

# “El uso del CO2 como refrigerante en centrales frigoríficas”

*PECOMARK*

Jordi Cabello  
Albert Albert

## **INDICE:**

- 1. Propiedades termodinámicas del CO<sub>2</sub>.**
  - 1.1- Presiones de trabajo**
  - 1.2- Punto crítico**
  - 1.3- Línea triple**
    - 1.3.1 Fugas en instalaciones**
    - 1.3.2 Evacuación en válvula de seguridad**
  - 1.4- Seguridad**
  - 1.5- Entalpías de evaporación**
  - 1.6- Temperatura de descarga**
- 2. Uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante.**
  - 2.1. Diseños frigoríficos**
    - 2.1.1. Sistemas transcíticos.**
    - 2.1.2. Sistemas subcríticos**
      - 2.1.2.1. CO<sub>2</sub> como fluido secundario**
      - 2.1.2.2. Sistemas tipo cascada**
  - 2.2. Presión de diseño del sistema.**
  - 2.3. Tuberías**
  - 2.4. Carga del sistema.**
  - 2.5. Mezcla Aceite-CO<sub>2</sub>.**
- 3. Centrales frigoríficas tipo cascada con CO<sub>2</sub>.**
  - 3.1. Compresores**
    - 3.1.1. Gama de compresores Bitzer. Características.**
    - 3.1.2. Gama de compresores Frascold. Características.**
  - 3.2. Intercambiadores**
    - 3.2.1. Evaporadores**
    - 3.2.2. Condensadores**
    - 3.2.3. Intercambiadores de calor.**
  - 3.3. Válvulas de expansión**
  - 3.4. Recipiente de líquido.**
  - 3.5. Sistema de aceite.**
  - 3.6. Valvulería.**
  - 3.7. Detectores de CO<sub>2</sub>.**

## 1. Propiedades termodinámicas del CO<sub>2</sub>.

### 1.1 Presiones de trabajo

La principal característica que condicionará el diseño de una instalación de CO<sub>2</sub> son las elevadas presiones a las que opera el circuito.

Comparando el CO<sub>2</sub> con otros refrigerantes utilizados habitualmente en el campo de la refrigeración comercial e industrial, se observa que la presión de saturación de este está muy por encima del resto en cualquier rango de temperaturas, especialmente en las de condensación.

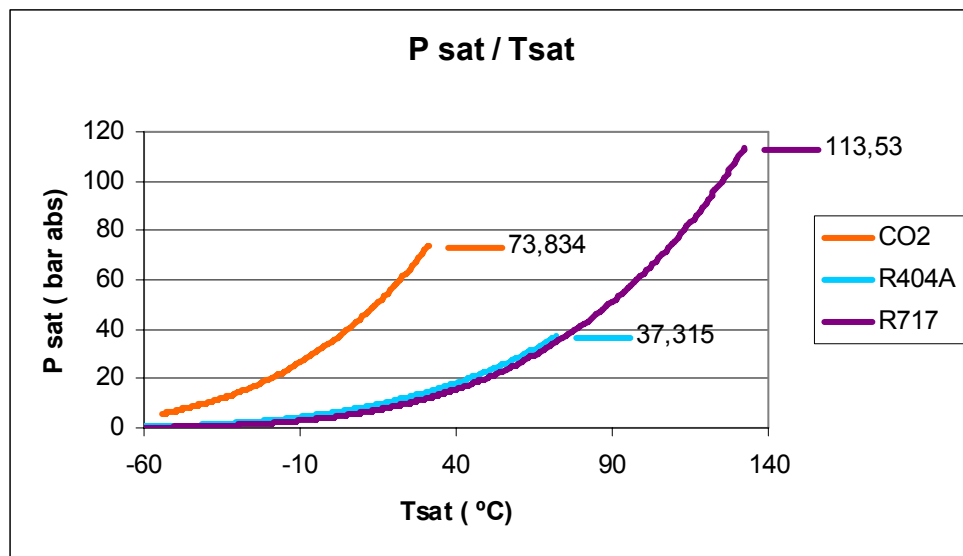


Fig 1.1 Presión de saturación en función de la temperatura de saturación

¿Porqué los datos que se obtienen están limitados hasta diferentes temperaturas según el refrigerante?

Esto es debido a la existencia de puntos que limitan el proceso de “condensación/evaporación”. Por la parte baja las curvas están limitadas por el punto triple, que marca el límite entre el equilibrio líquido/vapor y el equilibrio sólido/vapor. Los procesos de evaporación y condensación se refieren a cambios de estado entre líquido y vapor.

Por la parte alta las curvas se ven limitadas por el punto crítico, a partir del que no se puede distinguir entre sólido y líquido. Por este motivo no existe condensación.

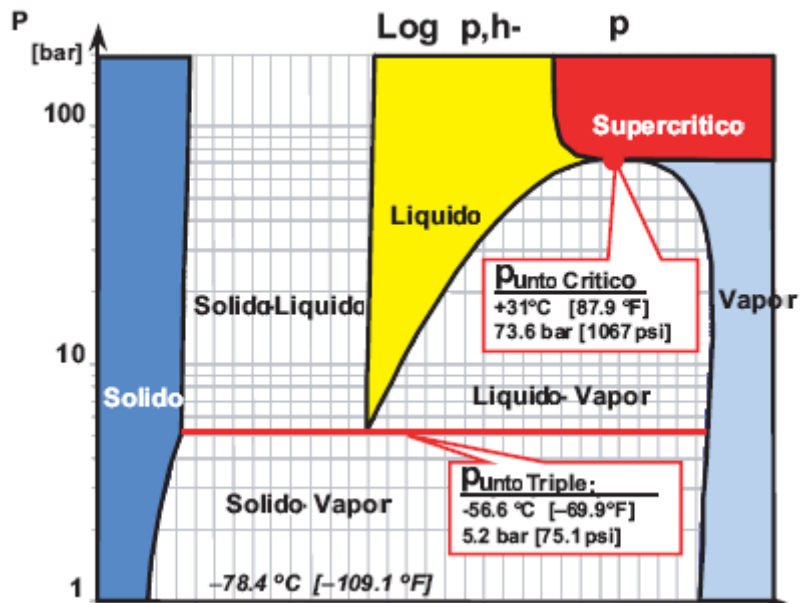


Fig. 1.2 Diagrama Log p – entalpia para el CO<sub>2</sub>

### 1.2 Punto crítico

Estado de presión y temperatura a partir del que no se puede distinguir entre líquido y vapor. Justo en ese punto, las densidades de las 2 fases son iguales. Si se sigue aumentando la presión o la temperatura, el fluido se encontrará en estado supercrítico.

### 1.3 Línea triple

Franja en la coexisten las 3 fases. Cabe destacar la elevada presión a la que se encuentra ésta línea para el CO<sub>2</sub> (5,2 bares abs.), encontrándose en el camino de cualquier expansión que se produzca hasta presión atmosférica ( 1 bar abs.)

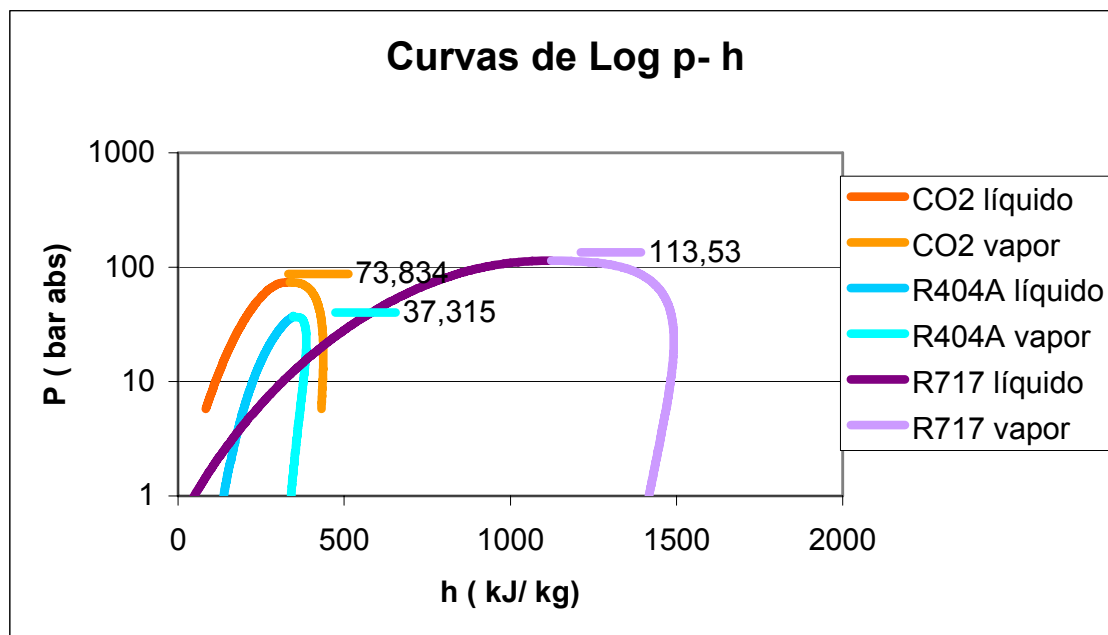


Fig. 1.3 Curvas de equilibrio líquido-vapor para diferentes refrigerantes

Comparando las zonas de cambio de fase para los diferentes refrigerantes se observa:

- 1- La presión de la línea triple para el  $\text{CO}_2$  es mucho más elevada que para el R404A o el amoníaco. Para estos últimos, está situada por debajo del vacío relativo (1 bar abs.)
- 2- La entalpía de evaporación para el amoníaco en general mucho más elevada.

#### Particularidades de la línea triple

Cualquier fuga de refrigerante a la atmósfera representa una expansión hasta una presión de 0 bares relativos (1 bar abs). Este hecho provocará la aparición de sólido en el  $\text{CO}_2$ , cosa que no sucederá para el R404A y amoníaco.

#### **1.3.1 Fuga en una tubería**

Se ha comprobado que una fuga en una línea de líquido (representada por una pequeña válvula de bola) se puede auto-sellar debido a la formación de sólido en el proceso de expansión. Todo esto con una mínima fuga de refrigerante.

### 1.3.2 Evacuación a través de una válvula de seguridad

La evacuación al ambiente en caso de emergencia representa una expansión por debajo del punto triple. La habitual colocación de la válvula en el recipiente de líquido asegura que la expansión del CO<sub>2</sub> generará una proporción mínima de sólido. Debido a este hecho, en el caso de que el fluido a expulsar fuera líquido este taponaría con seguridad el orificio de la válvula.

Por lo tanto, se debe asegurar que nunca puede circular líquido a través del orificio de la válvula de seguridad.

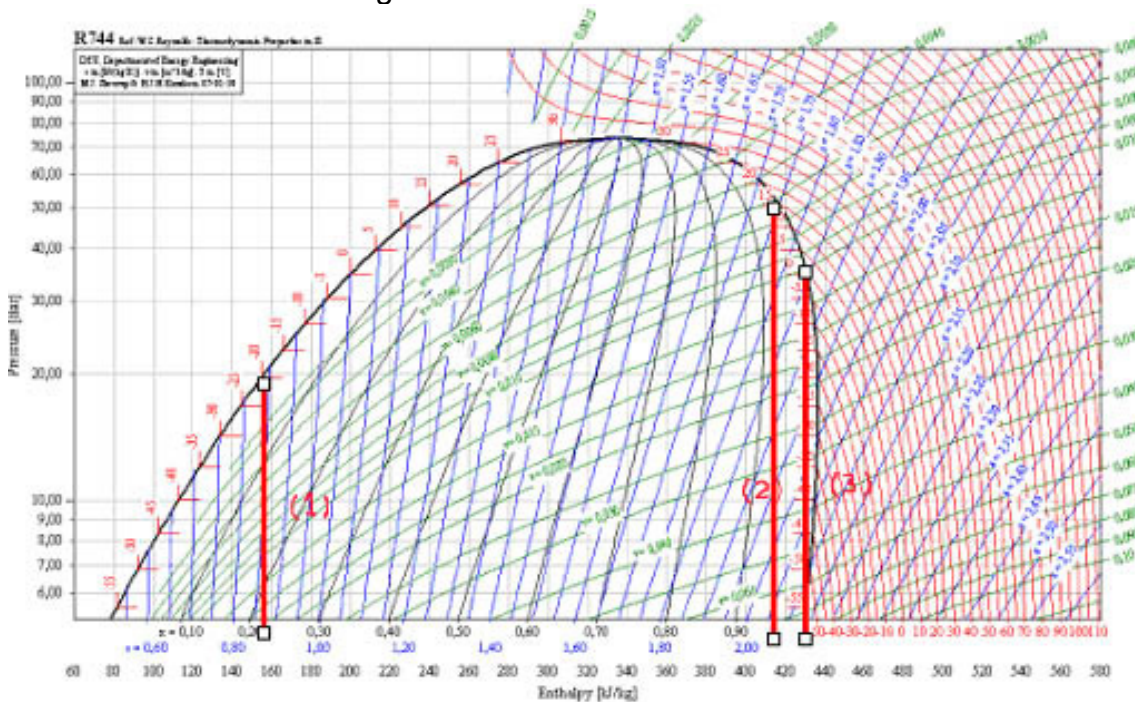


Fig. 1.4 Diferentes evacuaciones a través de la válvula de seguridad

La 1ª expansión (línea 1) se produce en una línea de líquido, desde una presión de 20 bares, esto generaría una presencia del 50 % de sólido en masa en el orificio de expansión. Debido a este efecto, puede llegar a sellar una fuga.

La 2ª expansión (línea 2) se podría producir en una válvula de seguridad a 50 bares, y generaría un 3 % de sólido en el orificio de la válvula de seguridad. En el caso de la 3ª expansión (línea 3), desde una presión de 35 bares no se generaría sólido al final de la expansión.

### 1.4- Seguridad

El CO<sub>2</sub> es más pesado que el aire, por lo que tiende a caer al suelo. Este hecho puede resultar muy peligroso (especialmente en espacios reducidos), ya que al no ser auto-alarmanente (como en amoníaco) puede desplazar el oxígeno hasta límites nocivos para la salud. Ello conlleva la necesidad de una especial atención a la detección de fugas y la ventilación de emergencia.

## Concentraciones de CO2 en el aire y sus efectos

%	Efectos
0.04 %	Concentración en el aire atmosférico
2%	50% de incremento en el ritmo respiratorio
3%	Tiempos cortos de 10 min de duración límite, incrementan el ritmo respiratorio un 100%.
5%	Incremento del ritmo respiratorio un 300%, después de una hora pueden aparecer dolores de cabeza y sudores
8%	Exposición límite a tiempos muy cortos
8-10%	Dolor de cabeza después de 10 o 15 minutos. Mareos, vértigo, zumbido de oídos y aumento de la tensión, pulso, excitación, vómitos.
10-18%	Después de una exposición corta aparecen ataques epilépticos, pérdida de conciencia, y shock. ( las víctimas se recuperan rápidamente en aire fresco)
18-20%	Síntomas similares a los de una trombosis.

### 1.5- Entalpías de evaporación

Los valores observados en las diferentes curvas de cambio de fase, se pueden comparar los valores de entalpías de evaporación a diferentes temperaturas.

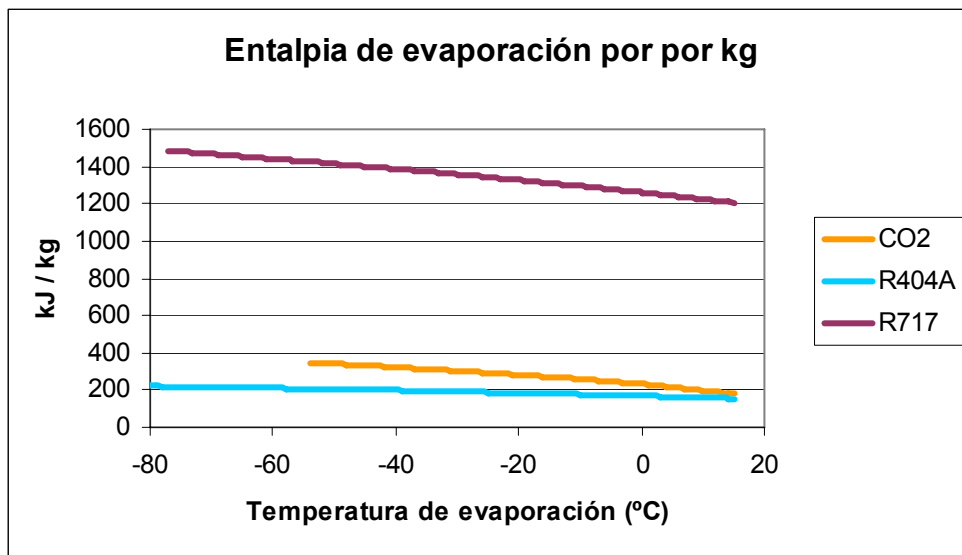


Fig. 1.5 Entalpía de evaporación para diferentes refrigerantes

### Densidad del CO2

La densidad del CO2 es mucho más elevada que para otros refrigerantes este hecho tiene diferentes consecuencias.

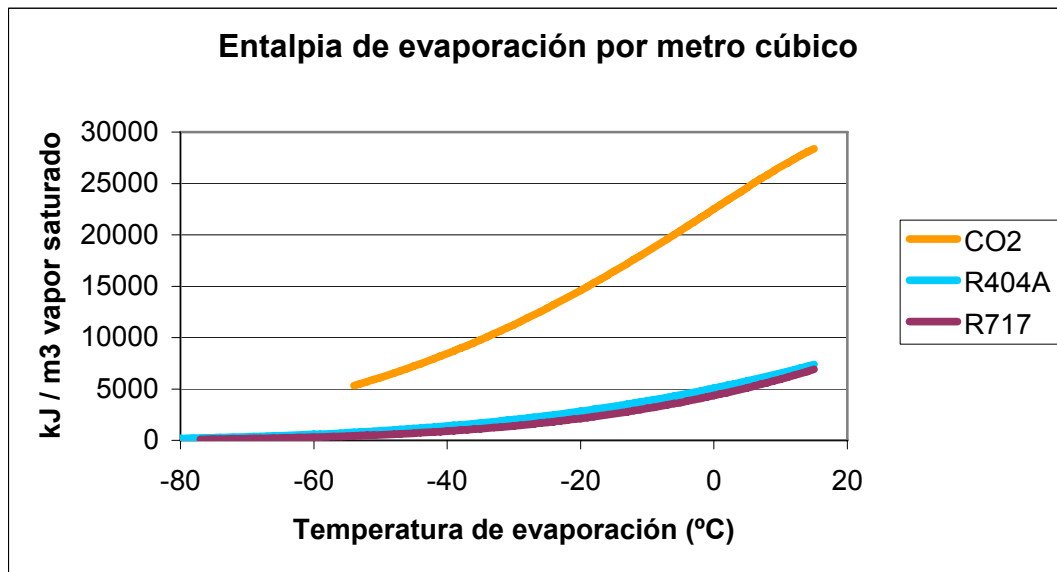


Fig 1.6 Entalpía de evaporación por m<sup>3</sup>

A causa de la mayor densidad del CO<sub>2</sub>, el volumen desplazado para obtener la misma potencia de refrigeración es mucho más pequeño. Eso conlleva:

- Compresores de menor tamaño ( cilindrada)
- Menor cantidad de refrigerante en la instalación
- Menor tamaño de recipiente y líneas

Este hecho viene acompañado por una título de vapor al final de la expansión no muy elevado. Comparando un ciclo en cascada [-50/-5°C] en los tres refrigerantes, el título final de la expansión es:

	CO2	R404A	R717
Xvapor	0,25	0,27	0,15

### 1.6- Temperatura de descarga

La compresión de cualquier gas, conlleva un aumento de la temperatura de este por encima de la de saturación a la presión final. La compresión de CO<sub>2</sub> en un ciclo en cascada [-50/-5°C], puede llevarlo a temperaturas de descarga cercanas a los 80°C.

	CO2	R404A	R717
T descarga(°C)	55	10	103



## 2. Uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante.

### 2.1. Diseños frigoríficos.

Las elevadas presiones de trabajo del CO<sub>2</sub>, tal como se ha visto en el punto 1, así como su punto triple situado a 31,06 °C, llevan a diseños frigoríficos sustancialmente distintos de los circuitos frigoríficos más habituales.

Fundamentalmente los circuitos frigoríficos con CO<sub>2</sub> se dividen en 2 categorías:

- Circuitos transcíticos: la parte de alta presión del circuito se sitúa por encima del punto crítico (fig. X).
  - o El CO<sub>2</sub> en el lado de alta presión no se condensa, sino que se desrecalienta.
  - o Las presiones del lado de alta se sitúan del orden de los 100 bar.
- Circuitos subcríticos: la parte de alta presión de circuito se sitúa por debajo del punto crítico (fig. Y).
  - o El CO<sub>2</sub> en el lado de alta presión se CONDENSA.
  - o Las presiones del lado de alta se sitúan del orden de 30 bar (-5°C).

En esta ponencia el análisis se centrará sobre los circuitos subcríticos, al ser éstos los más inmediatamente realizables con la tecnología y conocimientos actualmente disponibles.

#### 2.1.1. Sistemas transcíticos.

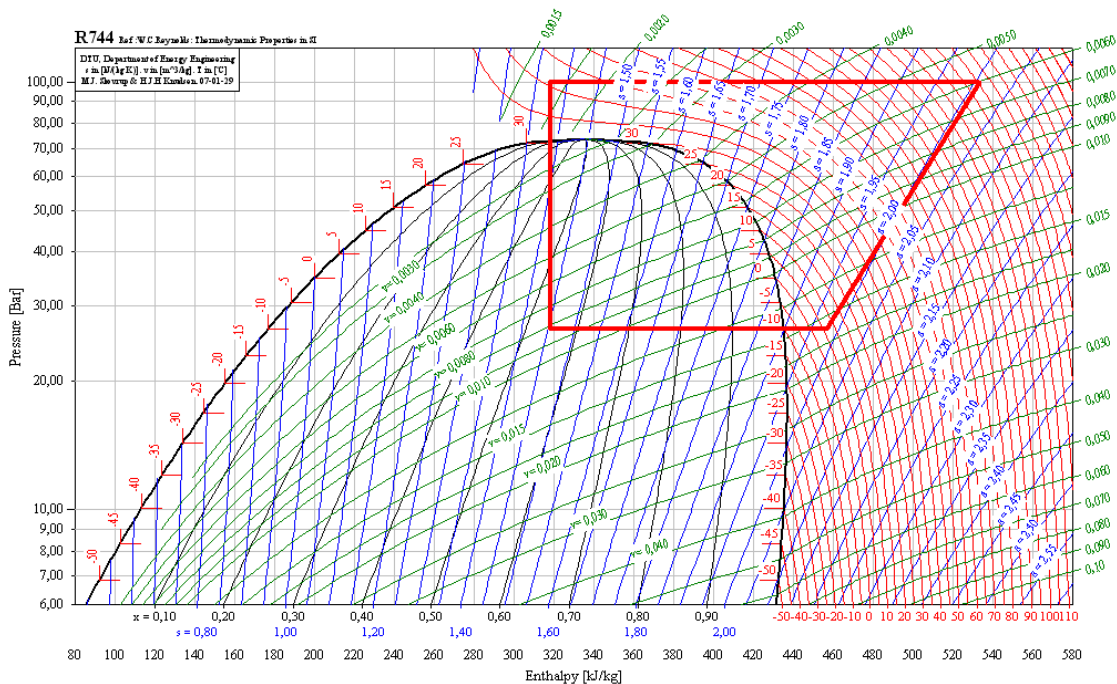


Fig. 2.1. Ciclo transcítico de CO<sub>2</sub>.

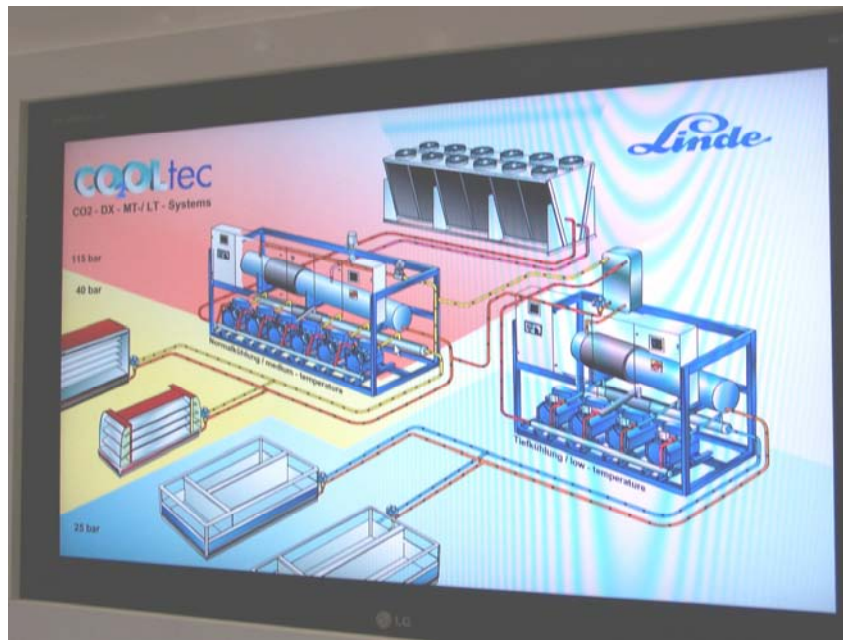


Fig . 2.2. Instalación de CO<sub>2</sub> transcrito.

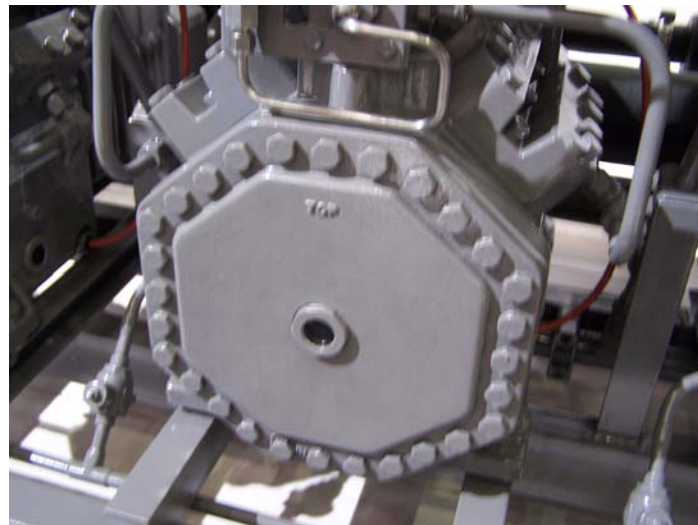


Fig. 2.3. Compresor Bitzer para aplicaciones con CO<sub>2</sub> transcrito.

## 2.1.2. Sistemas subcríticos.

### 2.1.2.1. CO<sub>2</sub> como fluido secundario.

Este tipo de diseño representa la forma más sencilla de aplicación del CO<sub>2</sub> con la tecnología actual puesto que en este tipo de diseño el CO<sub>2</sub> se utiliza como si fuera un refrigerante secundario, ya que es bombeado y no comprimido.

Una máquina frigorífica (R-404A, R-717,...) es la encargada de recondensar el CO<sub>2</sub> que se evapora parcialmente en los evaporadores y una vez condensado se almacena en un depósito de CO<sub>2</sub>.

El sistema consta de los siguientes elementos principales:

- (1) Estación de bombeo de CO<sub>2</sub>.
- (2) Sistema de Enfriamiento/condensación de CO<sub>2</sub>.
- (3) Depósito de acumulación de CO<sub>2</sub>.
- (4) Evaporadores de CO<sub>2</sub>.

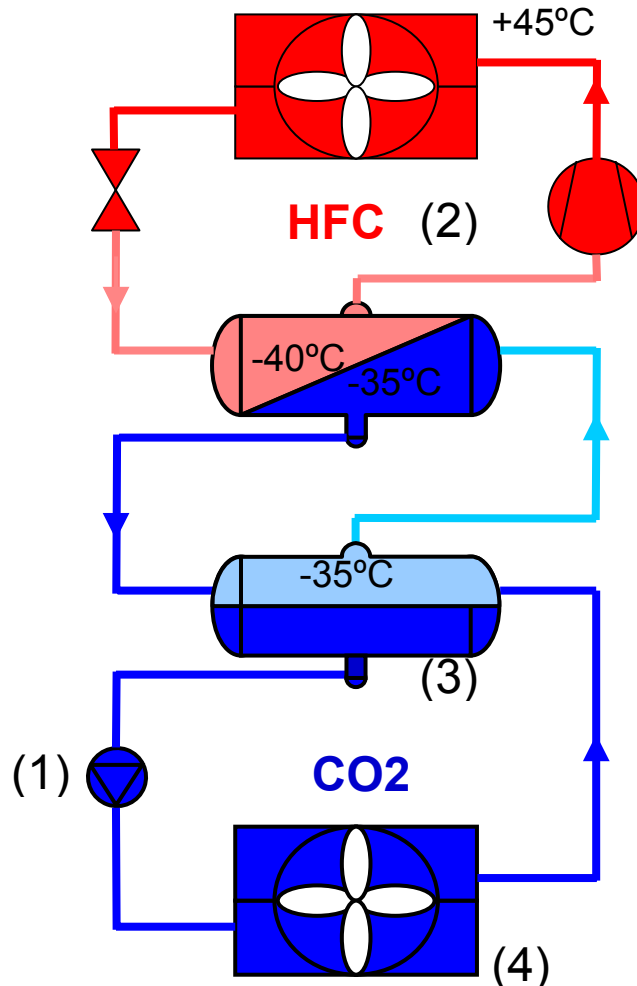


Fig. 2.4. Esquema instalación de CO<sub>2</sub> como fluido secundario.

### 2.1.2.2. Instalaciones tipo cascada.

En las instalaciones tipo cascada existe un circuito frigorífico primario (R-404A, R-717,...) el evaporador del cual es a su vez el condensador del circuito frigorífico secundario que funciona con CO<sub>2</sub>.

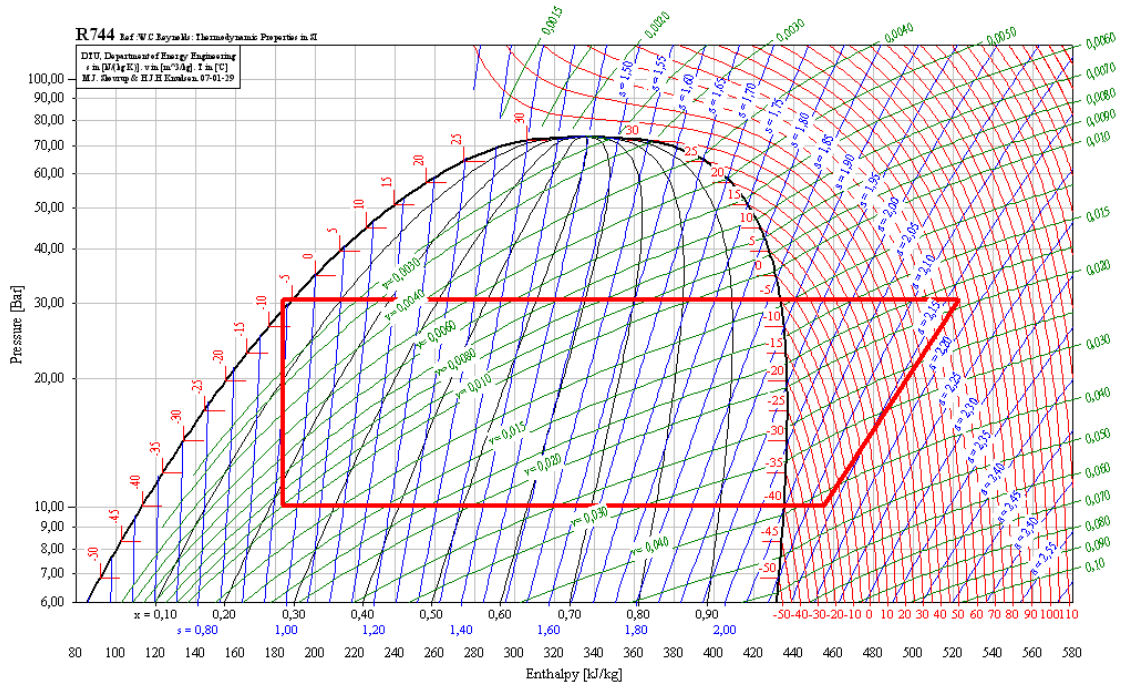


Fig. 2.5. Ciclo subcrítico de CO<sub>2</sub>.

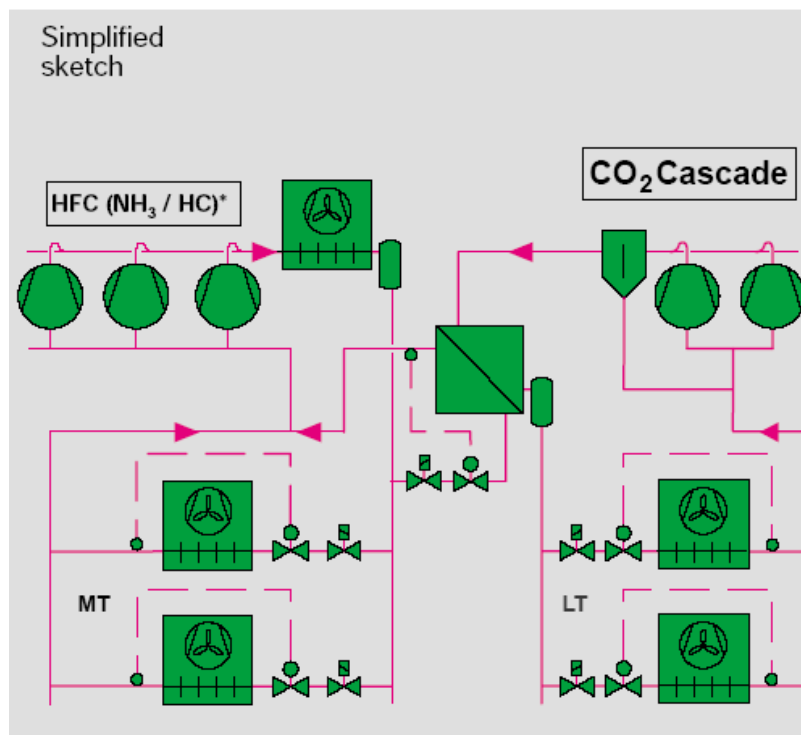


Fig. 2.6. Esquema instalación subcrítica de CO<sub>2</sub>.

## 2.2. Presiones de diseño de instalaciones frigoríficas de CO2.

Las presiones de diseño de las instalaciones de CO2 dependen del tipo de instalación de la que se trate, según la clasificación en el punto anterior.

No obstante, existe un cierto consenso entre los distintos fabricantes de materiales frigoríficos para CO2 en las siguientes presiones de diseño:

PS (presión de servicio)	Lado alta presión	Lado baja presión
Instalación transcrito	115 bar	25 bar (50 bar)
Instalación subcrítico	40 bar (50 bar)	25 bar (50 bar)

Nota: entre paréntesis PS en caso de desescarche por gases calientes.

## 2.3. Tuberías para sistemas de CO2.

El CO2 como gas inerte que es, resulta compatible con la totalidad de los metales, por lo que las tuberías para los sistemas de CO2 pueden utilizarse de:

- Cobre
- Acero negro
- Acero Inoxidable

La única condición es que soporten las presiones de diseño indicadas en el apartado anterior.

En lo que se refiere a las tuberías de cobre de uso frigorífico, a continuación indicamos las presiones de trabajo nominales de las mismas en función de su diámetro nominal exterior y su espesor nominal:

Diámetro exterior nominal (mm)	Espesor nominal en mm					
	0,75	1	1,2	1,5	2	2,5
	Presión de trabajo en kg/cm2					
6	147	220				
8	102	146				
10	78	110				
12	63	88				
15	49	68				
18	40	55				
22		44	53	69		
28		33	41	53		
35		27	32	41		
42		22	27	34		
54			20	26		
63				22	29	
80				17	23	
100					18	23

Según los valores indicados en la tabla, las tuberías estandares en cobre pueden ser utilizadas hasta un diámetro de 22 mm (7/8") en instalaciones con presiones de diseño de 40 bar en el lado de alta presión.

Nota: los valores de presión de trabajo de la tabla no deben ser confundidos con las presiones máximas admitidas por las tuberías de cobre, los cuales se sitúan muy por encima de los valores tabulados.

La presencia de agua en el sistema puede provocar la formación de ácido carbónico que ataca el acero. La acción del ácido carbónico sobre el cobre es muy lenta y puede considerarse despreciable. El acero inoxidable por el contrario no se ve atacado por éste

#### **2.4. Carga de los sistemas de CO2.**

La carga de CO2 de los sistemas de refrigeración que funcionan con este refrigerante es uno de los puntos que le confieren una peculiaridad mayor en comparación con los refrigerantes utilizados en la actualidad.

La peculiaridad reside, como se ha visto en el punto 1, en la posición de su punto triple a una presión de 5,2 bar. Si se realizara la carga en fase líquida de CO2 contra un sistema al que hemos realizado en vacío, inmediatamente se nos formará dentro del sistema "nieve carbónica", en estado sólido lo cual nos impediría seguir con el proceso.

Por tal motivo, debe procederse a una carga inicial del sistema con fase exclusivamente gaseosa hasta superar el punto triple (presión de refrigerante en el sistema superior a 5,2 bar).

Posteriormente puede continuarse con la carga en fase líquida. Debido a la alta presión del CO2 en las botellas, siempre debe realizarse la carga a través de un manoreductor. Este hecho provoca una alta evaporación del refrigerante líquido a la salida de la botella. Por este motivo resulta muy positivo enfriar las botellas de CO2 cuando se debe proceder a la carga con líquido. De esta forma se consigue:

- menor evaporación del CO2 líquido.
- Menor aumento de la presión en el sistema.

Para evitar un rápido aumento de la presión en el sistema, deberá además ponerse en marcha la máquina frigorífica que realiza la condensación del CO2.

#### **2.5 Mezcla aceite-CO2.**

El aceite lubricante utilizado en los sistemas de CO2 es de tipo polioléster (POE).

Es un aceite miscible con el CO2, lo que beneficia el retorno de aceite al compresor.

No obstante, la alta solubilidad (capacidad de mezcla con la fase gaseosa) que presenta con el CO<sub>2</sub> requiere algunas precauciones de uso:

- Obligatorio el uso de resistencias de cárter en los compresores.
- Temperaturas de aceite mínimas de 30°C (20°C).

EL POE es un aceite higroscópico por lo que deben observarse las mismas precauciones que con los aceite POE usados para los HFC.

### 3. Centrales frigoríficas tipo cascada con CO<sub>2</sub>.

En este punto realizaremos un análisis de los distintos materiales frigoríficos necesarios para la realización de una central frigorífica tipo cascada con CO<sub>2</sub>.

#### 3.1. Compresores

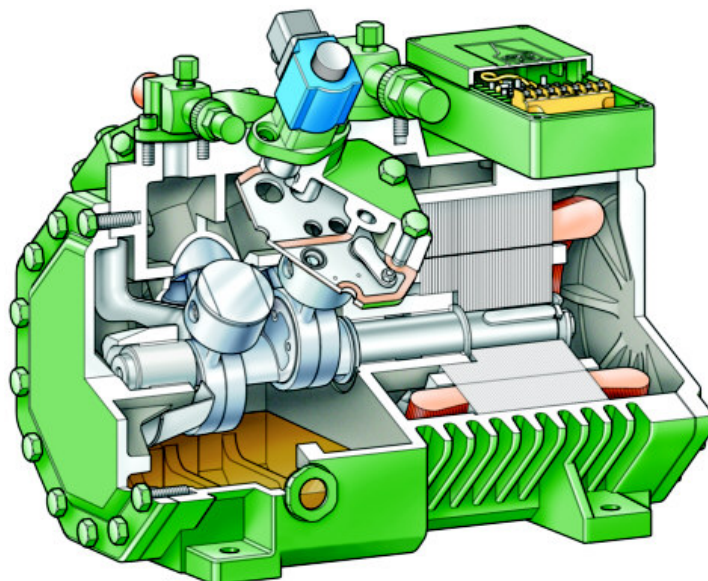
##### 3.1.1. Gama de compresores Bitzer Serie K. Características.

Actualmente la gama de compresores Bitzer Serie K para aplicaciones subcríticas con CO<sub>2</sub> abarca 16 modelos de compresor desde 2,71 a 46,9 m<sup>3</sup>/h de desplazamiento.

La potencia frigorífica va desde 4,8 kW hasta 86,5 kW a -35/-5°C.

Las características principales de estos compresores son:

- Sistema de lubricación por bomba centrífuga.
- Amortiguador de pulsaciones integrado en descarga
- Platos de válvulas especialmente diseñados para CO<sub>2</sub>.
- Sistema de transmisión resistente al desgaste con rodamientos revestidos multi-capa perfeccionados.
- Carga de aceite POE específico.
- Cuerpo de alta resistencia a la presión si tapa de fondo para presiones de servicio máximas de 40 bar en alta presión.



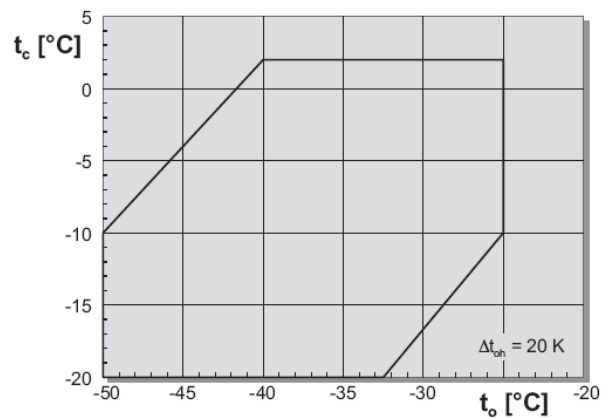


Fig 3.1. Campo de aplicación de los compresores Bitzer serie K

### 3.1.2. Gama de compresores Frascold Serie SK. Características.

La gama de compresores Frascold Serie SK para aplicaciones subcríticas con CO2 consta de 9 modelos de compresor desde 3,95 a 32,8 m<sup>3</sup>/h de desplazamiento.

La potencia frigorífica va desde 6,1 kW hasta 52,5 kW a  $-35/-5^{\circ}\text{C}$ .

Las características principales de estos compresores son:

- Diseño optimizado para soportar altas presiones de trabajo y estáticas.
- Platos de válvulas especialmente diseñados para CO2.
- Nuevos motores de alta eficiencia
- Carga de aceite POE específico.
- Amplio campo de aplicación.





## 3.2. Intercambiadores de calor

### 3.2.1. Evaporadores.

Existen diversos fabricantes que ofrecen o van a sacar al mercado dentro de poco gamas de evaporadores preparadas para CO<sub>2</sub>.

Por ejemplo, Guntner ofrece 2 series de evaporadores:

- Serie CXGHN: presión de trabajo hasta 28 bar.
  - o Construcción: cobre y aluminio
  - o Desescarche: eléctrico (posibilidad de reforzarlo hasta  $-50^{\circ}\text{C}$ ).
  - o Coeficiente K: 33 W/m<sup>2</sup>K a  $-40^{\circ}\text{C}$
  - o Gama de 1 a 3 ventiladores con palas desde  $\varnothing 400$  hasta  $\varnothing 800$  mm.
  
- Serie CPGHN: presión de trabajo hasta 50 bar.
  - o Construcción: acero inoxidable y aluminio.
  - o Desescarche: eléctrico, agua y posible gas caliente.
  - o Coeficiente K: 28 W/m<sup>2</sup>K a  $-40^{\circ}\text{C}$ .
  - o Gama de 1 a 3 ventiladores con palas desde  $\varnothing 400$  hasta  $\varnothing 800$  mm.



### 3.2.2. Condensadores.

Como se ha dicho en el punto 2, en los sistemas de CO2 tipo cascada, el condensador de CO2 es el evaporador del sistema frigorífico primario que funciona con R-404A o R-717.

Por este motivo, los condensadores de CO2 en estos sistemas son de los tipos:

- Multitubular.
- De placas.
- Tubo en tubo para pequeñas potencias.

En los condensadores de placas o de tubo en tubo, además de las presiones de trabajo necesarias es muy importante tener en cuenta la presión de colapso de los tubos si el CO2 circula por fuera de ellos.

### 3.2.3. Intercambiadores de calor.

En las instalaciones de tipo cascada para CO2 es muy importante la inclusión de un intercambiador de calor entre la línea de líquido y la de aspiración. Los motivos son:

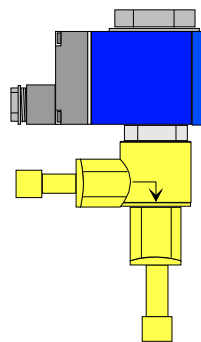
- Debido a la temperatura negativa que tenemos incluso en la sección de alta del circuito de CO2, las entradas de calor en la línea de líquido pueden llegar a provocar flash-gas. El intercambiador genera un subenfriamiento adicional que evita este fenómeno.
- Por la alta solubilidad del refrigerante en el aceite lubricante, es necesario asegurar un recalentamiento mínimo para evitar que el aceite quede muy diluido y pierda sus propiedades lubricantes.

Los tipos de intercambiador usados preferentemente son los coaxiales.

### 3.3. Válvulas de expansión.

Las válvulas de expansión utilizadas para CO2 son de tipo electrónico.

Danfoss y Siemens tienen válvulas de este tipo preparadas para CO2.



### **3.4. Recipientes de líquido.**

Los recipientes de líquido de los sistemas de CO2 son comparativamente de menor volumen que en los sistemas con HFC o Amoniaco, debido al menor caudal volumétrico que se necesita para la misma potencia.

Los recipientes de líquido deben estar diseñados para las presiones de trabajo necesarias.

Resulta muy práctico disponer en el recipiente de líquido de un serpentín interior para conectar una unidad condensadora accionada por alguna energía disponible en caso de emergencia, para evitar el aumento de presión del sistema en caso de fallo eléctrico.

También, debido a las temperaturas de condensación , pueden utilizarse niveles de tipo escarachable para conocer el nivel del líquido en el recipiente.

### **3.5. Sistema de aceite.**

El sistema de aceite de una central de CO2 tipo cascada es muy similara al sistema de aceite de una central de pistones convencional. Consta de los siguientes elementos:

- Separador de aceite
- Acumulador de aceite despresurizado.
- Válvula de despresurización
- Niveles (boyas) de aceite de tipo electrónico.

Debido a la alta solubilidad del CO2 en el aceite, el sistema de acumulador despresurizado es único recomendable.

Los niveles de aceite de tipo electrónico aportan una seguridad de funcionamiento adicional en estos sistemas, al incorporar, además del nivel de trabajo, un nivel de alarma mínimo y un nivel de alarma máximo (evitando el eventual sobrellenado en aceite del compresor).

### **3.6. Valvulería y componentes de línea.**

Existe ya hoy en el mercado una importante variedad de materiales para valvulería y componentes de línea adaptados para el funcionamiento con CO<sub>2</sub>.

En este sentido, indicar que algunas válvulas disponibles con HFC y/o amoníaco son válidas para el uso en sistemas con presión de diseño de 40 bar.

Referente a los componentes de línea:

- Filtros de líquido
- Visores
- Solenoides

Es importante verificar con el fabricante su compatibilidad con este nuevo refrigerante.

Es especialmente importante la función del filtro deshidratador, que debe ser de gran dimensión y de 3 A para asegurar una buena deshidratación del circuito, que si no se garantiza, puede provocar la formación de cristales de hielo y posteriormente, ácido carbónico.

### **3.7. Detectores de CO<sub>2</sub>.**

El CO<sub>2</sub> es un gas incoloro e inodoro, pero que resulta asfixiante por desplazamiento del oxígeno.

Es más pesado que el aire, por lo que hay que tener especial cuidado en los sótanos y garantizar una ventilación suficiente.

Por este motivo, también es importante disponer de detectores de CO<sub>2</sub> estratégicamente colocados en los puntos donde pudiera acumularse, tales como: partes bajas de las salas de máquinas, falsos techos por los que pasa tubería de CO<sub>2</sub>,....