compresor por un circuito de disoluciones que realiza la misma función que éste, es decir, eleva la presión y temperatura del fluido frigorífico en estado de vapor. El circuito de disoluciones, denominado 2 en el dibujo, consiste en un absorbedor, una bomba que impulsa la disolución, un generador y una válvula de expansión.

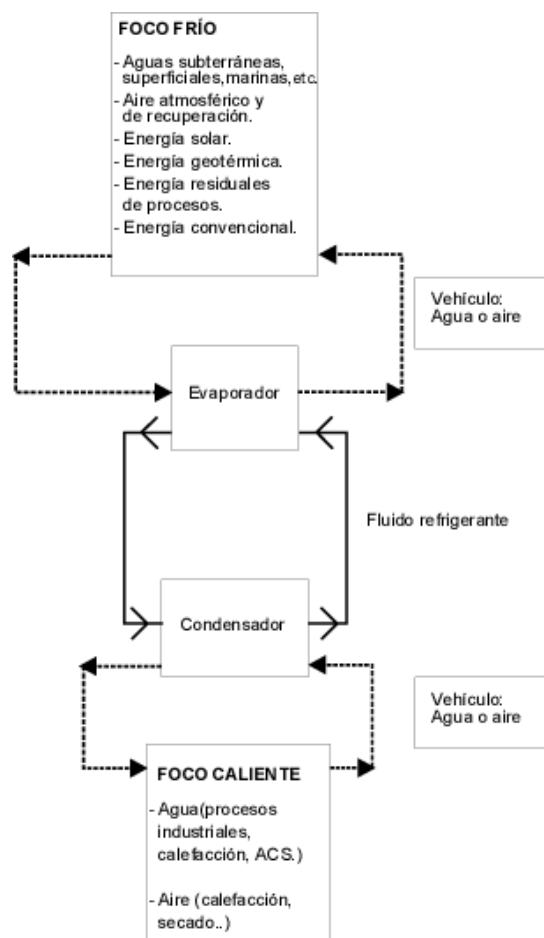
Se obtiene energía térmica a media temperatura en el condensador y en el absorbedor. En el generador se consume energía térmica a alta temperatura, y en la bomba, energía mecánica.

2.2. Clasificación De Acuerdo a la Fuente

Focos de la Bomba de Calor

La Bomba de Calor extrae energía de un medio. Mediante el trabajo externo aportado, esta energía es cedida a otro. El medio del que se extrae la energía se llama foco frío y el medio al que se cede, se llama foco caliente.

En el esquema siguiente se presentan algunos focos entre los que se puede bombear calor.



Focos Fríos

Un foco frío ideal es aquel que tiene una temperatura elevada y estable a lo largo de la estación en que es necesario calentar, está disponible en abundancia, no es corrosivo o contaminante, tiene propiedades termodinámicas favorables, y no requiere costos elevados de inversión o mantenimiento.

Aire atmosférico

Su utilización presenta problemas de formación de escarcha. Este problema se resuelve invirtiendo el ciclo durante pequeños periodos, lo que supone un gasto adicional de energía. Para temperaturas por encima de 5°C no es necesario el desescarche.

Aire de extracción

Ésta es una fuente de calor común en edificios residenciales y comerciales. La Bomba de Calor recupera el calor del aire de ventilación y proporciona calefacción. Existen sistemas diseñados para trabajar con una combinación de aire natural y de aire de extracción.

Aguas naturales

Se pueden utilizar como focos fríos las aguas de ríos, lagos, aguas subterráneas o del mar. La eficiencia obtenida con este foco es muy elevada y no presenta problemas de desescarche. La temperatura del agua del mar a cierta profundidad (25-50 m) es constante (5/8°C) e independiente de cambios climáticos en el exterior; además, la congelación no tiene lugar hasta -1 ó -2°C. Cuando se utiliza agua del mar, hay que prever problemas de corrosión y de proliferación de algas.

Energía solar

Consiste en la captación de energía solar mediante paneles solares, en combinación con la Bomba de Calor.

Energía geotérmica del suelo y subsuelo

Estas bombas se suelen utilizar en climas fríos donde las temperaturas extremas no permiten el funcionamiento de bombas que utilicen como foco frío el aire exterior. Para aprovechar la energía del suelo es necesario un sistema de tuberías. Estas instalaciones tienen un costo elevado y requieren una gran superficie de terreno.

Energías residuales y procedentes de procesos

Como foco frío se pueden utilizar efluentes industriales, aguas utilizadas para enfriar procesos de la industria o de los condensadores de producción de energía eléctrica, aguas residuales, etc. Son fuentes con una temperatura constante a lo largo del año. Los principales problemas para su utilización son la corrosión y obstrucción del evaporador como consecuencia de las sustancias contenidas en las mismas.

Focos calientes**Aire**

El calor obtenido del foco frío se cede al aire que pasa directamente a la habitación o es forzado a través de un sistema de conductos.

Agua

Apropiados para la producción de agua para calefacción o agua caliente sanitaria y procesos industriales. A través de un sistema de tuberías se distribuye a radiadores especialmente diseñados, a sistemas de suelo radiante o a fan-coils.

Por la Naturaleza de las Fuentes Fría y Caliente

Tomando en cuenta la fuente fría y caliente se puede hacer una primera clasificación de la bomba de calor.

La fuente fría puede ser:

Aire: puede ser aire exterior, extraído de un local calefactado, o aire cargado de humedad.

Agua: Aguas naturales o caliente procedente de algún proceso industrial.

Suelo: El calor se extrae mediante un circuito de agua glicolada.

La fuente caliente.

- Aire: aire precalentado para algún proceso industrial.
- Agua: Agua caliente para un proceso, o bien, agua de circuito calefactado.

La combinación de la fuente fría y caliente, dos a dos permite obtener bombas de calor:

Agua-agua, Aire-Agua, Aire-Aire, etc.

En donde el primer término corresponde a la fuente fría y el segundo a la fuente caliente.

Por la naturaleza de los fenómenos endotérmicos y exotérmicos.

- Bombas de Calor de compresión. Como fenómeno endotérmico hay cambio de estado en el fluido activo regularmente vaporización de un líquido y como fenómeno exotérmico condensación de un vapor que se produce mediante energía mecánica.
- Bombas de calor por absorción. Absorción de un gas o vapor en donde el fenómeno endotérmico, la absorción física o química de un vapor en un líquido o sobre la superficie de un sólido y el exotérmico la desorción.
- Bomba de calor de eyección de vapor. Se crea vacío y compresión para que la evaporación y condensación de un fluido mediante un eyector.

2.3. Ventajas de los Fluidos Utilizados

El agua como fuente energética

El agua como fuente de calor adecuada, debe de cumplir con lo siguiente:

- Un caudal suficiente de agua.
- Una calidad adecuada del agua.
- Temperatura ideal de 10 a 20 °C.

Una temperatura menor a 10°C traería consigo:

- Disminución del COP.
- Posible congelación.
- Bombeo y regulación.

Una temperatura mayor a 20°C., es necesario la utilización de enfriadores especiales o la selección de equipos para recircular el agua, al igual que salto de agua de 4-8°C, saltos menores a 4°C., origina elevados movimientos de caudal, mayores a 8°C causa bajos coeficientes de transmisión al no entrar en régimen turbulento.

Ventajas del agua como fuente energética

Dentro de las ventajas del agua más importantes se encuentran las siguientes:

- Dado el buen calor específico del agua, tiene una buena relación potencia calorífica/caudal.
- Menor relación pts/KW instalado, dada la sencillez constructiva.
- Se puede instalar en interiores.
- Bajo nivel de ruido por no tener ventiladores.

El agua como sumidero de calor

Como sumidero energético que aporta calor, el agua tiene las siguientes ventajas:

- Por el aceptable calor específico del agua, posee una buena relación potencia/caudal.
- Traslado fácil de energía a las zonas de consumo.
- Buena relación tamaño/potencia.
- Permite tratamientos en zonas diferentes con controles independientes.

Como desventajas principales se tiene:

- Menor capacidad global, ya que es necesario un intercambiador agua-aire posterior.
- Limitantes de temperatura máxima de salida del agua. Temperaturas superiores a 55 °C., es necesario refrigerantes o construcciones especiales.

El aire como fuente energética

El aire como fuente energética se debe considerar lo siguiente.

- Con 10 °C, no tiene descongelación.
- Con menos -5 °C, los COP son elevados, pero tiene descongelación.
- Con menos de -5 °C no es conveniente utilizar la bomba de calor por el bajo COP que hay.
- Generalmente se instala en la intemperie.
- Conviene usar aire que proviene de extracciones para aumentar el COP.
- Las bombas industriales de aire pueden ser de grandes dimensiones debido a las condiciones de los sistemas de aire, en potencias mayores a 350 KW (300.000 kcal/h), es complicada su construcción.
- Origina mayores niveles sonoros, debido a grandes caudales de aire movidos por los ventiladores.
- En cuanto al precio, la relación pts/KW es mayor en baterías de aire que en enfriadores de agua.

Ventajas del aire como fuente energética

Se cuenta con las siguientes ventajas.

- La fuente es inagotable.
- No hay limitaciones de caudal.
- El sumidero es gratuito.
- No existen materiales especiales.

El aire como sumidero de calor

Cuenta con ventajas como éstas:

- Sencillez de instalación.
- Capacidad elevada por no precisar de fluidos térmicos intermedios.
- Costo mínimo de explotación, mayor COP y un mínimo de instalaciones auxiliares.

Desventajas.

- Limitaciones constructivas por la relación tamaño/potencia.
- Costoso sistema en el transporte de la energía a las zonas climatizadas.

CAPÍTULO III

SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN LA BOMBA DE CALOR

3.1. Materiales de Construcción

Descripción de los Equipos

La descripción de los equipos comprende un análisis detallado de los componentes de todas las partes que comprende la bomba de calor para su correcto funcionamiento, como veremos a continuación.

Descripción general

La mayoría de las bombas de calor que operan actualmente en el sector industrial son maquinas frigoríficas de vapor condensable y sus componentes principales son:

Compresores

Eleva la presión del vapor refrigerante desde una presión de entrada a una presión de salida más alta. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: compresores volumétricos o de desplazamiento positivo, que pueden ser alternativos o rotativos, y compresores centrífugos.

En cuanto al acoplamiento motor-compresor pueden ser:

- **Abiertos:** El motor y el compresor son independientes. Los ejes se acoplan en el montaje, asegurándose la estanqueidad en el paso del eje.

- **Semiherméticos:** El compresor y el motor comparten el eje. Parte del calor generado en el motor se recupera en el fluido refrigerante, con lo que el rendimiento es superior al de los abiertos.

- **Herméticos:** El motor y el compresor, además de compartir el eje, se alojan en la misma envolvente, con lo que la recuperación del calor generada en el motor es mayor.

En las Bombas de Calor eléctricas se utilizan compresores herméticos para potencias comprendidas entre 60-70 kW, para potencias superiores (normalmente Bombas de Calor aire-agua) se utilizan compresores semiherméticos.

Únicamente se utilizan compresores abiertos en aplicaciones aisladas y nunca en equipos de serie.

En las Bombas de Calor accionadas mediante motor de gas, el compresor es abierto. El compresor lleva incorporado un embrague electromagnético que permite la regulación de la potencia en función de la demanda térmica. Las bombas de calor de gas suelen disponer de un motor de cuatro tiempos con un compresor alternativo abierto.

Alternativos

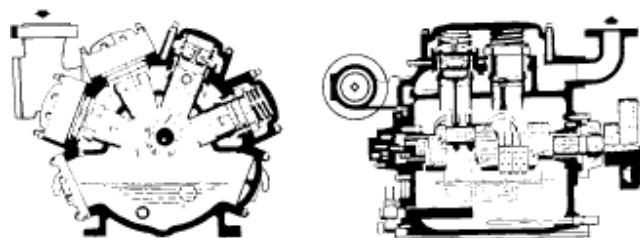
Los alternativos húmedos están compuestos por un número variable de cilindros en el interior de los cuales se desplazan pistones que comprimen el fluido. Los cilindros se suelen disponer en posición radial. El fluido entra y sale de ellos por válvulas accionadas por la presión diferencial entre ellos. Disponen de un sistema de lubricación mediante aceite a presión.

Este circuito de aceite actúa también como refrigerante. La refrigeración mediante aceite presenta problemas de ensuciamiento del fluido refrigerante con aceite que puede penetrar en el interior del cilindro.

Los alternativos secos consiguen presiones de salida más elevadas que en los anteriores, ya que la compresión tiene lugar en varias etapas. Se extrae el calor generado en la compresión mediante circuitos de agua en las etapas entre compresiones.

La estanqueidad entre cilindro y pistón se logra mediante segmentos muy resistentes que no requieren refrigeración, a base de materiales como el politetrafluoroetileno. Este tipo de compresores tiene un costo más elevado y desarrollan mayores potencias.

COMPRESOR ALTERNATIVO

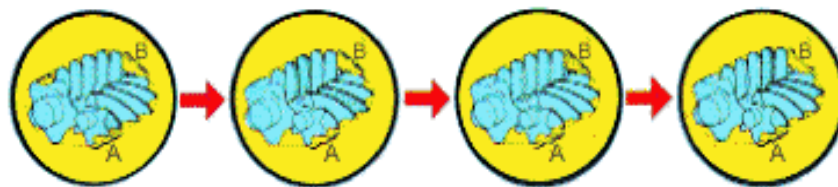
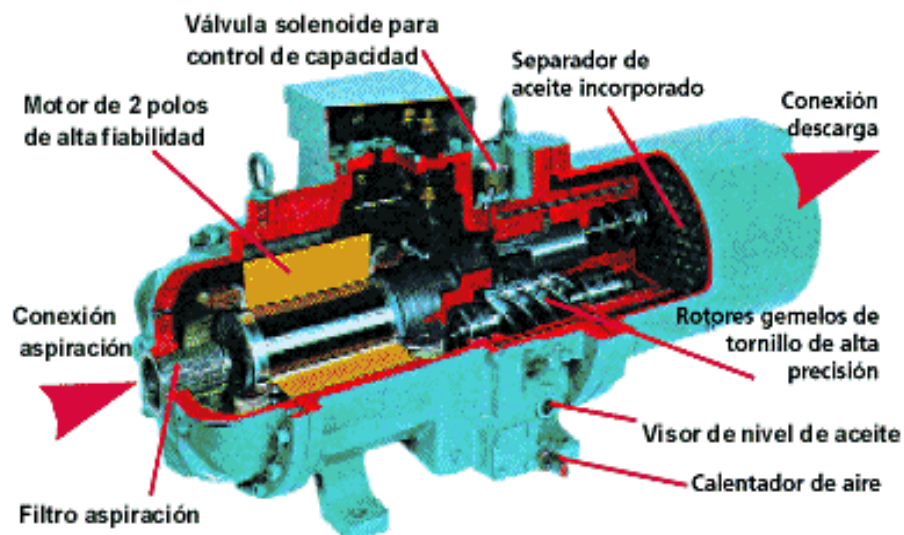


Rotativos

El compresor de tornillo seco consiste en dos rodillos con un perfil helicoidal, uno macho y otro hembra, que giran con sus ejes paralelos. Al girar, el espacio entre ellos primero aumenta, generando una depresión mediante la que se aspira el fluido y, posteriormente, se reduce comprimiendo el fluido. Al no existir contacto entre los rotores no es preciso lubricar con aceite, sin embargo, sí es necesaria una refrigeración auxiliar.

En el caso del compresor de tornillo húmedo, se inyecta aceite a presión entre los rotores para conseguir lubricación y refrigeración. Los compresores de tornillo se utilizan en generación de potencias térmicas muy elevadas a partir de 500 Kw. y suelen ser semiherméticos.

COMPRESOR ROTATIVO



A: Aspiración B: Descarga

Espiral o scroll

Los compresores de espiral o scroll se utilizan para potencias térmicas de hasta 30 kW. El refrigerante se comprime por la variación del volumen causada por una espiral giratoria. Son herméticos y permiten la aspiración y descarga simultánea del refrigerante sin necesidad de una válvula. La reducción de partes móviles mejora el desgaste y, en consecuencia la duración de estos equipos.

COMPRESOR DE ESPIRAL O SCROLL



Swing

Los compresores swing se utilizan en equipos de baja potencia térmica (hasta 6 kW). Son rotativos herméticos y consiguen la variación del volumen mediante un pistón rodante.

Centrífugos

Se utilizan para grandes potencias a partir de 200Kw en el condensador, se mueven por una rueda de alabes que giran a gran velocidad (3000 y 8000 rpm) y transfieren al fluido energía mecánica que se transforma en energía de presión en un difusor, tiene muy buen rendimiento por su buena calidad de fabricación.

Dentro de sus ventajas se tiene volumen reducido, no tiene filtraciones, potencia elevada, buena regulación de potencia, posibilidad de ser accionado por cualquier tipo de motor.

Desventajas: pequeña relación de compresión, poca alteración del régimen de marcha.

Suelen tener varias etapas de manera que consiguen grandes saltos de presión y se destinan a equipos de gran potencia.

Condensador

La función del condensador es recoger el efecto útil de la bomba por donde circula el fluido que se desea calentar, que a su vez puede ceder su calor a otro medio.

La cantidad de calor evacuado en el condensador es:

- El calor sensible del vapor recalentado a la salida del compresor.
- El calor latente de condensación.
- El calor sensible de subenfriamiento del líquido.

En la bomba de calor, la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos (refrigerante-fluido a calentar) varía de acuerdo a los materiales entre 5 y 15 °C, según el fluido a calentar y podemos clasificar los condensadores en dos tipos.

- Condensador de aire.
- Condensador de agua.

El primero es el más corriente, es de tipo de batería de tubo aleado, los tubos son de cobre y aletas de aluminio.

En el segundo, los más corrientes son:

- **De doble tubo a contracorriente.** Son de tubo de cobre, uno dentro del otro, el agua circula por el tubo interior y el refrigerante se condensa en el espacio intermedio.

Este condensador es muy utilizado en máquinas de 100 Kw. de potencia térmica en el condensador.

- **Multitubos Horizontales.** Los tubos están situados horizontalmente dentro de una virola y unidos a dos placas laterales, el agua circula por el exterior de los tubos y el refrigerante se condensa en el interior.

Evaporadores

La función del evaporador en la bomba, es tomar calor de la fuente fría de que se dispone. El calor se extrae del fluido exterior, que puede ser aire o agua. Los evaporadores más usados son:

- **De expansión seca.** El líquido es vaporizado y sale ligeramente recalentado, los vapores aspirados en el compresor son secos y el calor se absorbe por ebullición del líquido y por recalentamiento del vapor.
- **Evaporador Inundado.** Solo se ocupa para grandes potencias y el intercambio de calor se expresa por:

$$Q_1 = KS \ t_{\Delta}$$

Δt = diferencia de temperatura logarítmica media entre el fluido exterior y el refrigerante que se evapora.

En función del fluido exterior del que se extrae el calor, los evaporadores pueden ser:

Evaporadores de aire. Es de batería de tubos, aletas y ventilación forzada, el ventilador puede ser axial o centrífugo.

Cuando la temperatura de las paredes del evaporador es inferior a la temperatura de rocío del aire, se produce condensación o escarchado en el evaporador, se produce condensación si la temperatura es mayor a 0°C y si es menor a 0°C , estos dos fenómenos influyen sobre los coeficientes de intercambio térmico, las pérdidas de carga es en el lado del aire, cuando la bomba trabaje en estos márgenes de operación es necesario dispositivos de desescarche y anticondensación, como resistencias en el evaporador o inversión del ciclo.



ventilador axial y ventilador centrífugo

Evaporadores de agua. Los evaporadores-enfriadores de agua más utilizados son:

- **Coaxiales.** Por el tubo inferior circula el refrigerante y el agua circula por el espacio anular.
- **Multitubulares a expansión seca.** En su interior hay un haz de tubos, el refrigerante pasa por el interior de los tubos, el agua pasa por afuera, los tubos horizontales pueden ir en U en donde el refrigerante hace un recorrido de ida y vuelta, para mejorar el coeficiente térmico, los tubos pueden tener aletas interiores o algún otro sistema.
- **Multitubulares inundados.** El agua circula por el interior de los tubos y el refrigerante se evapora por el interior.

Órganos de expansión

Tienen la función de reducir la presión de condensación a la evaporación. La función se realiza por laminación del fluido, al pasar por un estrangulamiento, la operación se realiza sin intercambio de calor, ni trabajo y se lleva a cabo a entalpía constante.

Entre los elementos más usados están:

- **Tubo capilar.** Son tubos de sección pequeña y calibrada.
- **Válvula de expansión termostática.** Tiene la función de efectuar la expansión y regular automáticamente la alimentación del líquido al evaporador.



válvula expansion

Órganos de seguridad

Su función principal es detener o enviar una señal al compresor en caso de que esté trabajando fuera de las condiciones normales de funcionamiento, sus componentes principales son:

- **Presostato de alta presión.** Detiene al compresor cuando se alcanza una presión elevada de condensación.
- **Presostato de baja presión.** Detiene al compresor cuando la presión de aspiración es baja.
- **Presostato de aceite.** Para el compresor cuando baja demasiado la presión de aceite.
- **Termostato de descarga.** Corta al compresor cuando la temperatura de descarga es muy grande.

Equipos auxiliares

Aparte de los principales controles de seguridad y control, también existen equipos auxiliares para una mayor seguridad del equipo, como los siguientes:

- Válvulas de 4 vías, válvulas solenoides, separadores de aceite, filtro deshidratador, entre otros.

Regulación de potencia

Tienen la función de regular la potencia que puede suministrar la bomba de calor y es necesario disponer de un procedimiento de regulación de potencia.

Regulación todo-nada

Es por parada y se pone en marcha alternativamente.

Regulación todo-poco

La potencia total se puede fraccionar en la bomba de calor, el mantenimiento de la temperatura se obtiene actuando todo o nada sobre los compresores, la regulación puede ser manipulada por varios termostatos con puntos de consigna o un solo termostato de etapas.

Variación de la velocidad del compresor. La velocidad se puede manejar con motor eléctrico de dos velocidades, con un motor de corriente alterna con variación de frecuencia y con accionamiento térmico.

Bay-pass de gas caliente. Por una válvula se emanan gases calientes de la descarga de aspiración, este sistema se usa en pequeños compresores.

Anulación de aspiración. Se usa en compresores de pistón, facilita el escape de los gases del cilindro de manera que no se compriman.

Laminado de gas en aspiración. Hay una disminución de la presión de aspiración que da origen a:

- Aumento de la relación de compresión.
- Disminución del peso específico de los vapores.
- Aumento de la temperatura en la descarga.
- Mala refrigeración del motor.
- Riesgo de mal retorno de aceite.

Alabes de prerrotación en la aspiración. Son alabes radiales situados en la aspiración que hacen variar el caudal de gas aspirado por modificación del ángulo de ataque del fluido a la entrada de la rueda. La potencia absorbida varía en forma proporcional a la variación, este dispositivo es utilizado en la regulación de potencia en los compresores centrífugos.

Corredera. Tiene uso en los compresores de tornillo, la corredera se desplaza axialmente y descubre así una lumbrera en la pared interna del cilindro, una parte del gas aspirado retorna a la aspiración sin ser comprimido, este procedimiento permite regular la potencia entre el 15 y 100 %.

3.2. REFRIGERANTES

Definición

Es una sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia.

Para que un refrigerante sea apropiado y se pueda usar en un ciclo, debe de poseer propiedades físicas, químicas y termodinámicas que lo hagan seguro durante su uso, además, estas propiedades deben satisfacer las condiciones y necesidades de la aplicación para el cual va a ser utilizado.

Criterios termodinámicos

Propiedades

Para un uso apropiado del refrigerante se busca que los fluidos cumplan con la mayoría de estas características:

- **Baja temperatura de ebullición.** Es necesario un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente, a presión atmosférica.
- **Fácil manejo en estado líquido.** El punto de ebullición debe ser controlable con facilidad y su modo de absorber calor igual.
- **Calor latente alto de vaporización.** Mientras mayor sea el calor latente de vaporización, más grande es el calor absorbido por Kg. de refrigerante en circulación.
- **No tóxico, no explosivo, no inflamable.** Químicamente estable, que tolere años de repetidos cambios de estado.
- **No corrosivo.** Que asegure la construcción del equipo y se puedan usar materiales comunes y larga vida en todos sus componentes.
- **Presiones de trabajo moderadas.** Las presiones elevadas de condensación mayor a 25-28 Kg/cm., ocupa un equipo extrapesado, la operación en vacío menor a 0 Kg/cm. produce la posibilidad de entrada de aire al equipo.
- **Fácil detención y localización de pérdidas.** Con las pérdidas se tiene disminución del refrigerante y contaminación del equipo.
- **Inocuo para los aceites lubricantes.** La acción del refrigerante en los aceites no debe alterar el trabajo de lubricación.
- **Bajo punto de congelación.** La temperatura de congelación debe de estar muy por debajo de la temperatura a la cual pueda operar el evaporador.
- **Alta temperatura crítica.** Un vapor que no se condense a temperatura mayor que su valor crítico, sin importar cual sea la presión, la mayoría de los refrigerantes poseen críticas superiores a los 93 °C.
- **Moderado volumen específico del vapor.** Esto es para reducir al mínimo el tamaño del compresor.
- **Bajo costo.** Con el fin de mantener el equipo adentro de lo aceptable y asegurar el servicio adecuado cuando sea requerido.

- **No poseer presiones de condensación excesivas.** De modo que no sea necesario tener instalaciones extrafuertes.
- **Transferencia de calor satisfactoria.** Una correcta transferencia de calor y adecuados coeficientes de viscosidad.

Criterios de seguridad

La mayoría de los refrigerantes no son otra cosa que aire tóxico, ya que pueden causar sofocación porque en concentraciones altas impiden respirar bien. El grado de peligro que se tiene con el uso de refrigerantes tóxicos depende de la cantidad de refrigerante usado en relación del tamaño del espacio dentro del cual se puedan tener fugas de refrigerante.

De acuerdo a su toxicidad, el American Standard Safety Code for Mechanical Refrigeration (Código americano Estándar de seguridad para la refrigeración mecánica) y al norma ASHRAE 12-58 agrupa a los refrigerantes en tres grupos.

Refrigerantes del grupo 1:

Son los refrigerantes de alta seguridad, los menos tóxicos y de inflamabilidad despreciable, de ellos los R-11, R-113, R-114 se usan en compresores centrífugos. Los R-12, 22, 500 y 502 se ocupan en los compresores alternativos y en centrífugos de elevada capacidad.

La tabla siguiente muestra el grupo de refrigerantes.

REFRIGERANTES DE ALTA SEGURIDAD				
No. del Refrigerante	Nombre Químico	Fórmula Química	Peso molecular	Punto de ebullición (°C a 1.013 bar)
R-23	Trifluorometano	CHF ₃	70.01	-82.15
R-123	2,2-dicloro-1,1,1-	CHCl ₂ -CF ₃	153.0	27.96
R-124	Trifluorometano	CHClF-CF ₃	136.5	-12.05
R-125	2 cloro-1,1,1,2-	CHF ₂ -CF ₃	120.02	-48.41
R-134a	tetrafluorometano	CH ₂ F-CF ₃	102.0	-26.14
	Pentafluorometano			
	1,1,1,2-tetrafluorometano			
R-401 ^a (53/13/34)	Clorodifluorometano (R-22) 1,1- Difluorometano (R-152A) 2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluorometano (R-	CHFIF ₂ (53%) CH ₃ CHF ₂ (13%) CHClF-CF ₃ (34%)	94.44	-33.08

	124)			
R-401B (61/11/28)	Clorodifluorometano (R-22) 1,1-Difluorometano (R-152a) 2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluorometano (R-124)	CHClF ₂ (61%) CH ₃ -CHF ₂ (11%) CHClF- CF ₃ (28%)	92.84	-34.67
R-401C (33/15/52)	Clorodifluorometano (R-22) 1.1-Difluorometano (R-152a) 2 Cloro-1,1,1,2-Tetrafluorometano (R-124)	CHClF ₂ (33%) CH ₃ -CHF ₂ (15%) CHClF- CF ₃ (52%)	101.04	-28.43
R-402 ^a (60/2/38)	Pentafluorometano (R-125) Propano (R-290) Clorodifluorometano (R-22)	CHF ₂ CF ₃ (60%) C ₃ H ₈ (2%) CHClF ₂ (38%)	101.55	-49.19
R-402B (38/2/60)	Pentafluorometano (R-125) Propano (R-290) Clorodifluorometano (R-22)	CHF ₂ -CF ₃ (38%) C ₃ H ₈ (2%) CHClF ₂ (60%)	94.71	-47.36
404A (44/4/52)	Pentafluorometano (R-125) 1,1,1,2-tetrafluorometano (R-134 ^a) 1,1,1-Trifluorometano (R-143 ^a)	CHF ₂ -CF ₃ (44%) CH ₂ F-CF ₃ (4%) H ₃ -CF ₃ (52%)	97.6	-46.69
R-407C (23/25/52)	Difluorometano (R-32) Pentafluorometano (R-125) 1,1,1,2-tetrafluorometano (R-134 ^a)	CH ₂ F ₂ (23%) CHF ₂ -CF ₃ (25%) CH ₅ F- CF ₃ (52%)	86.2	-43.44
R-11	Triclorofluoretano	CCl ₂ F	137.4	23.8
R-12	Diclorodifluoretano	CCl ₂ F ₂	120.9	-29.8
R-13	Clorotrifluoretano	CClF ₃	104.5	-81.5
R-13B1	Bromotrifluoretano	CBrF ₃	148.9	-58
R-14	Tetrafluoruro de	CF ₄	88	-128
R-21	carbono	CHCl ₂ F	102.9	8.92
R-22	Diclorofluoretano	CHClF ₂	86.5	-40.8
R-113	Clorodifluoretano	CCl ₂ FCClF ₂	187.4	47.7

R-114	1,1,2-	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	170.9	3.5
R-115	Triclorotrifluoretano	CClF_2CF_2	154.5	-38.7
R-C318	1,2-	C_4F_8	200	-5.9
R-500	Diclorotetrafluoretano	$\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{CH}_3\text{CHF}_2$	99.29	-28
R-502	Cloropentafluoretano	$\text{CHClF}_2/\text{CClF}_2\text{CF}_3$	112	-45.6
R-744	Octofluoretano	CO_2	44	-78.5
	R-22 (73.8%)+R-152(26.2%)			
	R-22 (48.8%)+R-115(51.2%)			
	Anhídrido carbónico.			

Refrigerantes de alta seguridad

Refrigerantes del grupo 2:

Son los tóxicos y inflamables, incluye el amoníaco, cloruro de etilo, cloruro de metilo y dióxido de azufre, el amoníaco (R-717) se ocupa en menor grado.

REFRIGERANTES DE MEDIA SEGURIDAD				
No. del Refrigerante	Nombre Químico	Fórmula Química	Peso molecular	Punto de ebullición (°C a 1.013 bar)
R-30	Cloruro de metileno	CH_2Cl_2	84.9	40.1
R-40		CH_2Cl	50.5	-24
R-160	Cloruro de metilo	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$	64.5	12.5
R-611		HCOOCH_2	60	31.2
R-717	Cloruro de etilo	NH_3	17	-33
R-764	Formiato de metilo	SO_2	64	-10
R-1130	Amoníaco	$\text{CHCl}=\text{CHCl}$	96.9	48.5
	Anhídrido sulfuroso			
	1,2 Dicloroetileno			

Refrigerantes de media seguridad

Refrigerantes del grupo 3:

Son los refrigerantes de media seguridad, son muy inflamables y explosivos, debido a su bajo costo se usan en donde siempre está latente el peligro, éstos incluyen el Butano, Propano, Isobutano, Etano, Etileno, Propileno y Metano, estos refrigerantes deben de trabajar a presiones mayores que la atmosférica para evitar que aumente el riesgo de explosión, con la ventaja de que a presiones mayores que la atmosférica impide la introducción de aire por pérdidas, ya que la mezcla refrigerante-aire es la que resulta potencialmente peligrosa.

REFRIGERANTES DE BAJA SEGURIDAD				
No. del Refrigerante	Nombre Químico	Fórmula Química	Peso molecular	Punto de ebullición (°C a 1.013 bar)
R-170	Etano	CH_3CH_3	30	-88
R-290	Propano	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$	44	-42
R-600	Butano	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	58.1	0.5
R-600 ^a	Isobutano	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	58.1	-10.2
R-1150	Etileno	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	28	-103.7

Refrigerantes de baja seguridad

Medio ambiente.

Una de las propiedades más importantes es la de no degradar el medio ambiente. Los estudios demuestran que los **CFC** son poco estables hacia la radiación **UV-C**, se produce una reacción fotoquímica que libera átomos de cloro, los cuales son muy reactivos y chocan con los átomos de ozono, originando monóxido de cloro y oxígeno molecular, el primero puede reaccionar con los átomos de oxígeno y regenerar el cloro atómico, se calcula que un solo átomo de **CFC** liberado puede dar origen a una reacción en cadena que destruya 100000 moléculas de ozono.

Los **HCFC** continúan destruyendo la capa de ozono, aunque en menor grado que los **CFC**, y los dos juntos forman gases de invernadero potentes, lo que significa que deben ser reemplazados por compuestos más aceptables. El reemplazo doblará los costos de los nuevos equipos, de los cambios en la línea de producción y del entrenamiento del personal, esto desde el punto de vista ambiental.

Refrigerante 22. (CHCIF)

Conocido con el nombre de Freón 22, tiene un punto de ebullición a la presión atmosférica de 40.8 °C, la temperatura de descarga con el R-22 es alta, la temperatura de sobrecalentamiento en la succión debe conservarse en su valor mínimo, sobre todo cuando se utilizan en unidades pequeñas motor-compresor. En uso de temperaturas bajas, donde las relaciones de compresión son altas, se recomienda un enfriamiento con agua al cabezal y a los cilindros del compresor. El R-22 es un refrigerante seguro, es un gas incombustible, inflamable, no tóxico y no produce efectos nocivos sobre los productos alimenticios, se usa en equipos de aire acondicionado caseros y en equipos de refrigeración comercial, instalación de procesos de alimentos, refrigeración y aire acondicionado a bordo de transportes diferentes, *bombas de calor para calentar agua y aire*, además, en compresores de tornillo, centrífugos y de pistón.

FLUIDOS REFRIGERANTES.

La mayoría de las bombas de calor, al igual que todos sus componentes, se han desarrollado alrededor de los refrigerantes organoclorados, estos refrigerantes tienen su uso en la refrigeración mecánica, como ésta se basa en la evaporación y en la condensación del fluido para absorber y disipar el calor, actualmente ya existen en el mercado fluidos refrigerantes que no dañan la capa de ozono, ni reaccionan en la atmósfera dañándola, de la evolución de estos refrigerantes depende el perfeccionamiento de la bomba de calor en los próximos años.

Definición:

Es cualquier cuerpo o sustancia que debido a sus propiedades actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia.

Los fluidos refrigerantes deben tener ciertas propiedades para que de cierto modo condensen y evaporen a la temperatura adecuada, para cumplir su objetivo y, para que el efecto de refrigeración sea el adecuado, se debe tomar en cuenta que el efecto de refrigeración de un refrigerante, éste se mide por la cantidad de calor que es capaz de absorber desde el momento que entra al evaporador en forma líquida, hasta que sale en forma de vapor, por lo tanto, los refrigerantes que poseen un alto calor latente de evaporación poseen un buen efecto de refrigeración, con lo anterior, se deduce que el efecto de refrigeración es la diferencia entre el calor que contiene el líquido, y el calor contenido en el vapor después de pasar por el evaporador. También se busca que los gases refrigerantes no sean tóxicos, inflamables, no deben reaccionar con los materiales y componentes que constituyen la bomba de calor, una apropiada a la economía, se debe tener en cuenta que el fluido refrigerante tenga las características necesarias y sea apropiado para el uso en el ciclo de refrigeración, a continuación la tabla siguiente muestra una lista de los refrigerantes más usados, al igual que se observa que la American Society of Refrigerating Engineers (ASRE) designa un sistema de numeración estándar a los

refrigerantes, como R-22,R-12,R-11, para no causar confusión en nombres tan largos y difíciles de recordar.

Dentro de las propiedades con que debe de contar el fluido refrigerante se encuentran las propiedades Físicas, Químicas y Termodinámicas de Seguridad y Económicas, que lo hagan seguro durante su uso y que estas propiedades satisfagan las condiciones y necesidades en la aplicación para las que va a ser utilizado.

Designación ASRE	Nombre químico	Fórmula Química	Peso Molecular	Punto de ebullición (°F a 14.7/in ² abs)
Compuestos halocarburos e hidrocarburos				
10	Carbontetracloruro	CCl ₄	153.8	
11	Tricloromonofluorometano	CCl ₂ F	137.4	
12	Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	120.9	
13	Monobromotrifluorometano	CClF ₃	104.5	
13B1	Monobromotrifluorometano	CBrF ₃	148.9	
14	Carbontetrafluoruro	CF ₄	88.0	
20	Cloroformo	CHCl ₃	119.4	
21	Dicloromonofluorometano	CHCl ₂ F	102.9	
22	Monoclorodifluorometano	CHClF ₂	86.5	
23	Trifluorometano	CHF ₃	70.0	
30	Cloruro de metileno	CH ₂ Cl ₂	84.9	
31	Monocloromonofluorometano	CH ₂ ClF	68.5	
32	Fluoruro de metileno	CH ₂ F ₂	52.0	
40	Cloruro de metilo	CH ₃ Cl	50.5	
41	Fluoruro de metilo	CH ₃ F	34.0	
50	Metano	CH ₄	16.0	
110	Hexacloroetano	CCl ₃ CCl ₃	236.8	
111	Pentacloromonofluoroetano	CCl ₃ CCl ₂ F	220.3	
112	Tetraclorodifluoroetano	CCl ₃ FCl ₃ F	203.8	
112 ^a	Tetraclorodifluoroetano	CCl ₃ CClF ₂	203.8	
113	Triclorotrifluoroetano	CCl ₂ FCClF ₂	187.4	
113 ^a	Triclorotrifluoroetano	CCl ₃ CF ₃	187.4	
114	Diclorotetrafluoroetano	CClF ₂	170.9	
114 ^a	Diclorotetrafluoroetano	CClF ₂	170.9	
114B2	Dibromotetrafluoroetano	CCl ₂ FCF ₃	259.9	
115	Monocloropentafluoroetano	CBrF ₂	154.5	
116	Hexafluoroetano	CBrF ₂	138.0	
120	Pentacloroetano	CClF ₂ CF ₃	202.3	
123	Diclorotrifluoroetano	CF ₃ CF ₃	153.0	
124	Monoclorotetrafluoroetano	CHCl ₂ CCl ₃	136.5	

124 ^a	Monoclorotetrafluoretano	CHCl_2CF_3	136.5	
125	Pentafluoretano	$\text{CHClF}_2\text{CF}_3$	120.0	
133 ^a	Monoclorotrifluoretano	$\text{CHF}_2\text{CClF}_2$	118.5	
140	Tricloroetano	CHF_2CF_3	133.4	
142b	Monoclorodifluoretano	CH_2ClCF_3	100.5	
143 ^a	Trifluoretano	CH_3CCl_3	84.0	
150 ^a	Dicloroetano	CH_3CClF_2	98.9	
152 ^a	Difluoretano	CH_3CF_3	66.0	
160	Cloruro de etilo	CH_3CHCl_2	64.5	
170	Etano	CH_3CHF_2	30.0	
218	Octafluoropropano	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$	188.0	
290	Propano	CH_3CH_3	44.0	
600	Butano	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_3$	58.1	
600a	Isobutano	CH_3 CH_2CH_3 CH_3CH_2 CH_2CH_3 $\text{CH}(\text{CH}_3)_3$	58.1	
Compuestos inorgánicos				
717	Amoníaco	NH_3	17	
718	Agua	H_2O	18	
727	Aire		29	
744	Dióxido de carbono	CO_2	44	
744 ^a	Oxido nitroso	N_2O	44	
764	Dióxido de azufre	SO_2	64	

Criterios Termodinámicos

La tabla siguiente muestran las principales características termodinámicas de algunos refrigerantes, como son las características de presiones de vapor a la temperatura de evaporación, con las principales aplicaciones.

		Tricloro Fluorometano	Dicloro-Difluorometano	Clorotri-Fluorometano	Cloro di-Fluoro-Metano	Tricloro-Fluorometano	Dicloro-Fluoro-Metano			Bromotri Fluoro-Metano
Características	Unidades	R11	R-12	R-13	R-22	R-113	R-114	R-500	R-502	R-13B1
Fórmula molecular		CCl ₃ F	CCl ₂ F ₂	CClF ₃	CHClF ₂	CCl ₂ F-CCl ₂ F	CClF ₂ -CClF ₂	Azeotrópico	Azeotrópico	CF ₃ Br
Peso molécula	g/mol	137.38	120.93	104.47	86.48	170.39	170.92	99.29	111.6	148.9
Temperatura ebullición a 1 atm.	°C	23.8	-29.8	-81.4	-40.8	47.57	3.55	-33.3	-45.6	-57.8
Temperatura congelación	°C	-111	-158	-181	-160	-35	-94	-158.9	—	-166
Temperatura crítica	°C	198	112	29.1	96	214.4	145.7	105.6	82.7	67
Presión crítica	Atm Kg/cm ² abs	43.5 44.9 6	40.6 42.0	38.6 39.8	49.2 50.9	33.7 34.8	32.2 33.3	43.7 45.1	40.6 42.1	39.1 40.1
Volumen crítico	cc/mol	247	217	181	164	325	293	199.4	199.5	199.9
Densidad crítica	g/cc	0.554	0.558	0.581	0.525	0.576	0.582	0.498	0.529	0.745
	cal/g°	0.20	0.23	0.247	0.33	0.218	0.238	0.284	0.30	0.216

Cp de líquido a 30 °C	C	8	6	(-30°C)	5					
Cp del vapor a 1 atm	cal/g° C	0.137	0.148	0.138 (-30°C)	0.152	0.161 (60°C)	0.160	0.171	0.168	0.12
Cp/Cv a 1 atm y 30 °C	—	—	1.136	1.172 (-30°C)	1.148	1.080 (60°C)	1.088	1.13	1.133	1.116
Densidad vapor Sat. a 1 atm	g/l	8.85	6.33	7.8	4.69	7.38	7.82	5.33	6.239	8.71
Calor latente de Vaporización a 1 atm	cal/g	43.51	39.47	35.4	55.92	35.07	32.78	49.16	42.47	28.38

Principales Características termodinámicas de algunos refrigerantes.

La tabla siguiente muestra las presiones de vapor a la temperatura de evaporación y condensación de los fluidos refrigerantes más utilizados.

Aplicación	Temperatura (°C)		Refrigerante	Presiones (Kg/cm ² abs)		Notas
	Evaporador	Condensador		Evaporador	Condensador	
Congelación de Alimentos	-40 °C	35 °C	R-12	0.65	8.6	Con ciclos de Doble compresión
			R-22	1.07	13.8	
			NH3	0.73	13.8	
Almacenamiento de Alimentos	-20 °C	35 °C	R-11	0.16	1.5	Refrigerantes para Baja presión
			R-21	0.28	2.5	
			R-114	0.38	3.0	
	-20 °C	35 °C	R-12	1.54	8.6	Refrigerantes para Alta presión
			R-22	2.50	13.8	
			NH3	1.94	13.8	
-10 °C	35 °C	R-11	0.26	1.5		
		R-21	0.45	2.6		
		R-114	0.60	3.0		
		R-12	2.24	8.6		
		R-22	3.60	13.8		
		NH3	2.96	13.8		
Enfriamiento de agua	1 °C	35 °C	R-11	0.43	1.5	
			R-21	0.75	2.6	
			R-114	0.94	3.0	
			R-12	3.26	8.6	
			R-22	5.25	13.8	
			NH3	4.26	13.8	
1 °C	50 °C	R-11	0.43	2.4	Alta temperatura de condensación	
		R-21	0.75	4.0		
		R-114	0.94	4.6		
		R-12	3.26	12.4		
		R-22	5.25	20.0		
		NH3	4.26	20.7		

Bomba de calor	25 °C	70 °v	R-11 R-21 R-114 R-12 R-22 NH3	1.05 1.83 2.18 10.5 10.5 10.02	4.2 6.7 7.4 30.5 30.5 35.0	
	25 °C	(+)(-)80 °C	R-11 R-21 R-114 R-12	1.05 1.83 2.18 6.6	5.3 8.4 9.5 23.2	
	25 °C	90 °C	R-11 R-21 R-114 R-12	1.05 1.83 2.18 6.6	6.7 11.3 12.3 29.0	
	25 °C	100 °C	R-11	1.05	8.3	

La tabla muestra las Presiones de vapor a las temperaturas de evaporación y condensación, con las principales aplicaciones.

Los criterios termodinámicos más importantes que se deben de observar en un refrigerante son los siguientes:

- **Presión de evaporación.** La presión de evaporación en la temperatura de funcionamiento es necesario que sea superior a la presión atmosférica, para evitar la entrada de humedad y aire en el equipo.
- **Temperatura crítica.** Para que el fluido refrigerante se condense, al igual que disipe el calor latente apreciable, la temperatura de condensación debe estar alejada del punto crítico.
- **Relación de compresión.** La relación existente entre las presión correspondientes a las temperaturas de evaporación y condensación tiene que ser lo más bajo posible.
- **Eficacia en los cambios térmicos.** Los coeficientes de convicción de los refrigerantes que se evaporan y condensan difieren unos de otros, por tanto, influyen en el tamaño de las superficies de intercambio de calor.

- **Temperatura de descarga.** Esta temperatura es una característica de cada refrigerante para condiciones de funcionamiento en el compresor.

- **Producción frigorífica.** Es la cantidad de calor que absorbe el evaporador, por cada unidad de volumen de vapor aspirado por el compresor, esta función volumétrica del refrigerante depende del fluido y de las condiciones de funcionamiento de la bomba de calor.

El diagrama siguiente nos muestra una gama de Presión-Temperatura de los refrigerantes más utilizados.

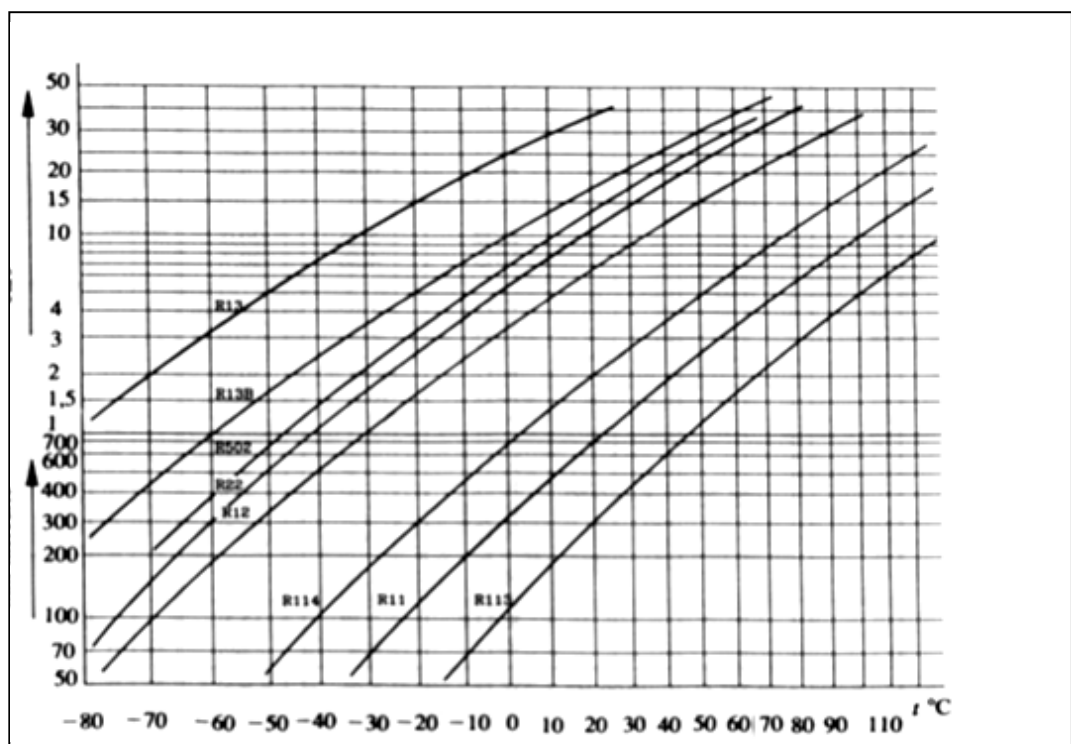
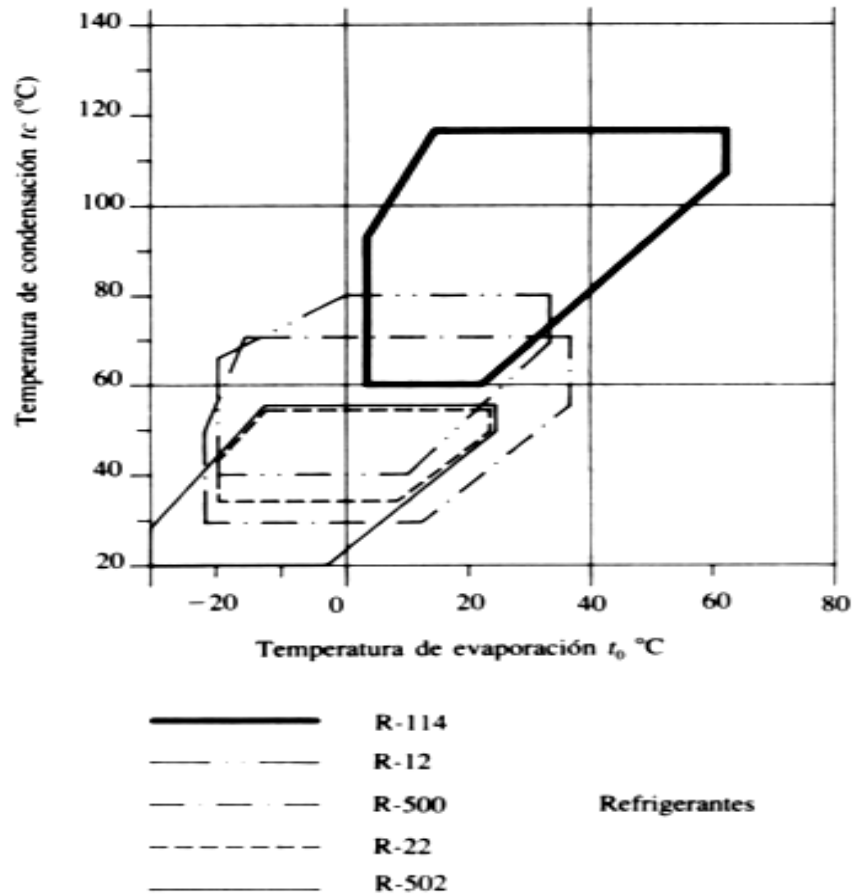


Diagrama presión-temperatura de algunos refrigerantes.

En la figura que a continuación se muestra, se observan los límites de operación de algunos refrigerantes aplicados en compresores de la bomba de calor.



Límites de operación de algunos refrigerantes aplicados en compresores de bombas de calor.

Criterios de seguridad

Todos los elementos gaseosos tienen un cierto grado de toxicidad, con excepción del aire, hay varios niveles de toxicidad, ya que algunas sustancias producen efectos tóxicos y ponen en peligro la vida porque reducen la cantidad de oxígeno necesario para vivir, mientras que otras son verdaderamente venenosas. Además del peligro del refrigerante, se tiene otro peligro, es el caso del fuego debido que algunos refrigerantes se pueden condensar o ser explosivos en la presencia de fuego o en una superficie incandescente, al igual que pueden descomponerse y formar sustancias venenosas.

Como los refrigerantes no son más que sustancias tóxicas, la toxicidad de los refrigerantes está relacionada con:

- Con la naturaleza del material.
- El aumento relativo del refrigerante en el aire.
- El espacio de tiempo con la exposición del químico.

La tabla siguiente muestra el grado de toxicidad de algunos refrigerantes, esto de acuerdo al programa que tuvo con animales la The National Board of Fire Underwriters por muchos años, asignándoles un número de 1 a 6, donde 1 es la clasificación de los refrigerantes más tóxicos y 6 los refrigerantes esencialmente no tóxicos.

Refrigerantes	Número de toxicidad National Fire Underwriters	Letalidad, muerte o lesión seria		Inflamable o explosivo % por volumen	Código grupo de la ASA- B9
		Exposición en horas	% por volumen		
Amoniaco (717)	2	0.5	0.5-0.6	16-25	2
Butano (600)	5	2	37.5	1.6-6.5	3
Bióxido de carbono (744)	5	0.5 a 1	5-7 ^a	No	...
Etano (170)	5	2	37	3.3-10.6	3
Etano (170)	4	2	2-2.5	8.1-17.2	2
Cloruro de metilo (40)	5	2	10	No	1
Refrigerante 11	6	2	28.5-30.5	No	1
Refrigerante 12	6	No	1
Refrigerante 13	...	0.5	10.2	No	1
Refrigerante 21	5 ^a	Ligeram.	1
Refrigerante 22	4	1	4.8	No	1
Refrigerante 113	6	2	20.1	No	1
Refrigerante 114 ^a	5 ^a	2	19.4	No	1
Refrigerante 500	1	0.08	0.7	No	...
Bióxido de azufre (764)	1	0.08	0.7	No	...

Toxicidad de algunos refrigerantes

El código de seguridad B-9 de la ASRE y la American Standards Association clasifica los riesgos de los refrigerantes como sigue.

- Flameabilidad de mezclas de vapor-aire. Es peligroso en cierto límite de concentración.
- El vapor refrigerante está a una presión sumamente alta que tienda a extinguir la flama.
- La pérdida o fuga de un refrigerante se conoce antes de que se tenga una concentración de combustible, debido a su olor característico o por su comportamiento de falla.

Además, del código Americano Estándar de Seguridad para la Refrigeración Mecánica (Standard Safety Code For Mechanical Refrigeration) y la norma ASHRAE 12-58 agrupan a los refrigerantes en tres grupos de acuerdo al grado de toxicidad.

Criterios Técnicos

Con los criterios técnicos se busca que los refrigerantes tengan las propiedades adecuadas para cumplir con la mayor eficiencia su ciclo y no provoque acciones dañinas al sistema, como las siguientes:

- **Acción sobre los metales:** Hay refrigerantes que no son compatibles con algunos materiales, como el cobre y sus aleaciones, al zinc y el magnesio y sus combinaciones, ya que ciertos refrigerantes los pueden corroer, como es el caso del amoníaco.
- **Acción sobre plásticos y elastómeros:** Existen refrigerantes halogenados que producen reacciones químicas sobre materiales plásticos, provocando su rápido deterioro.
- **Acción sobre los aceites:** Cuando existen contaminantes en el sistema como aire y agua en cantidades que se aprecian, se llevan a cabo reacciones químicas en conjunto con los contaminantes, al igual que el refrigerante, el aceite refrigerante y el aceite lubricante pueden llegar a entrar en descomposición, formando ácidos corrosivos y sedimentos en superficies metálicas en especial en el cobre y corrosión superficial en superficies pulidas, las temperaturas altas aceleran estos procesos.

Otros elementos como el dióxido de azufre y los refrigerantes halocarburos reaccionan en cierto grado con el aceite lubricante, siendo esta reacción ligera en condiciones normales de operación.

Las desventajas antes mencionadas se pueden reducir al máximo o eliminarse por completo mediante la aplicación de aceites lubricantes de alta calidad que tengan

puntos bajos de fluidez o congelación, manteniendo el sistema libre de contaminantes, como el agua y la humedad, al igual que diseñando al equipo en las forma que las temperaturas en las descargas sean relativamente bajas.

- **Estabilidad Térmica:** Para no descomponerse aún en temperaturas muy inferiores a la crítica.

- **Comportamiento en presencia de agua:** Al haber una combinación de humedad en distintos grados, la mayoría de los refrigerantes permanentemente usados, dan lugar a la formación de compuestos como ácidos altamente corrosivos, los cuales reaccionan con el aceite lubricante y otros materiales, incluyendo a los metales, provocando daños a las válvulas, chumaceras, sellos, paredes de los cilindros y otras superficies pulidas. Además, causa deterioro en el aceite lubricante, forma sedimentos lo cual obstruye las válvulas y los conductos de aceite, disminuye la velocidad del equipo, provoca fallas en las válvulas del compresor y en los motocompresores, provoca la rotura de los aislamientos del devanado del motor, lo cual produce un corto en el mismo.

La humedad en un equipo existe en dos formas: como agua libre o estar en solución con el refrigerante, en la primera forma, el agua se congelará, formando hielo en la válvula de control del refrigerante o en la del evaporador, si la temperatura del evaporador es menor que la temperatura del agua, el hielo que se forma en el control del refrigerante obstruye el orificio de flujo del mismo, provocando que el sistema se vuelva inoperante.

Se tendrá agua libre en el sistema, en el momento en que la cantidad de agua rebase la capacidad que pueda llevar el refrigerante en solución; además, el congelamiento es un indicador de que el nivel de humedad está por encima del nivel mínimo que produzca corrosión, se debe de tomar en cuenta que el nivel mínimo de humedad no está totalmente definido, ya que varía en la naturaleza del refrigerante, la cantidad del aceite lubricante, así como las temperaturas de funcionamiento del sistema y en gran medida la descarga del compresor.

Para los hidrocarburos como el propano, butano, etano y algunos otros absorben poca o casi nada de humedad; además, los hidrocarburos mantienen bajo control el contenido de humedad y los problemas que pueda generar ésta.

Para los refrigerantes halocarburos, éstos se hidrolizan ligeramente formando pequeñas cantidades de compuestos corrosivos. Para evitar la corrosión en los sistemas de estos tipos de refrigerantes, se debe de mantener la humedad por abajo del nivel que cause congelamiento.

- **Miscibilidad con los aceites.** Se debe de comprender que la miscibilidad es la capacidad que tiene el refrigerante para mezclarse con el aceite y formar una sustancia homogénea para que el aceite circule con el refrigerante con toda facilidad en el compresor.

Los refrigerantes R-11, R-12, R-113, R-114, y R-500 son miscibles con el aceite a todas las temperaturas, en cambio el R-22 y R-502 a bajas temperaturas se separan en dos fases, los R-13, R-14 y NH₃ no son miscibles. Además la capacidad de miscibilidad de cada uno de los refrigerantes con el aceite tiene una gran influencia en el diseño y selección de los elementos y conexiones de una bomba de calor.

Propiedades específicas de los refrigerantes

Refrigerante 11 (R-11)

Identificación

Freón 11		No. ASHRAE R-11
Fórmula	CCl ₃ F	
Peso molecular	137.36	

Composición

Refrigerante	% Presente
Triclorofluorometano	100

Propiedades físicas y químicas

Punto de ebullición.	23.9°C (75°F)
Presión de vapor	14.7 psia a 25°C (77°F)
Densidad del vapor	4.9 (aire = 1)
Por ciento de volatibilidad	100% en peso
Razón de evaporación	(CCl ₄ = 1.00)
Solubilidad en agua	0.1% en peso a 25°C (77°F)
PH	Neutral
Olor	Un poco a éter
Forma	Líquido
Color	Claro, Transparente
Densidad	1.48 g/cc a 25°C (77°F)

Estabilidad y Reactividad

Estabilidad química

El refrigerante es estable, sin embargo, se debe de evitar con flamas abierta y altas temperaturas.

Compatibilidad con otros materiales

El R-11 no es compatible con los metales alcalinos (H, Li, Na, K, Rb, Cs y Fr) y los alcalinotérreos (Be, Mg, Ca, Sr, Ba y Ra) y los pulverizados, entre otros.

Polimerización

Ésta no ocurrirá.

Descomposición

Los elementos generados durante la descomposición son nocivos, el refrigerante se puede descomponer por altas temperaturas o también en superficies incandescentes y fuego abierto, generando ácido fluorhídrico.

Refrigerante 12 (R-12)

Identificación

Freón 12

No. ASHRAE R-12

Fórmula $CC_{12}F_2$

Peso molecular 120.9

Composición

Refrigerante

% Presente

Diclorodifluoretano

100

Propiedades físicas y químicas.

Punto de ebullición.	-29.8°C (21.6°F)
Presión de vapor	94.5 a 25°C (77°F)
Densidad del vapor	4.26 (aire = 1) 25°C (77°F)
Por ciento de volatilidad	100% en peso
Solubilidad en agua	0.028% en peso a 25°C (77°F)
PH	Neutral
Olor	Un poco a éter
Forma	Gas licuado
Color	Claro, Transparente
Densidad	1.315 g/cc a 25°C (77°F) liquido

Estabilidad y Reactividad**Estabilidad química**

El refrigerante es estable, sin embargo, se debe de evitar que se exponga a flamas abiertas y a las altas temperaturas.

Compatibilidad

El R-12 no es compatible con los metales alcalinos (H, Li, Na, K, Rb, Cs y Fr) y los alcalinotérreos (Be, Mg, Ca, Sr, Ba y Ra) y los pulverizados, entre otros.

Polimerización

Esta no ocurrirá.

Descomposición

Los elementos generados durante la descomposición son nocivos, el refrigerante se puede descomponer por altas temperaturas o también en superficies incandescentes y fuego abierto, generando ácido fluorhídrico.

Refrigerante 13 (R-13)**Identificación.**

No. ASHRAE R-13

Formula	CCIF3
Peso molecular	104.5
Composición	
Refrigerante	
Clorotrifluoretano	% Presente 100

Lugar de utilización. A muy bajas temperaturas

Refrigerante muy estable.

Baja toxicidad.

Para su uso igual en el futuro.

Problemas

Temperatura crítica muy baja.

No se encuentra fácilmente.

Refrigerante 14 (R-14)

Identificación

		No. ASHRAE R-14
Fórmula	CF ₄	
Peso Molecular.	88	
Composición		% Presente
Tetrafluoruro de carbono		100

Lugar de utilización, en todas las instalaciones a muy bajas temperaturas.
 No tiene sustituto en circuitos de compresión a muy bajas temperaturas.
 Buen volumen de producción frigorífica.
 Es muy estable este refrigerante.
 Es poco tóxico.

Problemas

Se ocupa en instalaciones de cascada triple.
 No es fácil de encontrar.
 Es demasiado caro.

Refrigerante 22 (R-22)

Identificación

Freón	22	No. ASHRAE R-22
Fórmula	CHClF ₂	
Peso molecular	86.47	
Composición		% Presente
Refrigerante		100
Clorodifluoretano		

Propiedades físicas y químicas.

Punto de ebullición.	-40.8 °C (-41.4 °F)
Presión de vapor	151 psia a 25°C (77°F)
Densidad del vapor	3.03 (aire = 1) 25°C (77°F)
Por ciento de volatilidad	100% en peso
Razón de evaporación	>1 (CCl ₄ = 1)
Solubilidad en agua	0.3% en peso a 25°C (77°F)

PH	Neutral
Olor	Un poco a éter
Forma	Gas licuado
Color	Claro, Transparente
Densidad	1.194 g/cc a 25°C (77°F) líquido

Estabilidad y Reactividad

Estabilidad química

El refrigerante es muy estable, más sin embargo no se exponga a fuego abierto, superficies incandescentes, al igual que las altas temperaturas.

Compatibilidad

El refrigerante no es compatible con los siguientes materiales, como los alcalinos y alcalinotérreos, al igual que los materiales pulverizados.

Descomposición

Los residuos generados como el ácido fluorhídrico en la descomposición son nocivos, éstos se forman a fuego abierto y a altas temperaturas.

Transportación

Nombre de Transportación	Clorodifluoretano
Clase de riesgo	2.2
Se transporta en	Carros tanque Camiones Cilindros

Refrigerante 114 (R-114)

Identificación

Freón	114	No. ASHRAE R-114
Fórmula	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	
Peso molecular	170.9	

Composición

Diclorotetrafluoretano

Lugar de utilización a mediana y alta temperatura.

Presión de condensación baja inclusive a alta temperatura.

Temperatura de impulsión muy baja.

Mayor calor específico.

Estable y no tóxico.

Desventajas

Precio alto.
Escasa disponibilidad.

Refrigerante 500 (R-500)

Identificación

No. SHRAE R-500

Fórmula $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{CH}_3\text{CHF}_2$
Peso molecular 99.29

Se utiliza en el aire acondicionado y en instalaciones de gran tamaño.
La capacidad del compresor aumenta de 10 a 15 %.

Desventajas

No es muy disponible.
Es de precio elevado.

Refrigerante 502 (R-502)

Identificación.

No. ASHRAE R-502

Fórmula $\text{CHClF}_2/\text{CClF}_2\text{CF}_3$
Peso molecular 112

Se utiliza en baja, mediana y alta temperatura, así como en grandes instalaciones.
Proporciona una producción frigorífica magnífica.

Desventajas

Precio elevado.
Uso restringido.

Refrigerante 503 (R-503)

Identificación

No. ASHRAE R-503

Fórmula

Peso molecular

Lugar de utilización a bajas temperaturas en instalaciones en cascada.

Se utiliza en instalaciones en cascada.

Para la investigación científica.

Para endurecer metales en cámaras de prueba, en productos farmacéuticos.

Desventajas

Precio alto y poca disponibilidad.

Recomendaciones

Los refrigerantes fluorocarbonos que se alistan en dos grupos, los CFC con dos átomos de cloro y los HCFC, con un átomo de cloro y otro de hidrógeno, se encuentran en camino de desaparecer, ya que contribuyen en la destrucción de la capa de ozono y en el calentamiento global de la atmósfera, además, en el protocolo de Montreal se incluyen como sustancias controladas que dejarán de usarse en su totalidad en el año 2030.

Como alternativas más próximas para sustituir a los refrigerantes fluorocarbonos se encuentran las mezclas, que son refrigerantes compuestos por dos o más fluidos y no contienen cloro, también tenemos los HCF'S al igual que las mezclas no contienen cloro (R-134^a, R-152^a, R-32, R-125 y R-143^a). Para el futuro se presentarán los refrigerantes naturales, que son sustancias que se encuentran en la tierra en forma natural y que realizarán su trabajo sin dañar el medio ambiente.

En este tiempo ya podemos encontrar en el mercado refrigerantes para sustituir a los refrigerantes fluorocarbonos, entre los que se encuentran los HCF'S, los refrigerantes Suva (que son una gama de refrigerantes que comercializa Du Pont).

Los refrigerantes marca Suva se emplean en la primera carga para equipos nuevos, así como en la reconversión en equipos de servicio actual. Para asegurar los mejores rendimientos y la no inflamabilidad, los refrigerantes en servicio se sustituyen principalmente por mezclas.

Características de toda la línea de refrigerantes marca Suva.

- Potencial de destrucción de ozono (ODP) muy bajo o cero.
- No son explosivos.
- No son inflamables.
- No son tóxicos.
- No son corrosivos.
- No son irritantes.
- Sin olor algunos ligeramente a éter.

Nota:

Son gases comprimidos, licuados y a presión, por tanto, requieren un cuidado especial.

Clase de riesgo en la transportación

Clase 2

- Fluidos comprimidos, licuados, refrigerados o disueltos a presión.
- Fluidos comprimidos no inflamables, no tóxicos.

Identificación de riesgos

Salud	1
Flamabilidad	0
Reactividad	0
Riesgo	Grado
Mínimo	0
Ligero	1
Moderado	2
Serio	3
Severo	4

Equipo de protección personal (EPP)

- Lentes de seguridad
- Guantes de carnaza
- Ropa de manga larga
- Zapatos de casquillo de acero
- Casco

Precaución en el manejo y almacenamiento de los refrigerantes

- En todo uso de los refrigerantes usar el EPP mínimo.
- Almacenar el producto en un lugar fresco, limpio y ventilado.
- No calentar los envases del producto por arriba de los 52 °C (25 °F).

Primeros auxilios

Inhalación

- En caso de respiración se debe de llevar a la persona a un área ventilada.
- Si no respira, dar respiración artificial o suministrar oxígeno.

Contacto con piel y ojos

- Quitar la ropa y zapatos y lavar con abundante agua tibia durante 15 minutos.

Estabilidad y Reactividad

El refrigerante es estable, no se exponga al fuego abierto, así como a las altas temperaturas.

No es compatible con los metales alcalinotérreos.

Los residuos de descomposición del refrigerante son peligrosos, ya que puede formar ácidos que reaccionan con los metales.

Descripción de los refrigerantes ecológicos

SUVA 123

No. ASHRAE: R-123.

R- 123

CHFC-123

Propiedades físicas y químicas

Fórmula	CHFC ₂ CF ₃
Composición	2,2-dicloro-1,1,1-Trifluorometano 100%
Punto de Ebullición. a 1 atm, (760 mmHg)	27AC, (82°F)
Presión de vapor a 25°C (77°F)	13 psia, (91.26 Kpa)
Densidad del vapor	5.3 (aire = 1)
% de volatibilidad	100R
Razón de Evaporación.	(CCl ₄) menos de 1
Peso molecular.	152.93
Capacidad térmica del líquido a 25°C (77°F)	0.235 Btu/lb°F (0.984 KJ/Kg°K)
Capacidad térmica del vapor a 25°C	0.172 Btu/lb°F (0.72

(77°F)	KJ/Kg°K)
Conductividad térmica líquido a 25°C (77°F)	0.0471 Btu/hrft°F (0.081 W/m°K)
Conductividad térmica del vapor a 1atm (101.3 Kpa)	0.0064 Btu/hr.ft°F (0.0112 W/m°K)
Temperatura crítica °C (°F)	183.7 °C (362.6 °F)
Presión crítica	3668 Kpa (532 psia)
Solubilidad en agua a 25°C (77°F)	0.39% en peso
Acidez pH	Neutral
Olor	Un poco a éter
Forma	Líquido
Color	Transparente
Límite de Exposición Aceptable AEL Du pont ppm	50 en 8 y 12 hrs TWA
Límite de Exposición Aceptable WEEL AIHA ppm	50 8 hrs TWA
Límite de Exposición de Emergencia. Du pont ppm	1000 en 1 hr. Tolerancia 2500 en 1mi.
Potencial del agotamiento del ozono ODP, CFC-12=1	0.02
Potencial de calentamiento global CFC ₂ =1	93
Clasificación ASHRAE de seguridad.	B1

Aplicaciones y beneficios

En aire acondicionado en edificios, control de temperatura ambiental.

Se utiliza en chillers de baja presión.

Reemplaza al R-11.

Bajo costo de operación.

Aceptado por los Fabricantes de Equipo Original (FEO).

SUVA 134a

No. ASHRAE: R-134a.

R- 134a

HFC-134a

Propiedades físicas y químicas

Fórmula	CH ₂ FCF ₃
Composición	100%1,1,1,2 T tetrafluoretano
Punto de Ebullición. a 1 atm, (760mmHg)	-26.2°C (-15.2°F)

Presión de vapor a 25°C (77°F)	26 psia, (661.9 Kpa)
Densidad del vapor a 25°C (77°F)	3.6 (aire = 1)
% de volatilidad	100
Razón de Evaporación.	-----
Peso molecular.	102.03
Capacidad térmica del líquido a 25°C (77°F)	0.339 Btu/lb°F (1.42 KJ/Kg°K)
Capacidad térmica del vapor a 25°C (77°F)	0.204 Btu/lb°F (0.854 KJ/Kg°K)
Conductividad térmica líquido a 25°C (77°F)	0.0478 Btu/hrft°F (0.0824 W/m°K)
Conductividad térmica del vapor a 1atm (101.3 Kpa)	0.00836 Btu/hr.ft°f (0.0145 W/m°K)
Temperatura crítica	101.1 °C (213.9 °F)
Presión crítica	4060 Kpa (588.9 psia)
Solubilidad en agua a 25°C (77°F) 14.7 psia	0.15% en peso
Acidez pH	
Olor	Un poco a éter
Forma	Gas licuado
Color	Transparente
Límite de Exposición Aceptable AEL Du pont ppm	1000 en 8 y 12 hrs TWA
Límite de Exposición Aceptable WEEL AIHA ppm	1000 en 8 hrs TWA
Límite de Exposición de Emergencia. Du pont ppm	-----
Potencial del agotamiento del ozono ODP, CFC-12=1	0
Potencial de calentamiento global CFC ₂ =1	1300
Clasificación ASHRAE de seguridad.	A1

Aplicaciones y beneficios

Se aplica en la refrigeración industrial, aire acondicionado en automóviles, equipos domésticos y estacionarios, para supermercado de media temperatura, en bombas de calor nuevas y en ya existentes.

Baja toxicidad.

Reemplaza al R-12.

De uso estándar en muchas aplicaciones.

Facilidad de servicio.

SUVA 407 C/410A

No. ASHRAE: R- 407C/R-410 A
Suva 900

R- 407C/410A

Du pont los comercializa con el nombre de Suva 900, tienen un desempeño casi igual al HCFC-22 en el aire acondicionado.

Reemplaza al R-22 en el aire acondicionado doméstico en aplicaciones en el calentamiento de bombas.

El Suva 900 sirve para equipos nuevos o en servicio, y es reemplazo Freón 22 de mayor capacidad.

Propiedades físicas y químicas

	SUVA 407 C	SUVA 410A
Fórmula	R-23/R-125/134 ^a	R-32/R-125
Composición	R-23% /R-125%/R- 52%	R-32 50% R-125 50%
Punto de Ebullición a 1 atm, (760mmHg)	-43.56°C (-46.4°F)	-51.53°C (-60.76°F)
Presión de vapor a 25°C (77°F)	170.3 psia (1134 Kpa)	239.7 psia (1663 Kpa)
Densidad del vapor	-----	-----
% de volatilidad	100% en peso	100% en peso
Razón de Evaporación	(Cl4 = 1) mayor de 1	-----
Peso molecular	86.2	72.58
Capacidad térmica del líquido a 25°C (77°F)	0.367 Btu/lb°F (1.54 KJ/Kg°K)	0.44 Btu/°F (1.84 KJ/Kg°K)
Capacidad térmica del vapor a 25°C (77°F)	0.198 Btu/°F (0.829 KJ/Kg°K)	0.199 Btu/°F (0.833 KJ/Kg°K)
Conductividad térmica líquido a 25°C (77°F)	0.0455 Btu/hr.ft°F (0.0819 W/m°K)	0.0511 Btu/hr.ft°F (0.0886 W/m°K)
Conductividad térmica del vapor a 1atm (101.3 Kpa)	0.00758 Btu/hr.ft°F (0.01314 W/m°K)	0.00772 Btu/hr.ft°F (0.01339 W/m°K)
Temperatura crítica °C (°F)	86.74 (188.13)	72.13 (161.83)
Presión crítica psia (Kpa)	669.95 (4619)	714.5 (4926.1)
Solubilidad en agua	-----	-----
Acidez pH	-----	-----
Olor	Ligero a éter	Ligero a éter
Forma	-----	Gas licuado
Color	Transparente.	Transparente.
Límite de Exposición Aceptable AEL Du pont ppm	1000	1000
Límite de Exposición Aceptable WEEL AIHA	1000	1000

ppm		
Límite de Exposición de Emergencia. Du pont ppm	-----	-----
Potencial de agotamiento del ozono ODP, CFC-12=1	0	0
Potencial de calentamiento global CFC ₂ =1	1526	1725
Clasificación ASHRAE de seguridad.	A1/A1	A1/A1

Composición en peso

Se comercializa en cilindros desechables de 6.8 Kg y en cajas de 3.40 Kg C/u.

Estabilidad y Reactividad

Los refrigerantes son estables, no se expongan al fuego abierto, así como a las altas temperaturas.

No son compatibles con los metales alcalinotérreos.

Los residuos de descomposición de los refrigerantes son peligrosos, ya que puede formar ácidos que reaccionan con los metales.

Sustituyen

SUVA MP39/HP 80

No.	ASHRAE:	R-401 ^a	R-402 ^a
R- 401 ^a /R-402 ^a			

Aplicaciones y beneficios: R- 401A

Algunas aplicaciones se dan en la refrigeración doméstica, congeladores, equipos de refrigeración para alimentos de media temperatura de humidificadores, máquinas de hielo y máquinas expendedoras de bebidas.

Sustituye al refrigerante R-12

Aplicaciones y beneficios: R-402^a

Sustituye al R-502 en la refrigeración comercial que ya existen de baja y media temperatura, también se aplican en la refrigeración en los supermercados, almacenamiento y transportes de alimentos.

Ofrece una buena eficiencia y capacidad sin sufrir los incrementos de presión y temperatura, todos los refrigerantes HP de Dupont fueron creados para sustituir al R-502. Además, tiene un comportamiento similar al R-502, aumenta el tiempo de vida de los equipos, fácil reacondicionamiento, bajo costo, facilidad de servicio y seguro y fácil de usar.

Propiedades físicas y químicas

	SUVA MP39	SUVA HP80
Fórmula	R-22/R-52a/R-124	R22/R125/R290
Composición	53/13/34%	38/60/2 %peso
Punto de Ebullición a 1 atm, (760mmHg)	-33 °C (-27 °F)	-49.2°C (-56.5°F)
Presión de vapor a 25°C (77°F)	112.1 psia (772.9 Kpa)	194 psia (1337 Kpa)
Densidad del vapor	3.3 Caire =1) a 25 °C (77 °F)	-----
% de volatilidad	100% en peso	100% en peso
Razón de Evaporación	(Cl4 = 1) mayor de 1	(Cl4 = 1) > 1
Peso molecular	94.4	101.55
Capacidad térmica del líquido a 25°C (77°F)	0.310Btu/lb°F (1.3 KJ/Kg°K)	0.328Btu/°F (1.37KJ/Kg°K)
Capacidad térmica del vapor a 25°C (77°F)	0.176 Btu/°F (0.737 KJ/Kg°K)	0.181Btu/°F (0.758KJ/Kg°K)
Conductividad térmica líquido a 25°C (77°F)	0.0517 Btu/hr.ft°F (0.09 W/m°K)	0.04Btu/hr.ft°F (0.0691W/m°K)
Conductividad térmica del vapor a 1atm (101.3 Kpa)	0.00688 Btu/hr.ft°F (0.0119 W/m°K)	0.00732Btu/hr.ft°F (0.01266W/m°K)
Temperatura crítica °C (°F)	108 (226)	75.5 (167.9)
Presión crítica psia (Kpa)	668 (4604)	599.7 (4135)
Solubilidad en agua	0.1 % en peso a 25 °C (77 °F)	-----
Acidez pH	-----	-----
Olor	Ligero a éter	Ligero a éter
Forma	Gas licuado.	Gas licuado
Color	Transparente.	Transparente.
Límite de Exposición Aceptable AEL Du pont ppm	1000	1000
Límite de Exposición Aceptable WEEL AIHA ppm	1000	1000
Límite de Exposición de	-----	-----

Emergencia. Du pont ppm		
Potencial de agotamiento del ozono ODP, CFC-12=1	0.03	0.02
Potencial de calentamiento global CFC ₂ =1	973	2250
Clasificación ASHRAE de seguridad.	A1/A1	A1/A1

Estabilidad y Reactividad

El refrigerante es estable, no se exponga al fuego abierto, así como a las altas temperaturas.

No es compatible con los metales alcalinotérreos.

Los residuos de descomposición del refrigerante son peligrosos, ya que puede formar ácidos que reaccionan con los metales.

Aplicaciones y beneficios

En aire acondicionado en edificios, control de temperatura ambiental y se utiliza en chillers de baja presión.

Reemplaza al R-11.

Bajo costo de operación.

Aceptado por los Fabricantes de Equipo Original (FEO).

El Protocolo de Montreal

Con la teoría que propusieron los científicos Rowland y Molina donde especificaban que la capa de ozono que protege la Tierra de los rayos ultravioletas está siendo dañada por gases que se emiten desde la tierra, años mas tarde otras instituciones científicas y visitas a los lugares afectados, confirmaron la teoría de que la capa de ozono esta siendo dañada con éste fenómeno descubierto, al cual se le dio el nombre de Ciencia del Ozono o Ciencia Atmosférica.

El 16 de septiembre de 1987 se firma el protocolo de Montreal, con el acuerdo de la regulación en la producción y consumo de sustancias que dañan la capa de ozono. El protocolo fue firmado y avalado por más de 100 naciones.

Dentro de las sustancias reguladas por el protocolo se encuentran las siguientes.

GRUPO I Anexo A	GRUPO Anexo B	GRUPO I
CFC-11	CFC-111	

CFC-12	CFC-112	Hidroclorofluorocarbonos (HCFC's), con hasta 3 carbonos en su molécula que contengan cloro y flúor
CFC-113	CFC-211	
CFC-114	CFC-212	
CFC-115	CFC-213	
	CFC-115	

Otras sustancias se encuentran en el grupo II donde se incluyen Tetracloruro de Carbono, Metilcloroformo, Bromuro de metilo y Halones, éstos son sustancias para sofocación de fuegos. La eliminación de los HCFC's en los países industrializados se comenzará en el año 2010 en la fabricación de equipo nuevo y para el 2020 en los ya existentes.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS PRELIMINAR DE VIABILIDAD

4.1. Criterios Medioambientales

Criterios medioambientales: reducción de las emisiones de CO₂

Introducción

La radiación solar que alcanza la superficie terrestre es parcialmente absorbida por ella, parcialmente reflejada y parcialmente rerradiada. Es decir, emitida de nuevo por la propia superficie, pero con longitudes de onda mayores que las de las radiaciones incidentes. La superficie de la Tierra se convierte, en un emisor de radiaciones que deben atravesar la atmósfera en sentido contrario al de las radiaciones incidentes. En su camino hacia el espacio atraviesan primero la troposfera, donde se encuentran con una serie de gases que absorben gran cantidad de ellas, y después la estratosfera donde el ozono absorbe otra parte de la radiación infrarroja emitida.

La radiación proveniente del sol que alcanza la superficie terrestre eleva la temperatura de ésta, mientras que la radiación rerradiada que escapa de la atmósfera enfría la Tierra. La temperatura media de la superficie terrestre es el resultado de un equilibrio entre las ganancias y las pérdidas de energía en forma de radiación. Cuanta más radiación rerradiada sea retenida por la atmósfera, más elevada será la temperatura superficial de la Tierra.

Es el mismo efecto de captación que tiene lugar en un invernadero de plantas. Los gases que provocan el efecto invernadero, al absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre son el CO₂, el vapor de agua, el ozono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y los derivados halogenados de los hidrocarburos saturados. Así el CO₂ es el principal responsable del efecto invernadero intensificado. Su producción se debe esencialmente a los procesos de combustión, a la respiración de los seres vivos y a la putrefacción de los tejidos orgánicos muertos. Hay que distinguir entre efecto invernadero natural y efecto invernadero intensificado, causado por el hombre.

Durante siglos la actividad humana no tuvo ningún efecto medible sobre la composición media de la atmósfera. A partir de las Segunda Guerra Mundial, la combustión de grandes cantidades de petróleo, y la deforestación incontrolada han dado lugar a la elevación de la concentración media del CO₂.

En los años 80^s los científicos que modelan el cambio climático alertaron de las consecuencias del aumento de temperaturas en la Tierra, de no haber un esfuerzo por reducir las emisiones de gases de invernadero, consecuencia de las actividades humanas.

Dado que una gran cantidad de las emisiones de CO₂, se puede atribuir a la producción y utilización de la energía eléctrica, el uso de tecnologías eficientes como la Bomba de Calor contribuirá a su disminución.

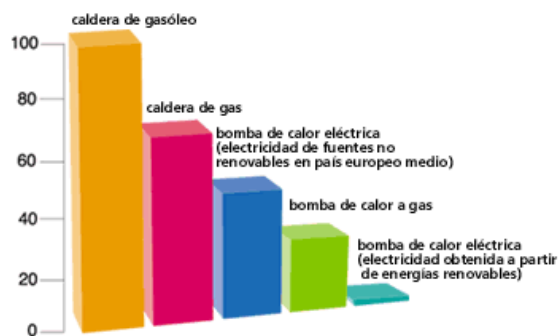
Estudio comparativo

Las Bombas de Calor ofrecen una clara ventaja en relación con el medio ambiente, si las comparamos con otros equipos de calefacción convencional, de acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (AIE), analizando el impacto medioambiental con las cinco opciones siguientes:

- Caldera convencional de gasóleo.
- Caldera convencional de gas.
- Bomba de Calor eléctrica, con electricidad obtenida en plantas de generación eléctrica convencional.
- Bomba de Calor a gas.
- Bomba de Calor eléctrica, con electricidad obtenida a partir de energías renovables.

Las emisiones de CO₂ originadas por las calderas y Bombas de Calor a gas, dependen de la eficiencia energética de estos equipos y del tipo de combustible empleado. En las Bombas de Calor eléctricas, la electricidad empleada para accionarlas, lleva implícita la emisión de CO₂ en origen, es decir, en las centrales de generación eléctrica, además, de las pérdidas de transporte y distribución de la energía eléctrica.

En la figura se observa, que tanto la Bomba de Calor eléctrica como la de gas, emiten considerablemente menos CO₂ que las calderas. Una Bomba de Calor eléctrica que funcione con electricidad procedente de fuentes de energías renovables no desprende CO₂.



emision relativa de co2 de diferentes sistemas de calefaccion.

Emisiones de CO₂ evitadas.

En el estudio antes citado, las emisiones de CO₂ evitadas en 1997, por el parque mundial de Bombas de Calor, han sido estimadas en un 0,5 % de las totales del globo, repartidas así:

- 64 millones de toneladas de CO₂ en el sector residencial.
- 54 millones de toneladas de CO₂ en el sector comercial e industrial.

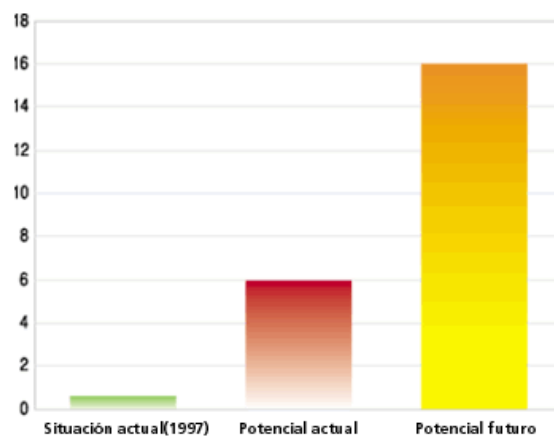
Sin embargo, el potencial actual que tienen las Bombas de Calor para reducir las emisiones de CO₂ del globo es muy superior a este 0,5%. Se estima en un 6%, lo que equivaldría a una reducción de 1.200 millones de toneladas de CO₂ al año, repartidas así:

- 1.000 millones de toneladas de CO₂ en el sector residencial y comercial.
- 200 millones de toneladas de CO₂ en el sector industrial.

Este potencial de reducción de emisiones de CO₂ es una de los mayores que puede ofrecer una única tecnología, con la ventaja de que se trata de una tecnología que ya está disponible en el mercado.

Perspectivas futuras

El actual potencial de reducción de emisiones de CO₂ por la Bomba de Calor, estimado en un 6%, podría llegar en un futuro próximo hasta el 16%, según la Agencia Internacional de la Energía. Se haría realidad, gracias a los desarrollos de la tecnología, que permitirían que las Bombas de Calor y las centrales de producción de energía eléctrica obtuvieran un rendimiento superior, y también por el incremento de la energía eléctrica obtenida a partir de energías renovables.



potencial de emisiones de co2 evitadas por bomba de calor

Hoy día los COP medios de las Bombas de Calor están entre el 2,5 y el 4. Para la próxima década se prevén nuevas mejoras que los incrementen. En consecuencia, las Bombas de Calor resultarán más atractivas y ocuparán una cuota mayor del mercado.

4.2. Rentabilidad de la Bomba de Calor

Eficiencia o rendimiento de una bomba de calor

La ventaja fundamental de la bomba de calor consiste en que es capaz de suministrar más energía de la que consume. Ésta aparente contradicción con uno de los principios más sólidos de la termodinámica, se explica por el hecho de que el equipo recupera energía "gratuita" del ambiente exterior.

Por ejemplo, una Bomba de Calor puede proporcionar a un local 2,5 Kwh. absorbiendo de la red tan solo 1 kWh. Los restantes 1,5 Kwh. se obtienen gratuitamente del aire exterior.

La figura representa un diagrama de bloques que ilustra la *eficiencia*, o en otras palabras el rendimiento, de una Bomba de Calor. Las cifras indicadas en la figura son:

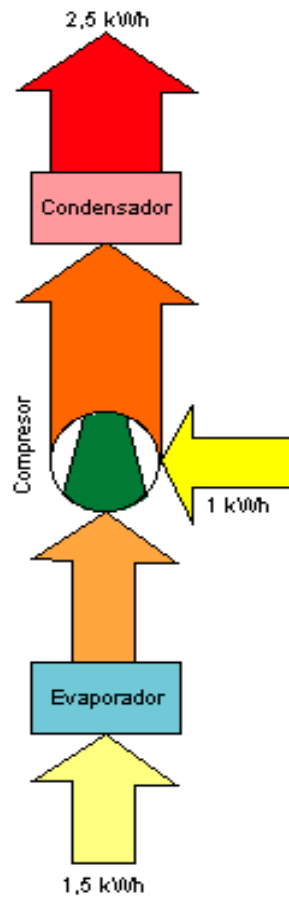
1. Energía total entregada por el condensador al local (2,5 Kwh.)
2. Energía "no gratuita" tomada de la red eléctrica por el compresor (1 Kwh.)
3. Energía "gratuita" tomada del aire exterior por el evaporador (1,5 Kwh.)

Eficiencia de una Bomba de Calor

La eficiencia de esta bomba de calor vendría expresada por el cociente entre la energía entregada al local (efecto útil) y la energía absorbida de la red eléctrica, es decir:

Eficiencia = 2,5

En consecuencia, la Bomba de Calor es potencialmente de gran interés para el usuario, dado que éste paga por una cantidad de energía menor que la aportada por el equipo para calentar el local.



Puede deducirse la conveniencia de utilizar equipos acondicionadores con Bomba de Calor, para su funcionamiento tanto en verano como en invierno. Además, un equipo con Bomba de Calor sólo supone, aproximadamente, un 20% de incremento, frente a la inversión necesaria para un acondicionador convencional exclusivamente para el verano.

CONCLUSIONES

Desde el comienzo de la industrialización la finalidad primordial es el desarrollo de técnicas de producción masiva, por lo que se han utilizado una gran diversidad de sistemas para abaratar los costos de los diferentes productos y materias primas para la realización de éstos. Dentro de las diferentes investigaciones desarrolladas; se han encontrado soluciones en cuanto al mejoramiento de sistemas que emitan contaminantes nulos y que su eficiencia sea muy superior a los que actualmente se tienen en funcionamiento masivo. Avances detenidos en su momento, debido a la obtención de energía, mediante la utilización de energéticos baratos y abundantes, que en la actualidad se consideran en vías de extinción por ser recursos naturales no renovables, y que hoy en día son considerados como el factor económico primordial en el incremento de los costos de producción. Los materiales también han jugado un papel determinante para el incremento de la eficiencia en los diferentes elementos constituyentes de cualquier maquina, debido al creciente conocimiento en nuevas aleaciones y mejoras en las propiedades de estos. Gracias a la producción en serie estos materiales son muy accesibles y de rentable durabilidad.

El desarrollo de la Bomba de Calor aporta soluciones energéticas y medioambientales acordes con la demanda de la época actual, Así como, el aprovechamiento de energías del entorno que se tenga ó de residuos de desecho en los diferentes procesos industriales. Se utiliza en el campo de la calefacción de viviendas, locales comerciales, enfriamiento y calentamiento de agua, refrigeración, así como, en distintos procesos industriales. Debido a lo compacto de los equipos no se requiere de cimentaciones especiales, instalaciones demasiado elaboradas o costosas, por si fuera poco la operación de estos equipos no requiere de conocimientos muy amplios o específicos.

El presente trabajo es con la finalidad de presentar una propuesta de tecnología propia, además de la aplicación real y posible apertura de un nuevo mercado nacional; que beneficie en la disminución de importación tecnológica y promueva el desarrollo continuo y sostenido para introducir y aportar nuestras ideas en un mercado nuevo para la mayoría de los países

La realización del diseño de un equipo implica el poseer conocimiento de los diferentes elementos existentes, así como, el funcionamiento de los componen que se agrupen de manera adecuada para satisfacer una necesidad; el proceso de diseño es muy amplio por lo que se pretende avocarse a un tipo específico de bomba de calor de servicio sanitario, que servirá como referencia para el diseño y aplicación en otros sistemas, se ira seleccionando y especificando los elementos constitutivos de éste; así como, la disposición e interrelación de sus componente.

El estudio de cada uno de estos elementos se efectuara de manera detallada explicando los criterios de selección y posibles restricciones que se pudieran presentar. Se comparara la funcionalidad para que sirva de parámetro entre los equipos existentes en el mercado además de ser acorde con los cálculos y teoría estudiada en la realización de nuestro diseño, que tiene que estar dentro de las características y precios existentes del mercado.

Con éste trabajo se contribuye a crear con un sistema más eficiente, no contaminante y a bajo costo en los servicios de agua sanitaria, propiciar la eliminación de: Almacenaje de gas natural o LP e instalación de líneas para el funcionamiento de un equipo calefactor de agua sanitaria. Además las ventajas en la utilización de las Bombas de Calor son:

- Minimizar los riesgos de accidentes con el manejo de combustibles volátiles
- Economizar el espacio utilizado en un equipo convencional de agua sanitaria.
- Proporcionar una fácil instalación
- Contribuir en la reducción de costos de funcionamiento en un sistema convencional de calentamiento.

Finalmente, las Bombas de Calor ofrecen una evidente ventaja sobre los equipos de calefacción convencionales, en cuanto a costo y a reducción de emisiones de CO₂.

Definiciones de Términos

- **ACS:**
Agua caliente sanitaria.

- **Aparato acondicionador de aire:**
Unidad que permite la refrigeración y eventualmente la calefacción de un espacio mediante su simple conexión a la red de energía eléctrica, sin requerir otras instalaciones adicionales o complementarias para su correcto funcionamiento.

- **Bomba de calor:**
Máquina térmica que permite transferir calor de una fuente fría a otra más caliente.

- **Climatización:**
Proceso de tratamiento de aire que se efectúa a lo largo de todo el año, controlando, en los espacios interiores, su temperatura, humedad, pureza y movimiento.

- **Coefficiente de eficiencia energética de un aparato (CEE):**
Cociente entre la potencia térmica total útil y la potencia total absorbida para unas condiciones de funcionamiento determinadas.

- **Coefficiente de prestación de un sistema (COP):**
Relación entre la energía térmica cedida por el sistema y la energía de tipo convencional absorbida.

- **Energía convencional:**
Aquella energía tradicional, normalmente comercializada, que entra en el cómputo del producto interior bruto.

- **Energía residual:**
Energía que se puede obtener como subproducto de un proceso principal.

- **Expansión directa:**
Proceso de tratamiento de aire efectuado por evaporaciones del fluido frigorígeno en el circuito primario de una batería.

- **Instalación unitaria:**
Son aquellas en las que cada elemento es un generador de frío o calor independiente.

- **Instalaciones individuales:**
Son aquellas instalaciones no unitarias, en las que la producción de frío o calor es independiente para cada usuario.

- **Instalaciones colectivas:**

Son aquellas instalaciones centralizadas en las que la producción de frío o calor sirve a un conjunto de usuarios dentro de un mismo edificio.

- **Instalaciones semicentralizadas:**

Son aquellas instalaciones individuales realizadas con equipos autónomos dotados de una red de conductos de distribución de aire.

- **Potencia calorífica útil de una Bomba de Calor:**

Producto del caudal másico del fluido portador por el salto de entalpía a través del condensador, en las condiciones de funcionamiento que se especifiquen.

- **Refrigeración:**

Proceso de tratamiento de aire que controla, al menos, la temperatura máxima de un local.

- **Sistemas agua-aire:**

Técnica de acondicionamiento en la que la distribución de la energía térmica a diversos locales se realiza mediante circuitos de agua y aire.

- **Sistema centralizado:**

Instalación en la que la producción de frío o calor se realiza centralmente distribuyéndose a diversos subsistemas o equipos terminales que actúan sobre las condiciones ambientales de locales o zonas diferentes.

- **Sistema todo agua:**

Técnica de acondicionamiento en la que la distribución de la energía térmica se realiza exclusivamente mediante agua.

- **Sistema todo aire:**

Técnica de acondicionamiento en la que la distribución de la energía térmica a diversos locales se realiza exclusivamente mediante aire.

- **Unidad compacta:**

Equipo autónomo totalmente montado en fábrica.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1) HERNÁNDEZ GORIBAR, Eduardo, **Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración**, Ed. Limusa, México, 1ra. Edición.
- 2) BORGES H., Jennings, **Aire Acondicionado y Refrigeración**. Ed. Continental. México, 8va edición.
- 3) KREITH, Frank y BOHN, Mark S, **Principios de Transferencia de Calor**, Ed. Thomson - Learning. México, Sexta Edición.
- 4) GUTIERREZ ORTIZ, César y PATIÑO SANTANDER, Felipe, **Fundamentos de Termodinámica y Fluidos**, Ed. Universidad Autónoma de Chapingo, México, 1ra. Edición.
- 5) MONASTERIO LARRINAGA, Román, **La Bomba de Calor: Fundamentos, Técnicas y Aplicaciones**, 1993.
- 6) BLACK W. Z, **Termodinámica**, Ed. CECSA. México 1989.
- 7) CONGEI Y.A. & M.A. Boles, **Termodinámica** 1996.
- 8) FAIRES, V.M. & C.M. Simmang, **Termodinámica**, Ed. Limusa. México, 1996.
- 9) HOWELI J. R. & R. O. Buckklus, **Principios de Termodinámica Para Ingenieros**. Ed, Mc Graww. Hill, México, 1990.
- 10) JONES J. B. & R. E. Dugan, **Ingeniería Termodinámica**, Ed. Preentice Hall. México, 1997.
- 11) MANRIQUE J. A. & R. S. Cárdenas, **Termodinámica**, Ed. Harla, México, 1976.
- 12) RUSELL L. D. & G. A. Adebly, **Termodinámica Clásica**, Ed. Addison Wesley, 1997.
- 13) VAN WYLEN G. J. & R. E. Sonntag, **Fundamentos de termodinámica**, Ed. Limusa, México, 1997.
- 14) WARK K, **Termodinámica**, Ed. Mc Graww Hill, México, 5ta. Edición, 1991.