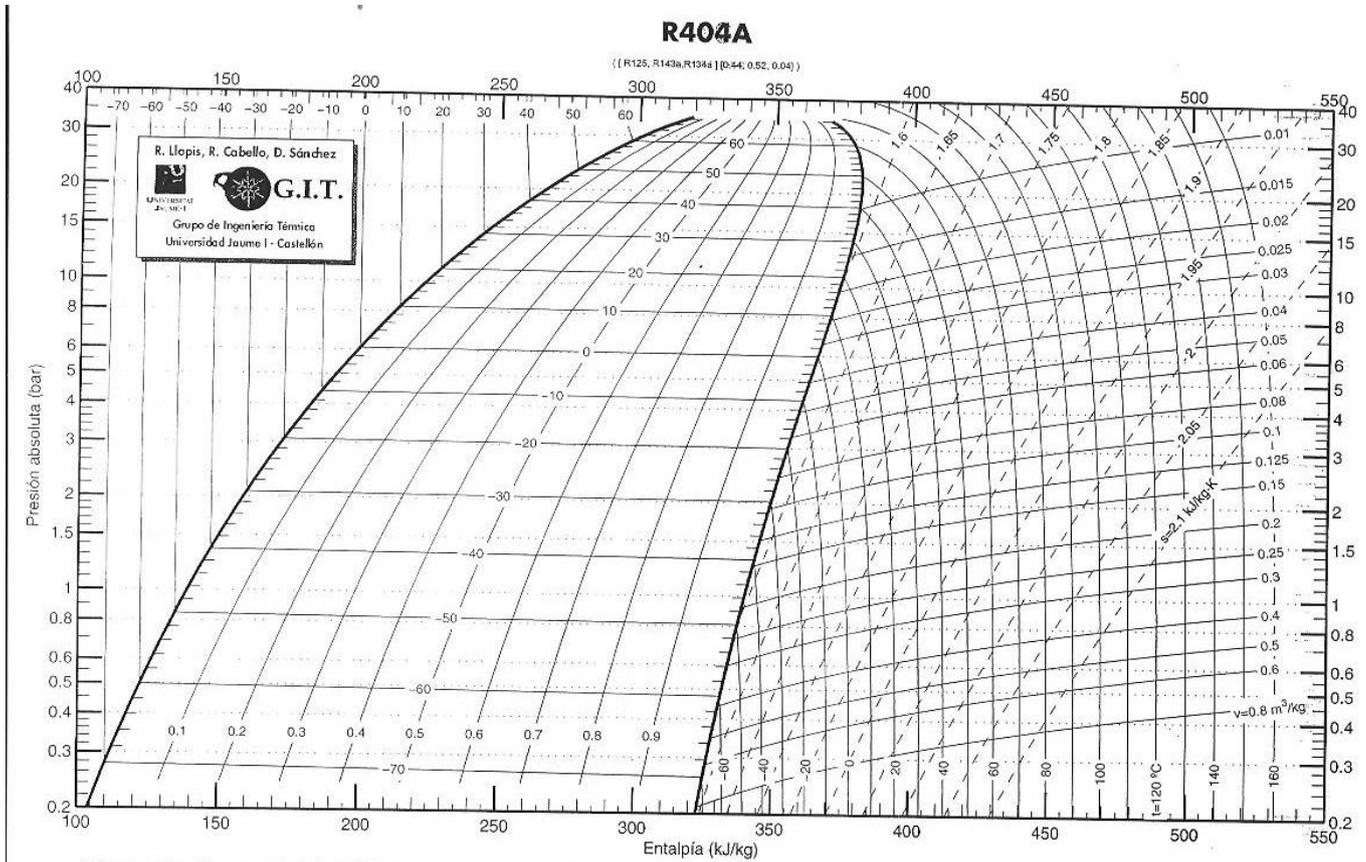


DIAGRAMA DE MOLLIER

El refrigerante cambia de estado a lo largo del ciclo frigorífico como hemos visto en el capítulo anterior. Representaremos sobre el diagrama de p-h las distintas transformaciones que sufre el refrigerante y obtendremos importantes conclusiones a partir del mismo. Cada refrigerante tiene su propio diagrama ph.

En la figura siguiente puedes ver el diagrama para el refrigerante R-404A

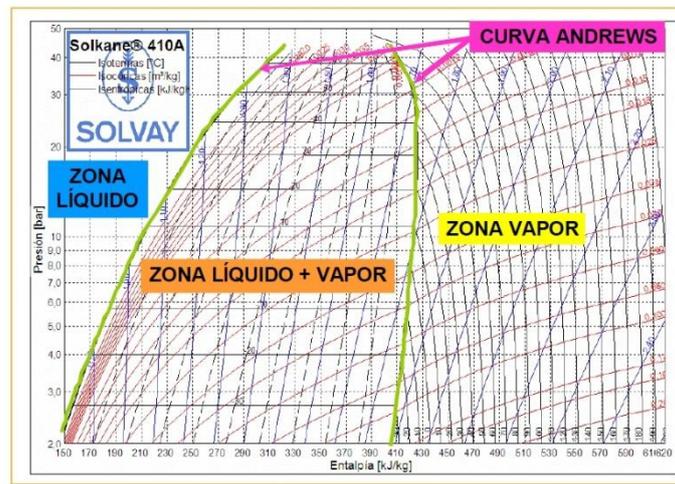


En el eje vertical, se encuentra la presión absoluta a escala logarítmica. Cuidado con este tipo de escalas, ya que las distancias entre los distintos puntos no son iguales como en una escala decimal.

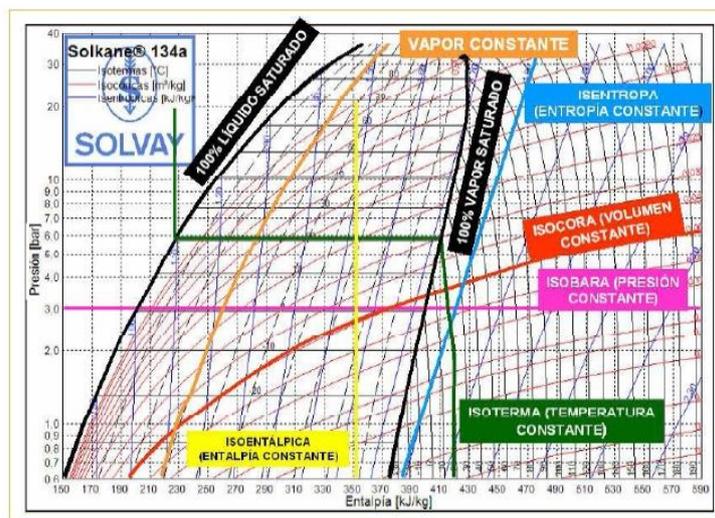
En el eje horizontal se representa la entalpía específica (h) en kJ por kg de refrigerante. La entalpía podemos definirla como la cantidad de calor que posee el refrigerante en un estado determinado.

En el diagrama P-h se distinguen tres zonas bien diferenciadas que se corresponden con distintos estados físicos del refrigerante y que quedan delimitadas por la curva de Andrews:

- Zona de vapor, situada a la derecha de la curva de Andrews
- Zona de líquido y vapor, situada en el interior de la curva de Andrews
- Zona de líquido, situada a la izquierda de la curva de Andrews



LÍNEAS DEL DIAGRAMA DE MOLLIER



EL CICLO FRIGORÍFICO EN EL DIAGRAMA DE MOLLIER

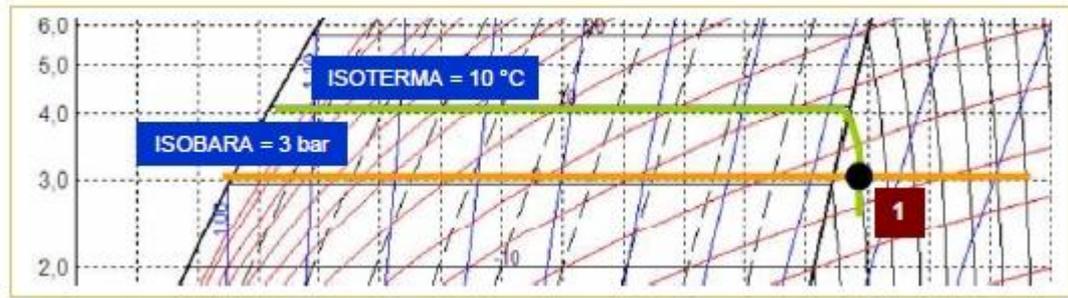
Para dibujar el ciclo frigorífico sobre el diagrama P-h partiremos de una instalación elemental ideal (sin pérdidas de carga) y sobre la que realizaremos unas mediciones:

- Presión de baja: 2 bar
- Presión de alta: 8 bar
- Temperatura de aspiración: 10°C
- Temperatura a la entrada de la válvula de expansión: 30°C
- Refrigerante: 134a

Para dibujar el ciclo podemos comenzar por cualquier punto de la máquina. En este caso comenzaremos por la línea de aspiración, aunque el procedimiento siempre es el mismo y se basa en buscar la intersección entre dos líneas del diagrama que representen los datos disponibles para el punto de la máquina que hubiésemos seleccionado. Los datos que conocemos para la línea de aspiración son la presión y la temperatura.

En la aspiración del compresor hemos medido una presión de 2 bar (manométrica). Sin embargo, en el gráfico vienen representadas las presiones absolutas, por lo que debemos pasar la presión relativa a absoluta. Por tanto, su presión será de 3 bar.

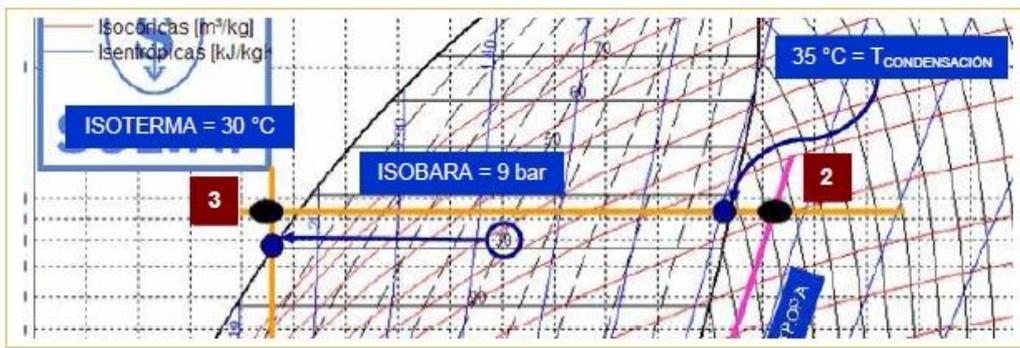
Asimismo, la temperatura en ese punto es de 10°C. Localizamos en el diagrama el punto que tiene una presión absoluta de 3 bar y una temperatura de 10°C. Ese punto, que llamaremos 1, se encuentra sobre la intersección de la isoterma de 10°C y la isobara de 10 bar. En la figura siguiente podemos ver la localización de dicho punto.



Situado el punto correspondiente a la aspiración del compresor, realizaremos ahora el proceso de compresión. El proceso de compresión se supone isentrópico y a lo largo del mismo el refrigerante aumenta su presión hasta la de descarga. Para localizar el punto correspondiente a la descarga (punto 2) dibujamos una línea isentrópica desde el punto 1 hasta la isobara correspondiente a la presión de descarga. Para localizar el punto correspondiente a la descarga (punto 2), dibujamos una línea isentrópica desde el punto 1 hasta la isobara correspondiente a la presión de descarga.

La presión de descarga es de 8 bar (presión relativa), y la pasamos también a presión absoluta, por lo que su valor será de 9 bar.

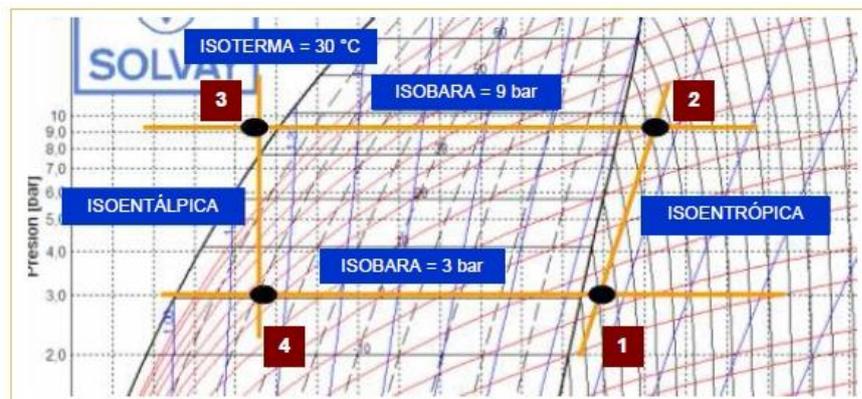
Finalizada la compresión del refrigerante llega el proceso de condensación. El gas, que se encuentra a una temperatura elevada, comienza a enfriarse en el condensador, cediendo calor sensible y disminuyendo su temperatura hasta la que corresponda al cambio de estado a la presión de 9 bar (35 °C aproximadamente). Como hemos supuesto que no existen caídas de presión, este proceso se realiza sobre la isobara de 9 bar tal como se muestra en la figura.



Como acabamos de ver en la figura, el refrigerante se condensa y se enfría hasta la temperatura correspondiente a la entrada de la válvula de expansión. Este punto se localiza sobre la isoterma correspondiente a 30 °C y la isobara de 9 bar (fíjate en los datos de los que habíamos partido) y lo llamaremos punto 3.

Después de la condensación llega el proceso de expansión. Este proceso se supone adiabático, es decir, durante la expansión del refrigerante una parte de él se evapora absorbiendo calor del resto del refrigerante que continua es estado líquido, disminuyendo de esa forma su temperatura y presión.

La expansión se produce siguiendo una línea adiabática o isoentálpica desde el punto 3 hasta el punto 4, que coincide con la intersección de la adiabática que pasa por el punto 3 y la isobara correspondiente a la presión de evaporación (3 bar).

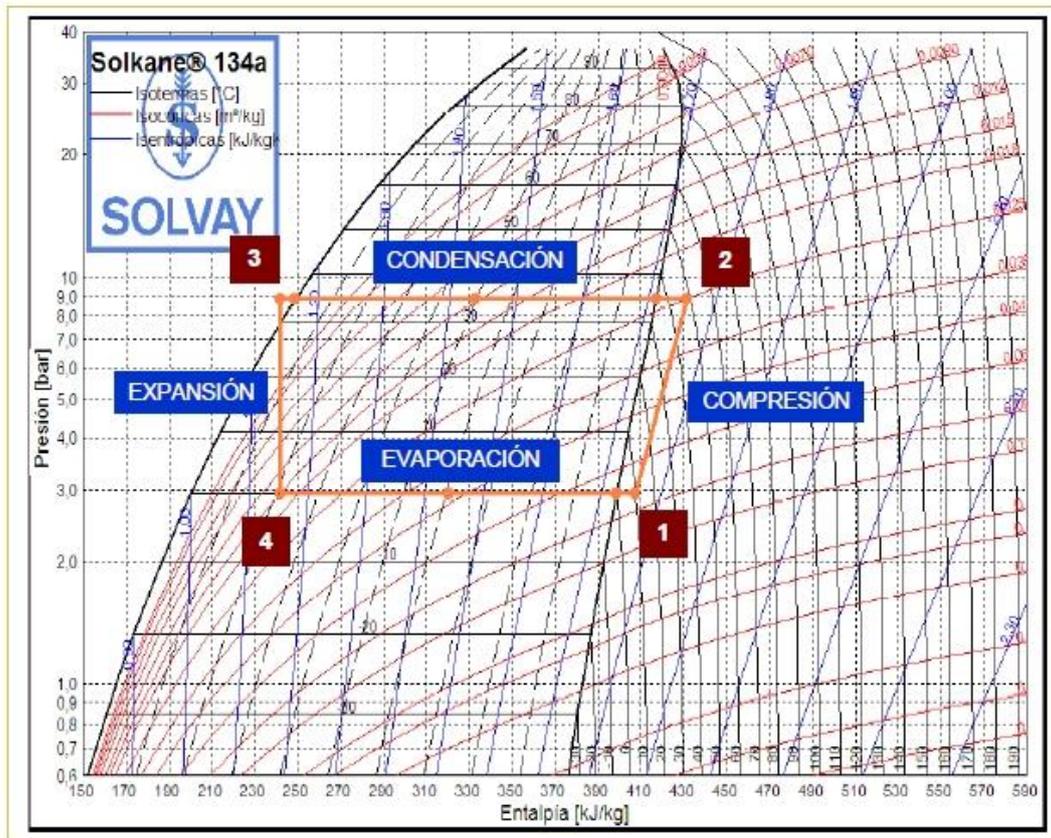


Finalmente nos queda el proceso de evaporación, que al producirse a presión constante de (recordemos que durante el cambio de estado la presión y temperatura no cambian) se desarrollará a lo largo de la isobara correspondiente a la presión de baja desde el punto 4 hasta el punto 1.

A medida que se produce la evaporación va disminuyendo la cantidad de líquido en el evaporador, aumentando simultáneamente la cantidad de vapor hasta que alcanzamos la curva del vapor saturado. A partir de ese momento, la evaporación ha concluido, y si aún posible absorber calor, la temperatura del refrigerante comenzará a aumentar hasta alcanzar la aspiración

del compresor (punto 1)

El ciclo frigorífico quedará finalmente de ésta forma:



CÁLCULOS EN EL CICLO FRIGORÍFICO

A partir del ciclo frigorífico que hemos dibujado podemos realizar algunos cálculos elementales que nos permitirán comprender determinados aspectos del funcionamiento de la máquina: balance energético, coeficiente de eficiencia energética, relación de compresión y densidad del gas de aspiración.

Balance energético

Vamos a estudiar el intercambio de calor que tiene lugar durante todo el ciclo frigorífico. Para ello, debemos tener en cuenta que los resultados que se obtengan son por cada kg de refrigerante que haya disponible. Observa que en el eje de entalpía la unidad es kJ/kg.

Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{\text{evaporador}} = h_1 - h_4 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Calor aportado durante la compresión:

$$Q_{\text{compresor}} = h_2 - h_1 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Calor cedido en el condensador:

$$Q_{\text{condensador}} = h_2 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Podemos concluir que:

$$Q_{\text{condensador}} = Q_{\text{evaporador}} + Q_{\text{compresor}}$$

Coefficiente de Eficiencia Energética

El coeficiente de eficiencia energética o coeficiente de rendimiento es la relación entre el frío que produce la máquina y la energía consumida para ello.

$$\text{COP} = \frac{W_e}{A_w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad [\text{adimensional}]$$

Si se compara el calor absorbido por el refrigerante durante la evaporación con el calor aportado al refrigerante por el compresor se observa que el calor de evaporación es mucho mayor que el calor necesario para el trabajo de compresión. El COP representa cuántas veces es mayor uno que otro. Cuanto más elevado sea el COP, menos calor hay que aportar por el compresor, por lo que el coste del frío que hemos producido será más pequeño.

Relación de compresión

La relación de compresión es la relación entre la presión de condensación y la de evaporación. Para este cálculo se utilizan presiones absolutas. Cuanto mayor sea la relación de compresión, más pequeña será la cantidad de refrigerante en circulación y la capacidad.

$$\text{Relación de compresión} = \frac{p_{\text{alta}}}{p_{\text{baja}}}$$

Densidad del gas de aspiración

La densidad del gas de aspiración (kg/m^3) se calcula mediante la inversa del volumen específico (m^3/kg). Durante el proceso de compresión, cuanto mayor sea la densidad del gas absorbido en los cilindros, más elevada es la cantidad de refrigerante en circulación y la capacidad obtenidas. Por lo tanto, cuanto menor sea el volumen específico del gas de aspiración, mayor es la capacidad.

$$\text{Densidad del gas de aspiración} = \frac{1}{V}$$

Caudal másico

Es la cantidad de refrigerante que circula por toda la instalación en un cantidad de tiempo. Se expresa en Kg/seg
Se calcula por la fórmula:

$$\text{CAUDAL MÁSIKO} = \text{POTENCIA FRIGORÍFICA}/Q_{\text{evaporador}}$$

EL RECALENTAMIENTO

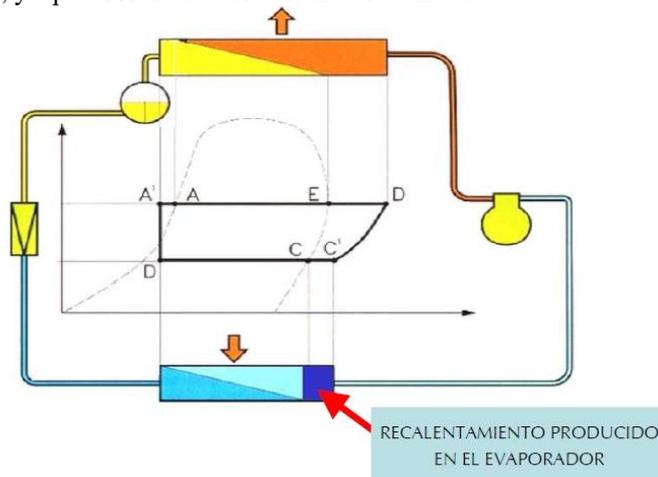
El recalentamiento se puede definir como la *diferencia de temperatura del refrigerante a la salida del evaporador y la temperatura de evaporación*.

Otra forma de definir el recalentamiento sería *la cantidad de calor que aportamos al refrigerante después de haberse evaporado*. Teniendo en cuenta esta definición, el recalentamiento supone un aporte de calor sensible al refrigerante y, por tanto, supone un aumento de temperatura.

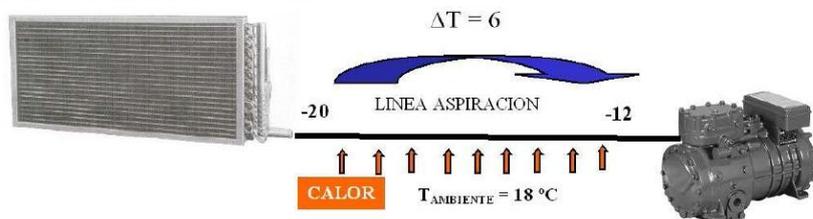
Para calcularle, y basándonos en su definición, necesitamos conocer las dos temperaturas mencionadas. Si utilizamos un manómetro de frigorista para medir la presión de aspiración, obtendremos la temperatura de evaporación, y la temperatura a la salida del evaporador la podemos determinar por medio de un termómetro.

¿Dónde se produce el recalentamiento?

Se produce o dentro del evaporador o en la tubería de aspiración del compresor. En el supuesto que se produzca dentro del evaporador, éste produciría frío útil, ya que absorbería calor del medio a enfriar

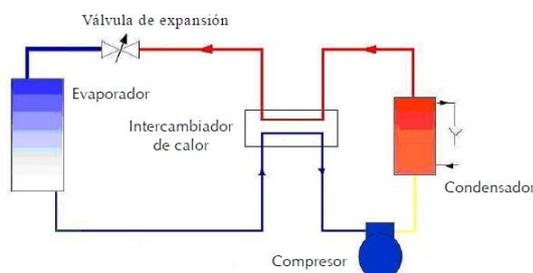


En el caso de que el recalentamiento se genere en la tubería de aspiración, el aumento de temperatura del refrigerante no se produce como consecuencia de una disminución de la temperatura del espacio a refrigerar, sino que el calor se absorbe del medio en el que se encuentra instalada la mencionada tubería.

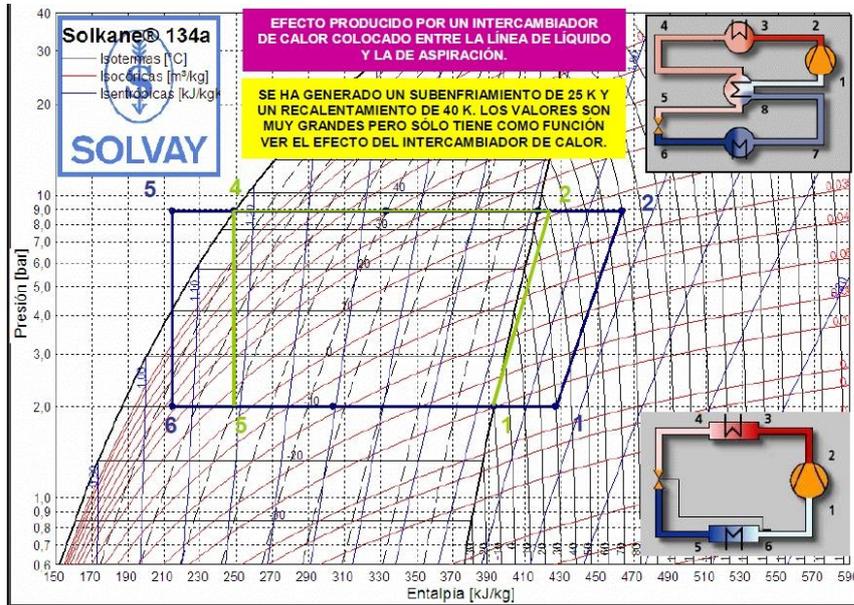
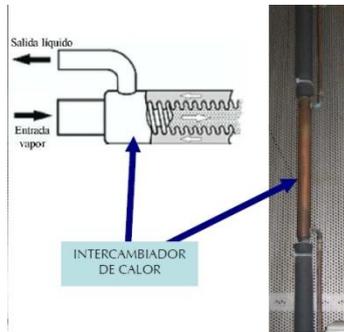


Métodos para conseguir recalentamiento

El recalentamiento se puede conseguir colocando un intercambiador de calor entre la línea de líquido y la de aspiración del compresor.



El intercambiador de calor no es más que un tubo dentro de otro tubo. El refrigerante en estado gaseoso pasa por el tubo central en dirección contraria al líquido para mejorar el intercambio de calor. Por tanto, a la salida del evaporador, el refrigerante en estado gaseoso es conducido a través el tubo central donde aumenta su temperatura, produciéndose el recalentamiento.



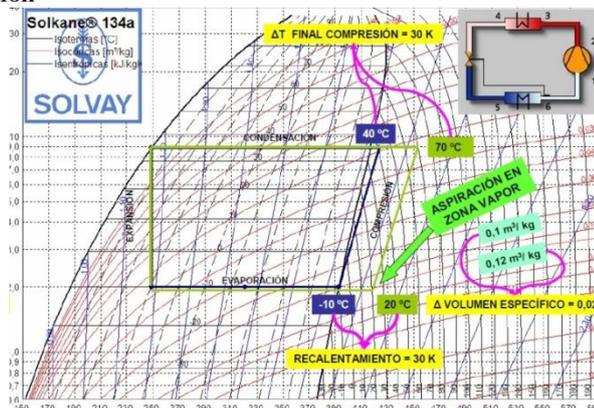
Ventajas del recalentamiento

- Aumento de la capacidad frigorífica si el recalentamiento se produce en el interior del evaporador. Recordemos que la capacidad frigorífica viene dada por la diferencia h_1-h_4 y que, al desplazarse hacia la derecha el punto 1 aumenta su entalpía y, por tanto, la capacidad frigorífica.
- La existencia de recalentamiento impide que entre líquido al compresor, el cual puede originar graves fallos en su funcionamiento al intentar comprimirlo (los líquidos son incompresibles) causando un golpe de líquido y deteriorar algunas partes del compresor.

Inconvenientes del recalentamiento

- Disminución de la densidad de gas de aspiración como consecuencia del aumento del volumen, por lo que la cantidad de gas en circulación será menor, disminuyendo así la capacidad frigorífica.
- Aumento de la temperatura al final de la compresión, lo cual puede provocar un deterioro en el aceite lubricante al disminuir su viscosidad.

En la figura siguiente aparece un ciclo frigorífico con recalentamiento y otro sin él, manteniendo en ambos casos las temperaturas de condensación y evaporación

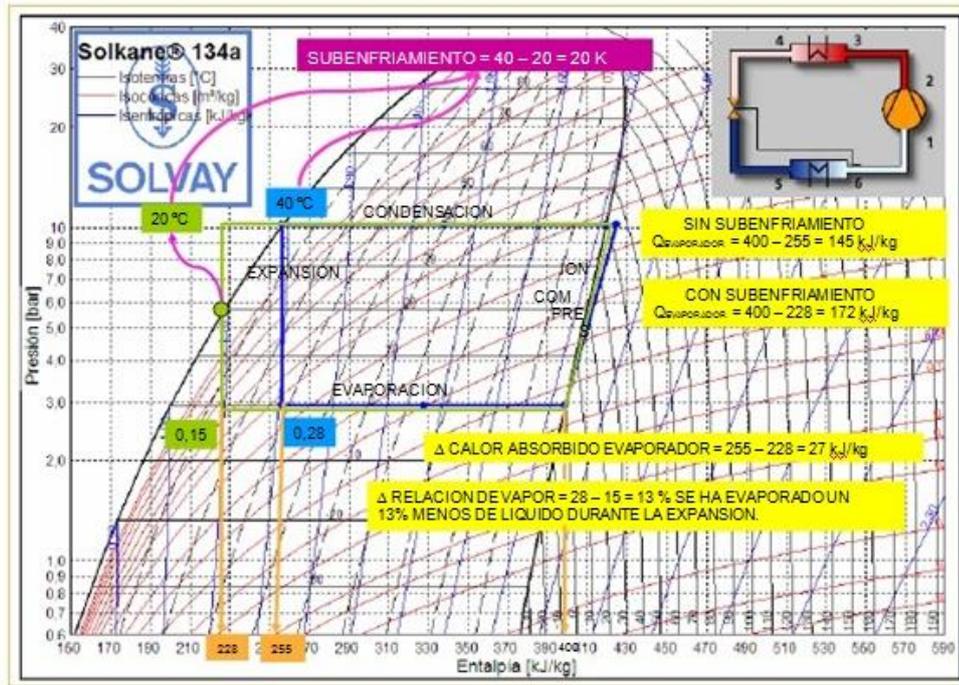


EL SUBENFRIAMIENTO

El subenfriamiento es otro método para mejorar la eficacia del ciclo frigorífico. Podemos definir el subenfriamiento como la diferencia entre la temperatura de condensación y la temperatura a la entrada de la válvula de expansión.

$$\text{Subenfriamiento} = T_{\text{condensación}} - T_{\text{entrada válvula}}$$

El subenfriamiento provoca una disminución de la temperatura a la entrada de la válvula de expansión, lo que hace que, al expandirse el refrigerante, la cantidad que se evapora disminuya, pudiendo absorber mayor cantidad de calor latente, (el que nos interesa).

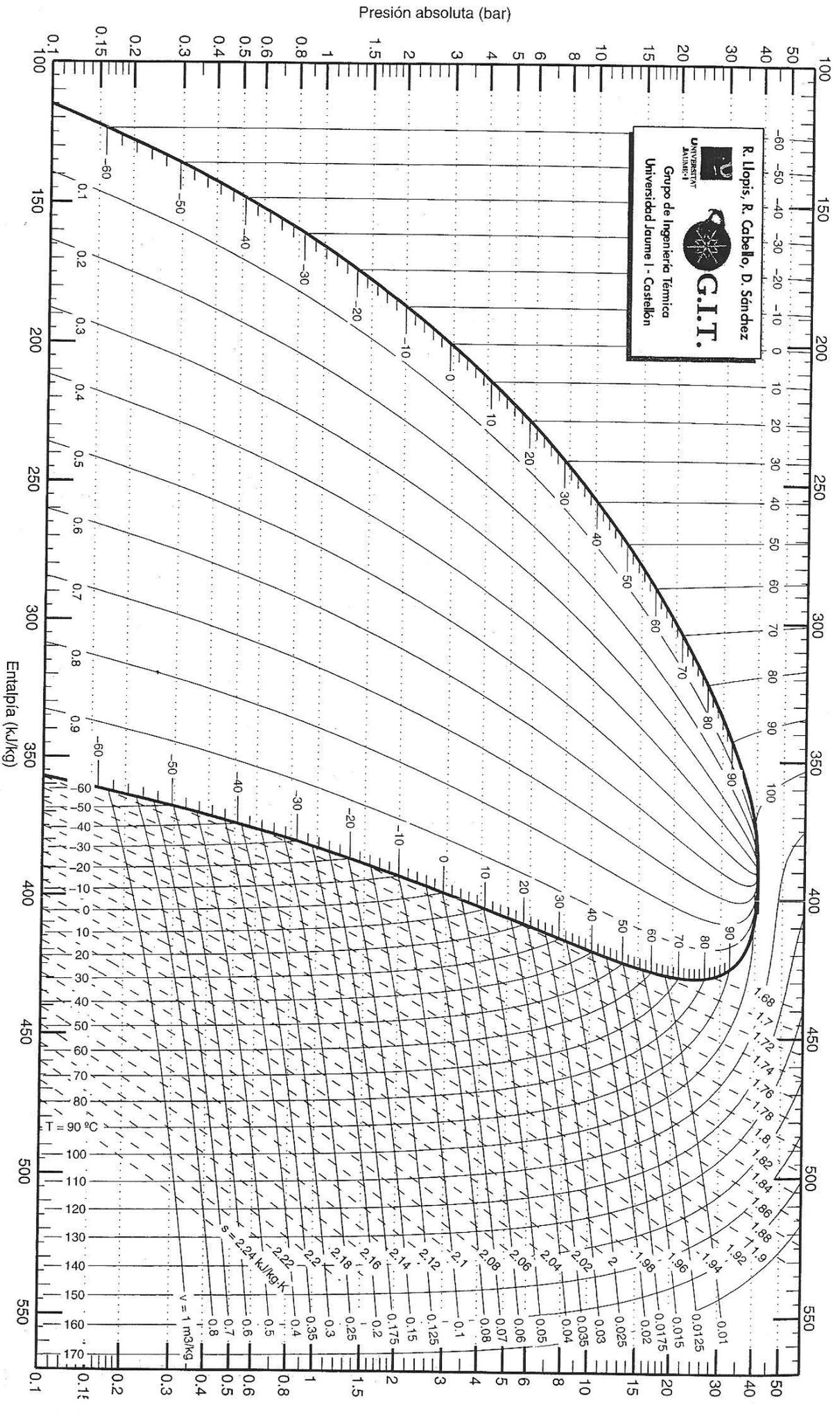


Medida del subenfriamiento

Para medir el subenfriamiento se mide la temperatura del refrigerante a la entrada de la válvula de expansión, y por otro, la presión en el lado de descarga del compresor. Con dicha presión se puede conocer la temperatura de condensación, suponiendo que en la descarga no existen pérdidas de presión.

El subenfriamiento del líquido refrigerante antes de la válvula de expansión termostática es importante porque un aumento del subenfriamiento supone un aumento de la potencia frigorífica del equipo frigorífico, debido al aumento de la capacidad de enfriamiento que tiene el paso de refrigerante que tiene por el evaporador (aumento de la diferencia de entalpía).

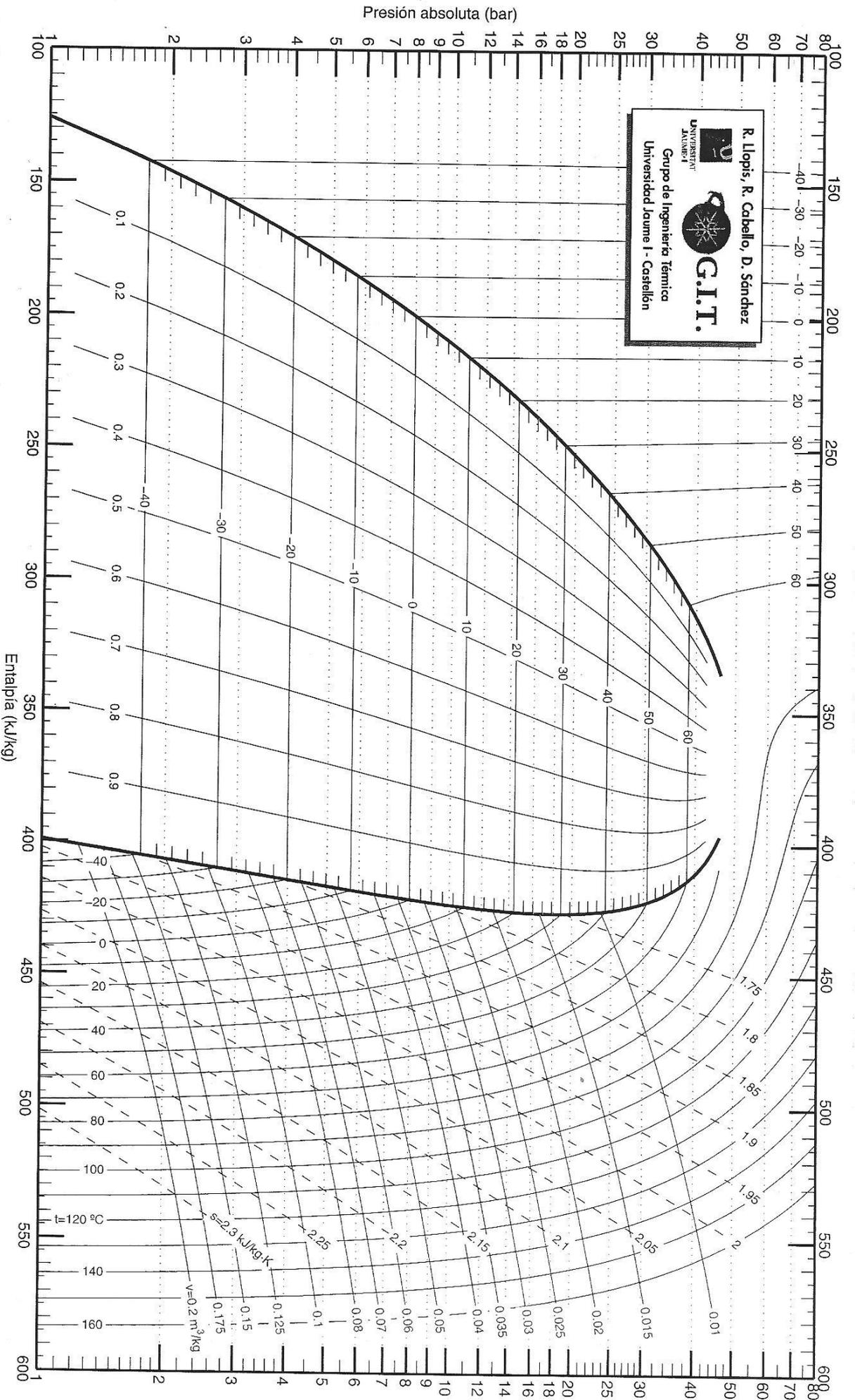
R134a (1,1,1,2 Tetrafluoroetano)



R. Llopis, R. Cabello, D. Sánchez
UNIVERSITAT JAUME I
Grupo de Ingeniería Térmica
G.I.T.
Universidad Jaume I - Castellón

R410A

([R32, R125] [0.5, 0.5])



R404A

(R125, R143b, R134a) (0.44, 0.52, 0.04)

