

## Table of Contents

1 Ciclo frigorífico.....	2
1.1 Ciclo frigorífico.....	2
1.1.1 Coeficiente de funcionamiento COP y EER.....	4
1.1.2 Componentes de la instalación frigorífica por compresión.....	5
1.1.3 Ciclo frigorífico en el diagrama p h.....	7
1.1.4 Caudal m <sup>3</sup> sico.....	10
1.1.5 EER de un sistema ideal.....	11
1.1.6 Relación de compresión en un sistema frigorífico.....	12
1.2 Ejercicios ciclo frigorífico.....	13
1.3 Influencia del sobrecaleamiento y subenfriamiento en el la eficiencia y el compresor.....	31
1.4 Puntos de medición de temperatura y presión.....	34
1.5 Símbolos según UNE EN 1861.....	37

# 1 Ciclo frigorífico

## 1.1 Ciclo frigorífico

En el ciclo frigorífico intervienen tres elementos principales en lo que a los flujos de energía se refiere:

### Evaporador

En el evaporador se evapora el medio refrigerante a baja temperatura y presión, absorbiendo (eliminando) calor del espacio refrigerado. Este calor se identifica con  $Q_E$ .

### Condensador

En el condensador condensa el medio refrigerante a alta temperatura y presión, cediendo calor al medio ambiente, exterior al espacio refrigerado. Este calor se identifica con  $Q_C$ .

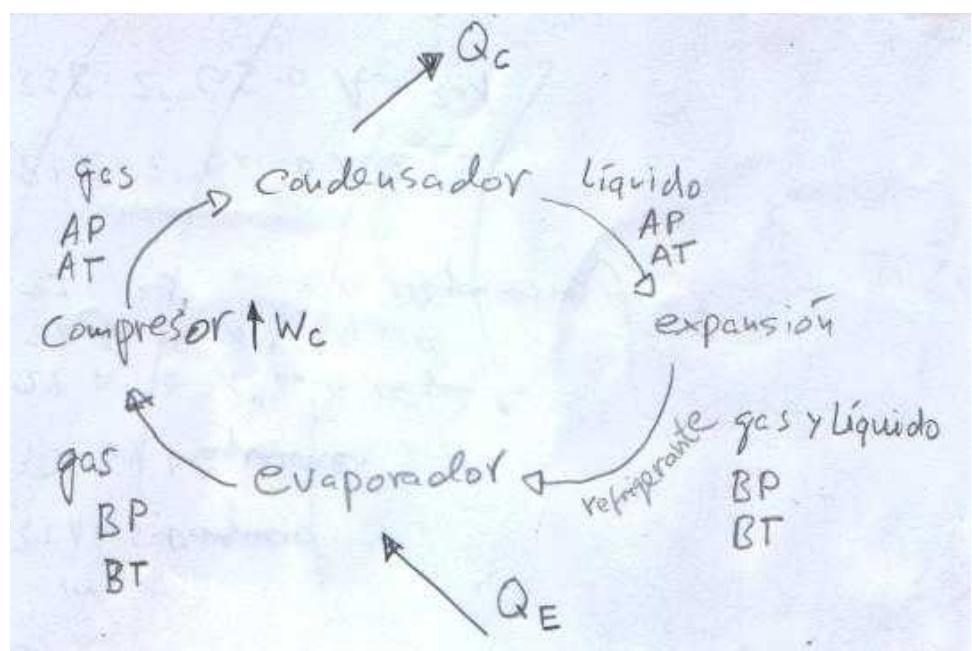
### Compresor

El compresor recibe el refrigerante en forma de vapor a baja presión y temperatura, lo comprime, y lo descarga a alta presión y temperatura. Este proceso aporta trabajo al gas refrigerante. Este trabajo se identifica con  $W_C$ .

La relación entre estos flujos de energía es

$$Q_C = Q_E + W_C$$

El calor cedido por el condensador es el calor absorbido por el evaporador sumado al trabajo aportado por el compresor.



### 1.1.1 Coeficiente de funcionamiento COP y EER

La eficiencia de una instalación frigorífica se indica con el EER (Energy Efficiency Ratio)

$$EER = \frac{Q_E}{W_C}$$

La eficiencia de una bomba de calor se indica con el COP (Coefficient Of Performance)

$$COP = \frac{Q_C}{W_C}$$

Como el calor cedido por el condensador siempre es mayor al calor absorbido por el evaporador

$Q_C = Q_F + W_C$  el COP siempre es mayor al EER.

$$COP = \frac{Q_C}{W_C} = \frac{Q_E + W_C}{W_C} = \frac{Q_E}{W_C} + 1 = EER + 1$$

### 1.1.2 Componentes de la instalación frigorífica por compresión

Los componentes principales de una instalación frigorífica por compresión y su función son:

#### **Evaporador**

Absorbe el calor del medio a refrigerar mediante la evaporación de un fluido (enfriado).

#### **Tubería de aspiración**

Une la salida del evaporador a la entrada (aspiración) del compresor. El medio refrigerante se encuentra en estado de gas a baja presión y temperatura.

#### **Compresor**

Eleva la presión y temperatura del refrigerante mediante un mecanismo compresor. La temperatura del refrigerante debe ser elevada por encima de la temperatura del medio (aire, agua, tierra) al que se cederá el calor.

#### **Tubería de descarga**

Conecta el compresor con el condensador. El refrigerante sale de la conexión de descarga del compresor en estado de gas a alta temperatura y presión. La tubería de descarga lo dirige al condensador.

#### **Condensador**

Cede el calor al medio exterior (aire, agua, tierra), calentándolo. El refrigerante cambia de estado, condensando. A la salida del condensador, el refrigerante se encuentra en estado líquido.

#### **Depósito de líquido**

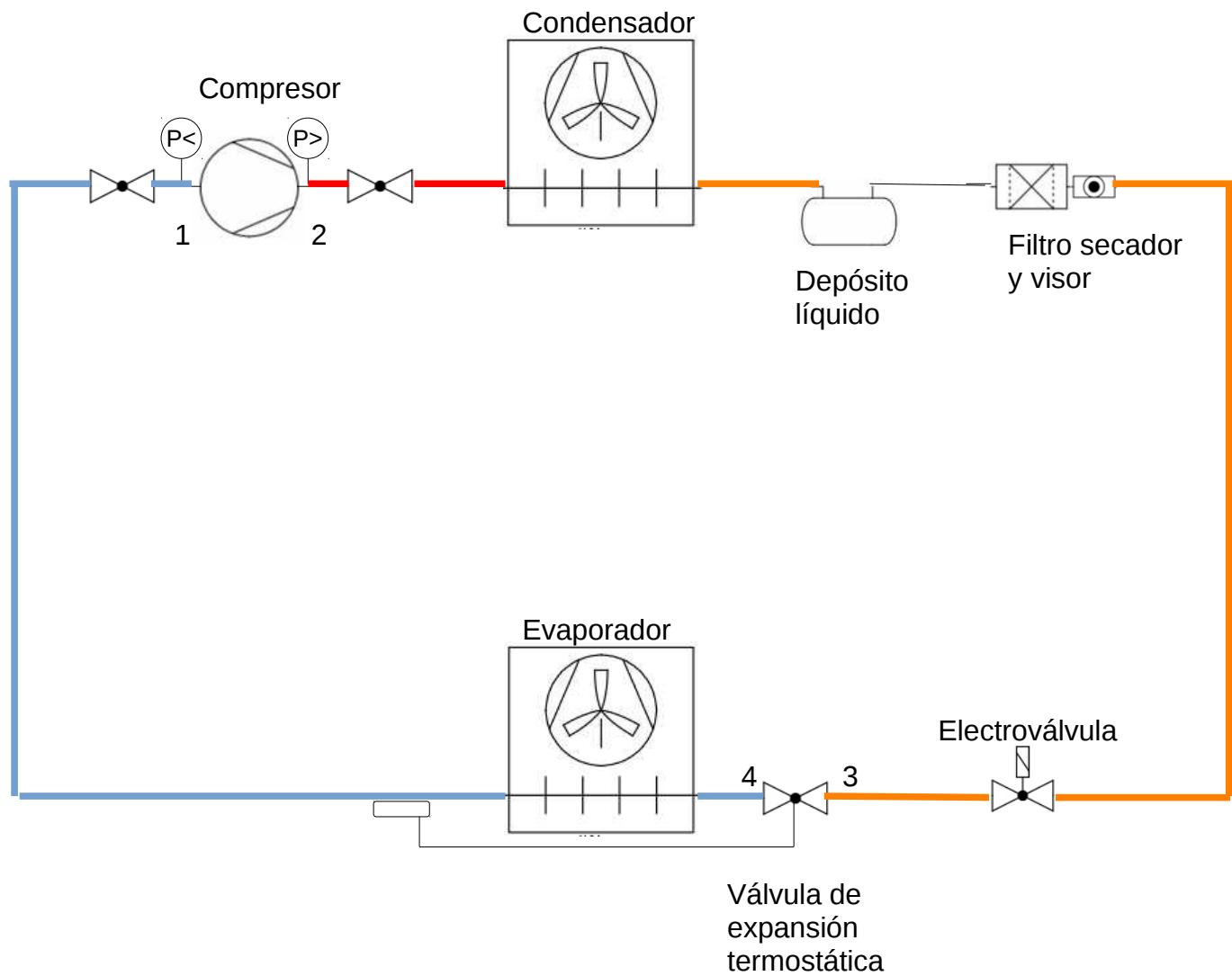
Almacena el refrigerante líquido condensado.

#### **Tubería de líquido**

Transporta el refrigerante líquido del depósito al dispositivo de expansión.

#### **Dispositivo de expansión**

Al pasar el refrigerante por el dispositivo de expansión, se reduce su presión y temperatura. Los dispositivos de expansión más comunes son la válvula de expansión termostática y el tubo capilar.



### 1.1.3 Ciclo frigorífico en el diagrama p h

La siguiente imagen presenta un ejemplo de un ciclo frigorífico utilizando como refrigerante R-134a.

A la presión de evaporación  $p_E = 9$  bar corresponde una temperatura de evaporación de 3 °C.

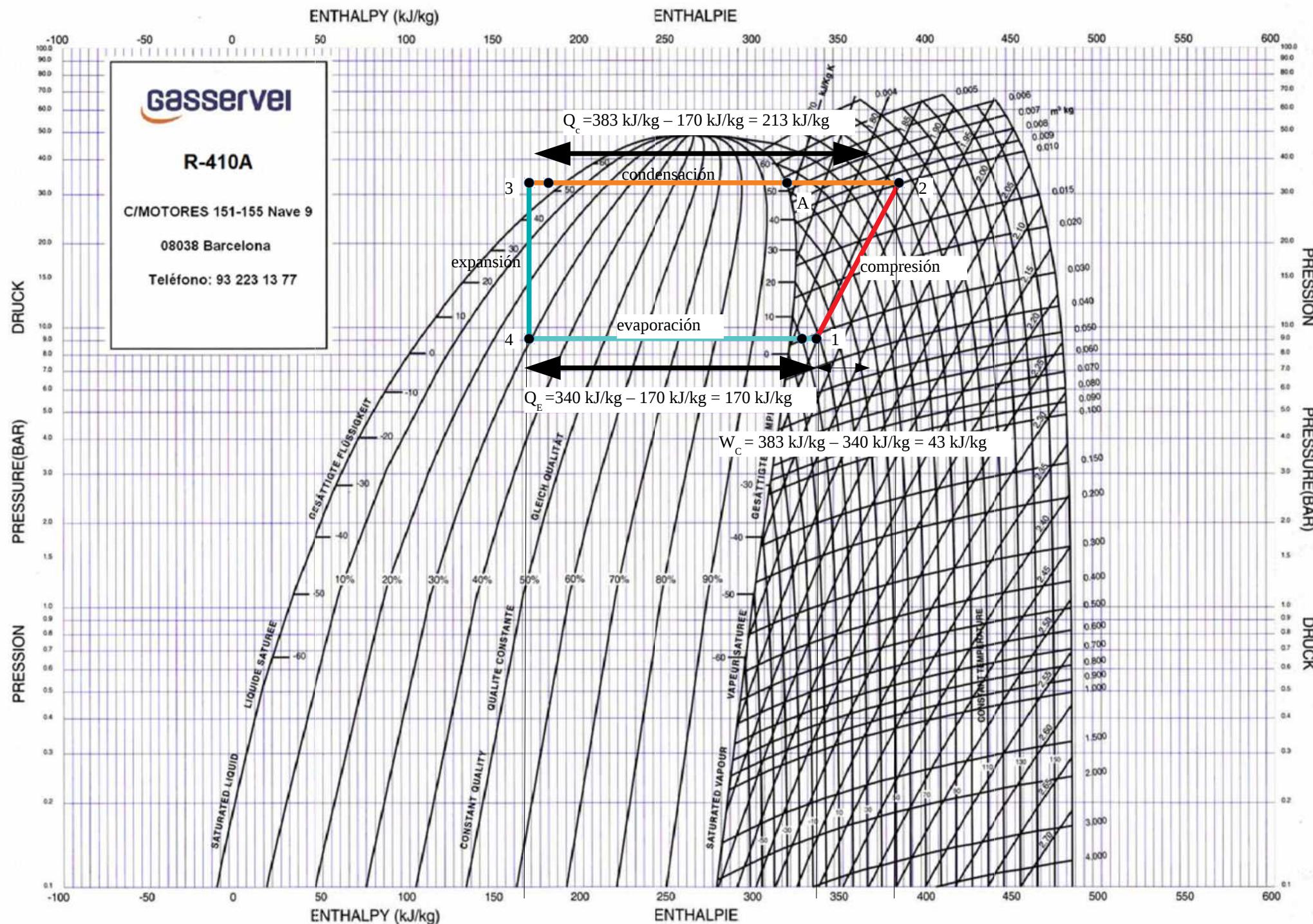
A la presión de condensación  $p_C = 33$  bar corresponde una temperatura de condensación de 53 °C.

La compresión no es isentrópica, ya que la entropía aumenta ligeramente.

$$\text{El evaporador absorbe un flujo calorífico } \dot{Q}_E = 340 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{El compresor aporta un trabajo mecánico de } \dot{W}_C = 383 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 340 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{El condensador cede un flujo calorífico de } \dot{Q}_C = 383 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 213 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



El EER de este ejemplo es:

$$EER = \frac{Q_E}{W_C} = \frac{170 \frac{kJ}{kg}}{43 \frac{kJ}{kg}} = 4$$

### 1.1.4 Caudal màsico

El caudal màsico del refrigerante es uno de los parámetros de la instalación frigorífica que influye de manera fundamental en el flujo calorífico que el circuito transporta. El caudal màsico indica la masa de refrigerante que pasa por un punto del circuito en un segundo.

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \text{ en } \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Por ejemplo, si para mantener una cámara frigorífica a su temperatura de consigna es necesario que el evaporador absorba un flujo calorífico de  $\dot{Q}_E = 3250 \text{ W}$  y tenemos un ciclo en el que el

evaporador absorbe  $170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ , el caudal màsico se calcula:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_E}{Q_E} = \frac{3250 \text{ W}}{170000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 0,019 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 1.1.5 EER de un sistema ideal

El ciclo de Carnot describe un sistema ideal y su resultado es la eficiencia máxima que resulta de un ciclo frigorífico ideal:

$$EER_{ideal} = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

siendo

$T_C$  temperatura absoluta de condensación

$T_E$  temperatura absoluta de evaporación

Para el ejemplo anterior con  $T_C = 326\text{ K}$  y  $T_E = 276\text{ K}$  la eficiencia ideal sería

$$EER_{ideal} = \frac{276\text{ K}}{326\text{ K} - 276\text{ K}} = 5,5$$

Del  $EER_{ideal}$  se deduce que, siendo constante la temperatura de condensación, a menor temperatura de evaporación, menor es la eficiencia.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Carnot\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle)

### 1.1.6 Relación de compresión en un sistema frigorífico

En un sistema frigorífico, se entiende por relación de compresión la relación entre presión absoluta de descarga (presión de condesación) y presión absoluta de aspiración (presión de evaporación).

$$R_C = \frac{p_C}{p_E}$$

## 1.2 Ejercicios ciclo frigorífico

### Ejercicio 2.12-1

Representa en el diagrama de p-h el proceso frigorífico con los siguientes datos:

Refrigerante R-134a

Temperatura de evaporación -3°C

Temperatura de condensación 45 °C

Sobrecalentamiento 10 K

Subenfriamiento 5 K

Potencia frigorífica de la instalación  $\dot{Q}_E = 10 \text{ kW}$

Compresión iséntropa.

Calcula:

El caudal mástico del refrigerante  $\dot{m}$

La potencia de compresión  $P_{comp}$

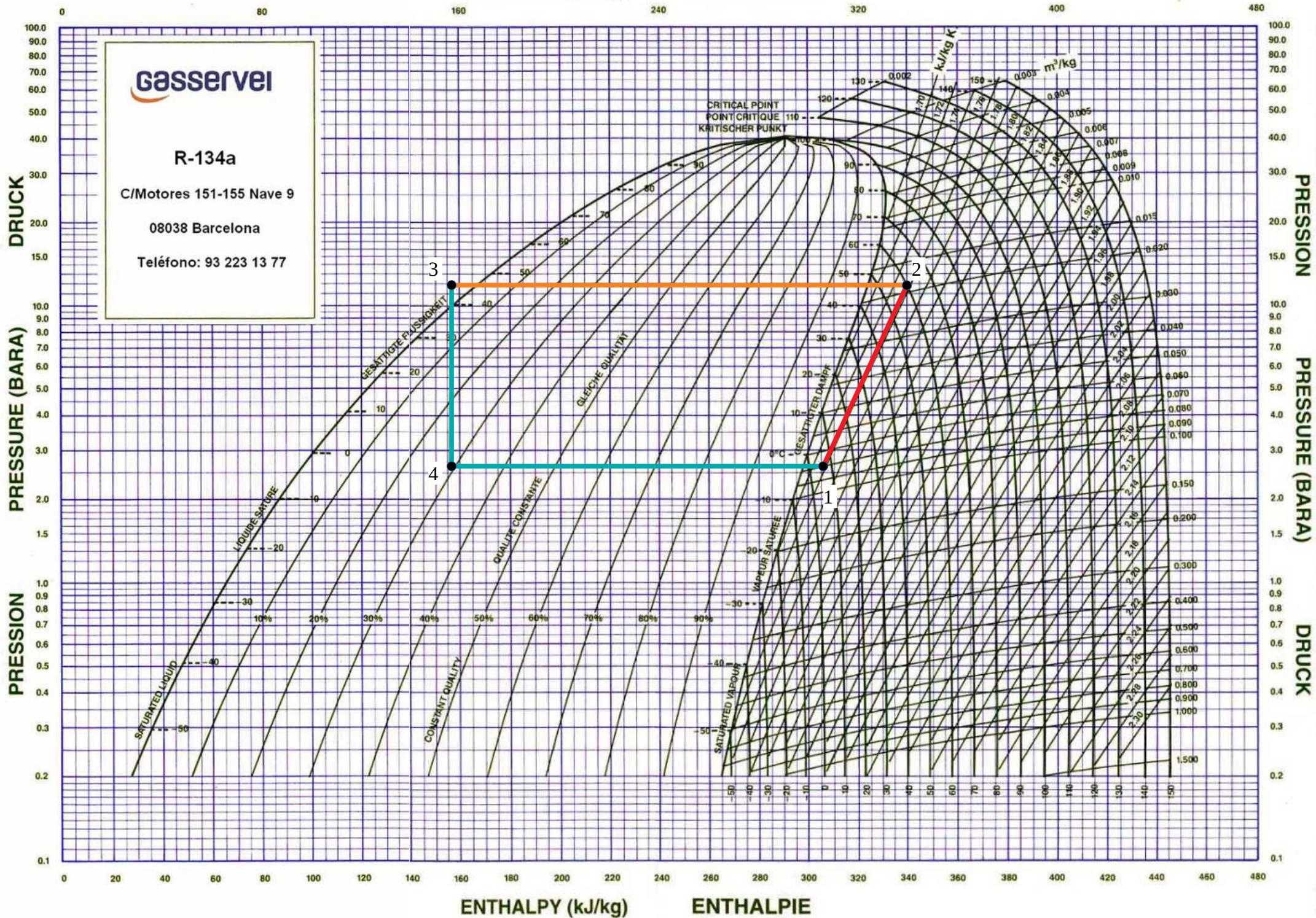
La potencia de condensación  $\dot{Q}_C$

El EER del ciclo y el EER máximo

La relación de compresión  $R_C$

## ENTHALPY (kJ/kg)

## ENTHALPIE



$$Q_E = 305 \frac{kJ}{kg} - 157 \frac{kJ}{kg} = 148 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_C = 341 \frac{kJ}{kg} - 157 \frac{kJ}{kg} = 184 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_C = 341 \frac{kJ}{kg} - 305 \frac{kJ}{kg} = 36 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_E}{Q_E} = \frac{10 \text{ kW}}{148 \frac{kJ}{kg}} = 0,0676 \frac{kg}{s}$$

$$P_C = \dot{m} \cdot W_C = 0,0676 \frac{kg}{s} \cdot 36 \frac{kJ}{kg} = 2,4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot Q_C = 0,0676 \frac{kg}{s} \cdot 184 \frac{kJ}{kg} = 12,4 \text{ kW}$$

$$EER_{ciclo} = \frac{Q_E}{W_C} = \frac{148 \frac{kJ}{kg}}{36 \frac{kJ}{kg}} = 4,1$$

$$EER_{máx} = \frac{T_E}{T_C - T_E} = \frac{270 K}{318 K - 270 K} = 5,6$$

$$R_C = \frac{p_C}{p_E} = \frac{12 bar}{2,6 bar} = 4,6$$

**Ejercicio 2.12-2 (versión 1)**

Se tiene una instalación frigorífica de congelación ( $v_E = -10^\circ C$ ) que funciona con R-22 (compresión iséntropa).

Calcula la potencia frigorífica de la instalación, sabiendo que la potencia del compresor es de 2,6 CV, la entalpía en la descarga es de 450 kJ/kg, el caudal másico 170 kg/h y el valor de la entalpía en la salida de la válvula de expansión es de 230 kJ/kg.

Calcula el EER del ciclo y el EER máximo.

Representa el ciclo en el diagrama p-h.

**Ejercicio 2.12-2 resuelto**

$$1 \text{ CV} = 735,5 \text{ W} \rightarrow 2,6 \text{ CV} \cdot 735,5 \frac{\text{W}}{\text{CV}} = 1912,3 \text{ W}$$

$$Q_c = h_2 - h_4 = 450 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 230 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = 170 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 170 \frac{\text{kg}}{3600 \text{ s}} = 0,0472 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_c = Q_c \cdot \dot{m} = 220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,0472 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,038 \text{ kW}$$

$$W_c = \frac{P_{comp}}{\dot{m}} = \frac{1,912 \text{ kW}}{0,0472 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 40,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

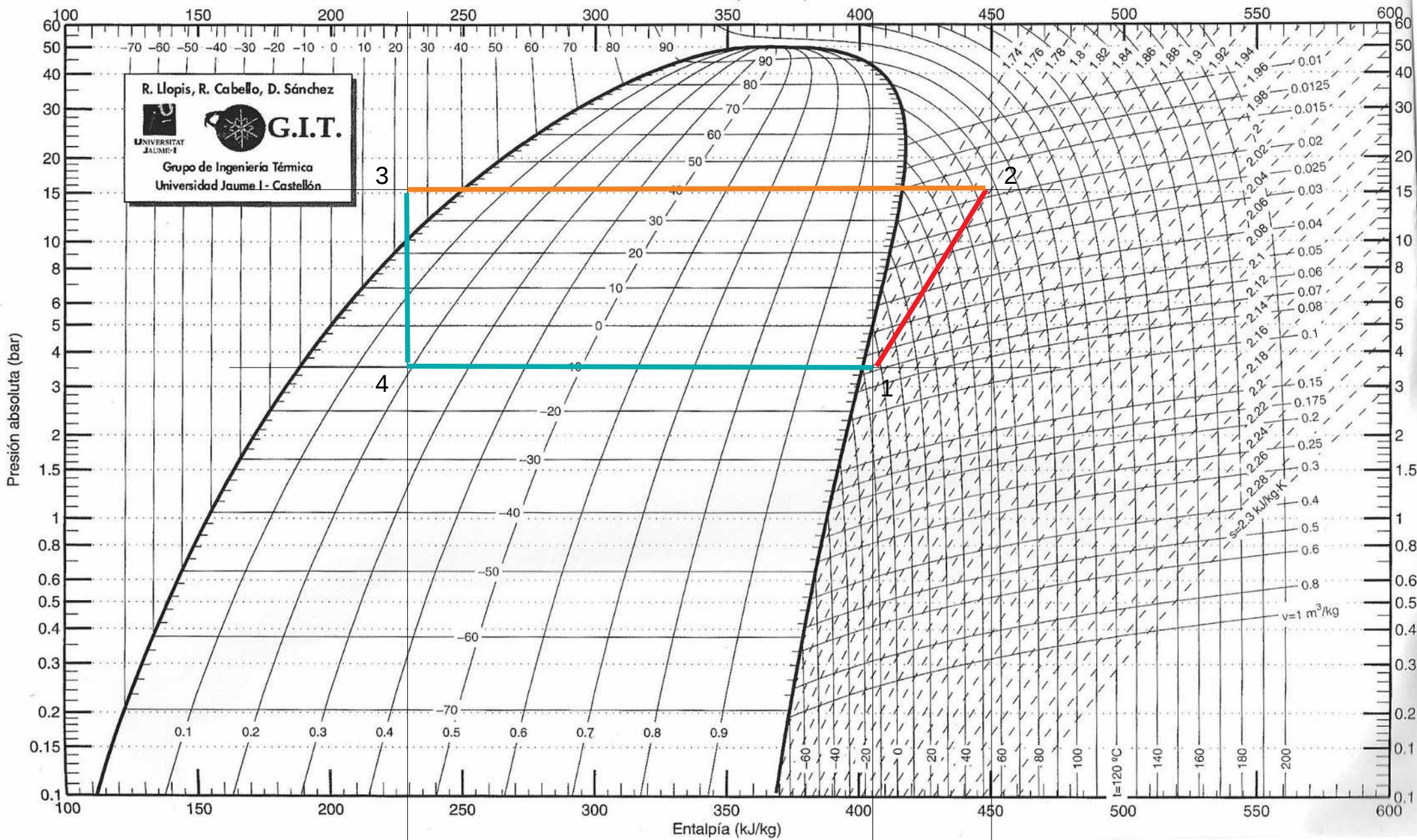
$$Q_e = Q_c - W_c = 220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 40,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 179,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_e = Q_e \cdot \dot{m} = 179,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,0472 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 8,47 \text{ kW}$$

$$EER_{ciclo} = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{179,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{40,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4,4$$

$$EER_{max} = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{263 \text{ K}}{313 \text{ K} - 263 \text{ K}} = 5,26$$

## R22 ( $\text{CHClF}_2$ )



**Ejercicio 2.12-2 (versión 2)**

Se tiene una instalación frigorífica de congelación ( $v_E = -10^\circ C$ ) funciona con R-22 (compresión iséntropa).

Calcula la potencia frigorífica de la instalación, sabiendo que la entalpía en la descarga es de 450 kJ/kg, el caudal másico 170 kg/h y el valor de la entalpía en la salida de la válvula de expansión es de 230 kJ/kg.

Calcula el EER del ciclo y el EER máximo.

Representa el ciclo en el diagrama p h.

**Ejercicio 2.12-2 (versión 2) solución**

$$Q_C = h_2 - h_4 = 450 \frac{kJ}{kg} - 230 \frac{kJ}{kg} = 220 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{m} = 170 \frac{kg}{h} = 170 \frac{kg}{3600 s} = 0,0472 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{Q}_C = Q_C \cdot \dot{m} = 220 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,0472 \frac{kg}{s} = 1,038 kW$$

$$W_C = h_2 - h_1 = 450 \frac{kJ}{kg} - 402 \frac{kJ}{kg} = 48 \frac{kJ}{kg}$$

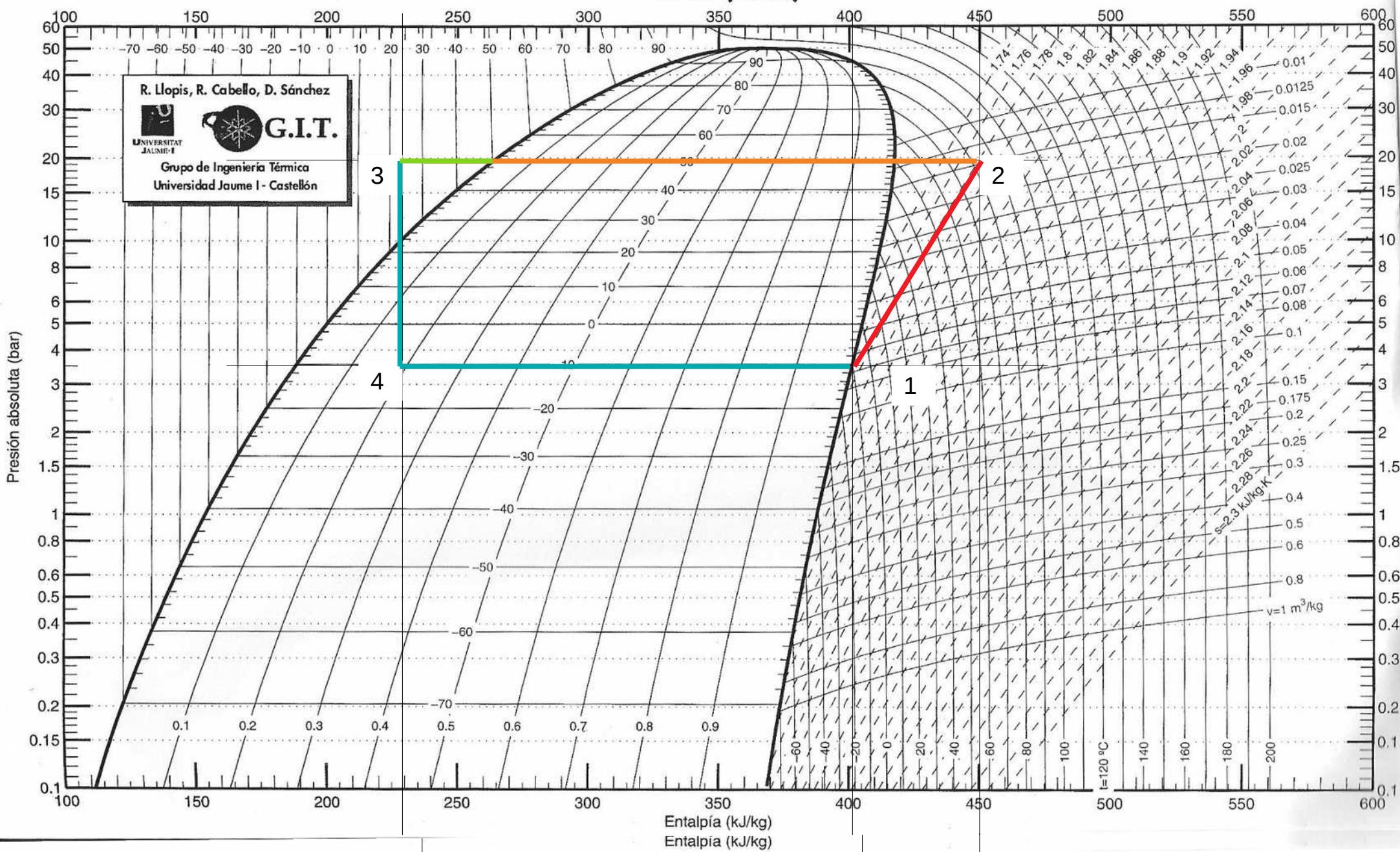
$$Q_E = Q_C - W_C = 220 \frac{kJ}{kg} - 48 \frac{kJ}{kg} = 172 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_E = Q_E \cdot \dot{m} = 172 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,0472 \frac{kg}{s} = 8,11 kW$$

$$EER_{ciclo} = \frac{Q_E}{W_C} = \frac{172 \frac{kJ}{kg}}{48 \frac{kJ}{kg}} = 3,6$$

$$EER_{max} = \frac{T_E}{T_C - T_E} = \frac{263 K}{313 K - 263 K} = 5,26$$

## R22 ( $\text{CHClF}_2$ )



**Ejercicio 2.12-3**

En una instalación frigorífica de R-22 (compresión iséntropa), tenemos una temperatura en la entrada de la válvula de expansión de 25 °C, la potencia frigorífica es de 20,06 kW y el caudal mísico de 7,140 kg/min.

La temperatura de evaporación es de -10°C.

Indica el recalentamiento y la temperatura a la salida de la válvula de expansión sabiendo que la temperatura de descarga del compresor es de 82,5 °C.

Indica el subenfriamiento del refrigerante líquido antes de la válvula de expansión.

Indica las presiones de evaporación y condensación.

Calcula eficiencia del ciclo y la eficiencia máxima.

**Ejercicio 2.12-3 solución**

$$\dot{Q}_E = Q_E \cdot \dot{m} \rightarrow Q_E = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{m}} = \frac{20,06 \text{ kW} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{\frac{7,14 \text{ kg}}{\text{min}}} = 168,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

temperatura en la entrada de la válvula de expansión de 25 °C →  $h_4 = 232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$h_1 = h_4 + Q_E = 232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 168,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 400,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$v_E = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatura de evaporación del refrigerante a la salida de la válvula de expansión.

Recalentamiento del gas refrigerante  $\Delta T_{recal} = 0 \text{ K}$

Subenfriamiento del líquido al llegar a la válvula de expansión  $\Delta T_{subenfr} = 25 \text{ K}$

Presión absoluta de evaporación 3,5 bar

Presión absoluta de condensación 20 bar

Eficiencia del ciclo

$$h_4 = 232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_1 = 400,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_2 = 448 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

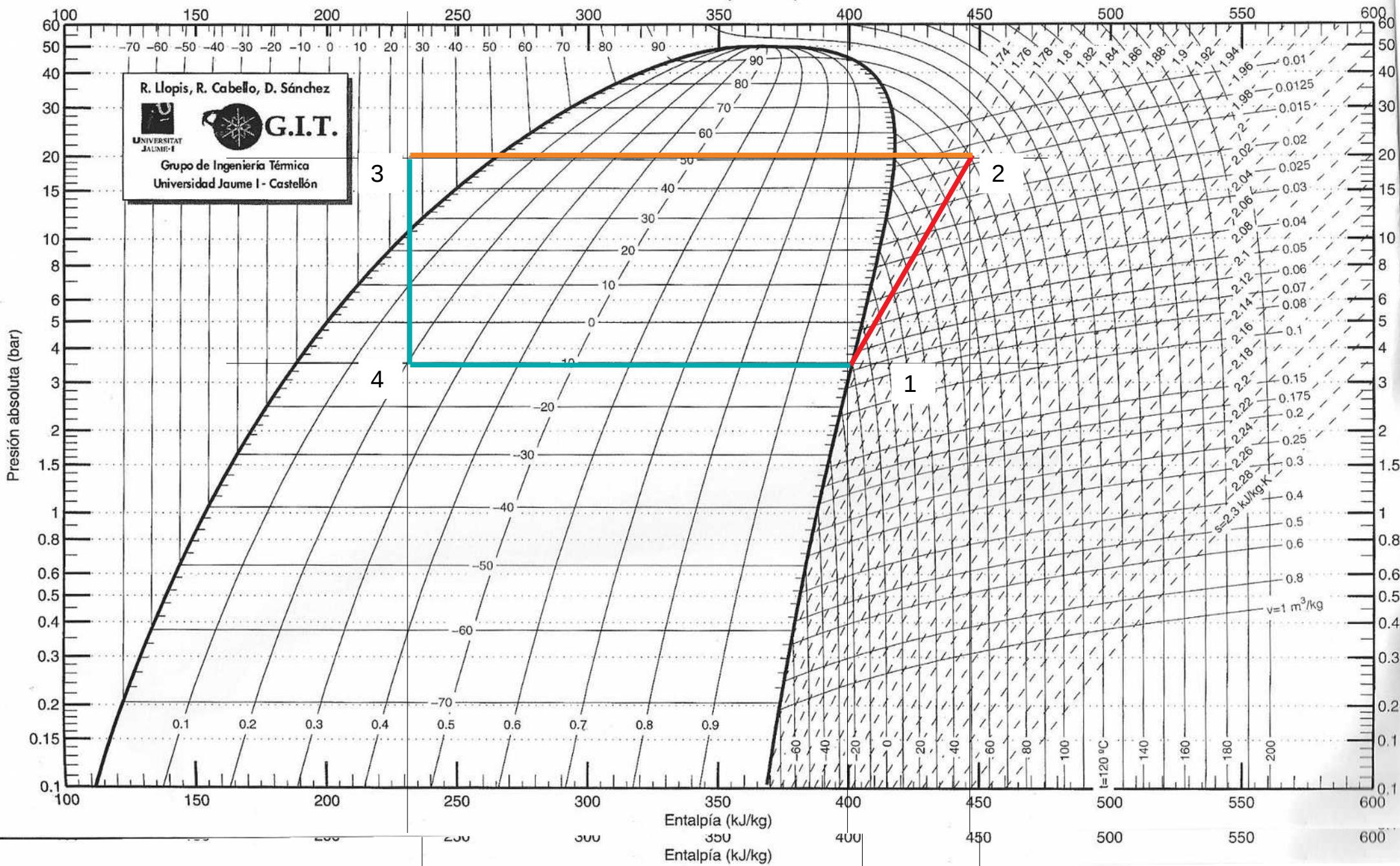
$$Q_E = h_1 - h_4 = 400,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 232 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 168,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_c = h_2 - h_1 = 448 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 400,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 47,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$EER_{ciclo} = \frac{Q_E}{W_c} = \frac{168,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{47,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 3,6$$

$$EER_{max} = \frac{T_E}{T_C - T_E} = \frac{263 \text{ K}}{323 \text{ K} - 263 \text{ K}} = 4,38$$

## R22 ( $\text{CHClF}_2$ )



**Ejercicio 2.12-4**

Calcula la eficiencia de una instalación frigorífica de congelación que funciona con refrigerante R-22, sabiendo que la presión de baja es de 1 bar (presión manométrica), el recalentamiento de 15 K, el subenfriamiento de 5 K, la potencia del compresor de 10 CV (compresión iséntropa) y el caudal másico de 428,42 kg/h.

Calcula la eficiencia máxima.

**Ejercicio 2.12-4 solución**

$$1 \text{ CV} = 735,5 \text{ W} \rightarrow 10 \text{ CV} = 7,335 \text{ kW}$$

$$P_C = 7,335 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = 428 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,119 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$W_C = \frac{P_C}{\dot{m}} = \frac{7335 \text{ W}}{0,119 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 61,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 405 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + W_C = 405 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 61,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 466,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

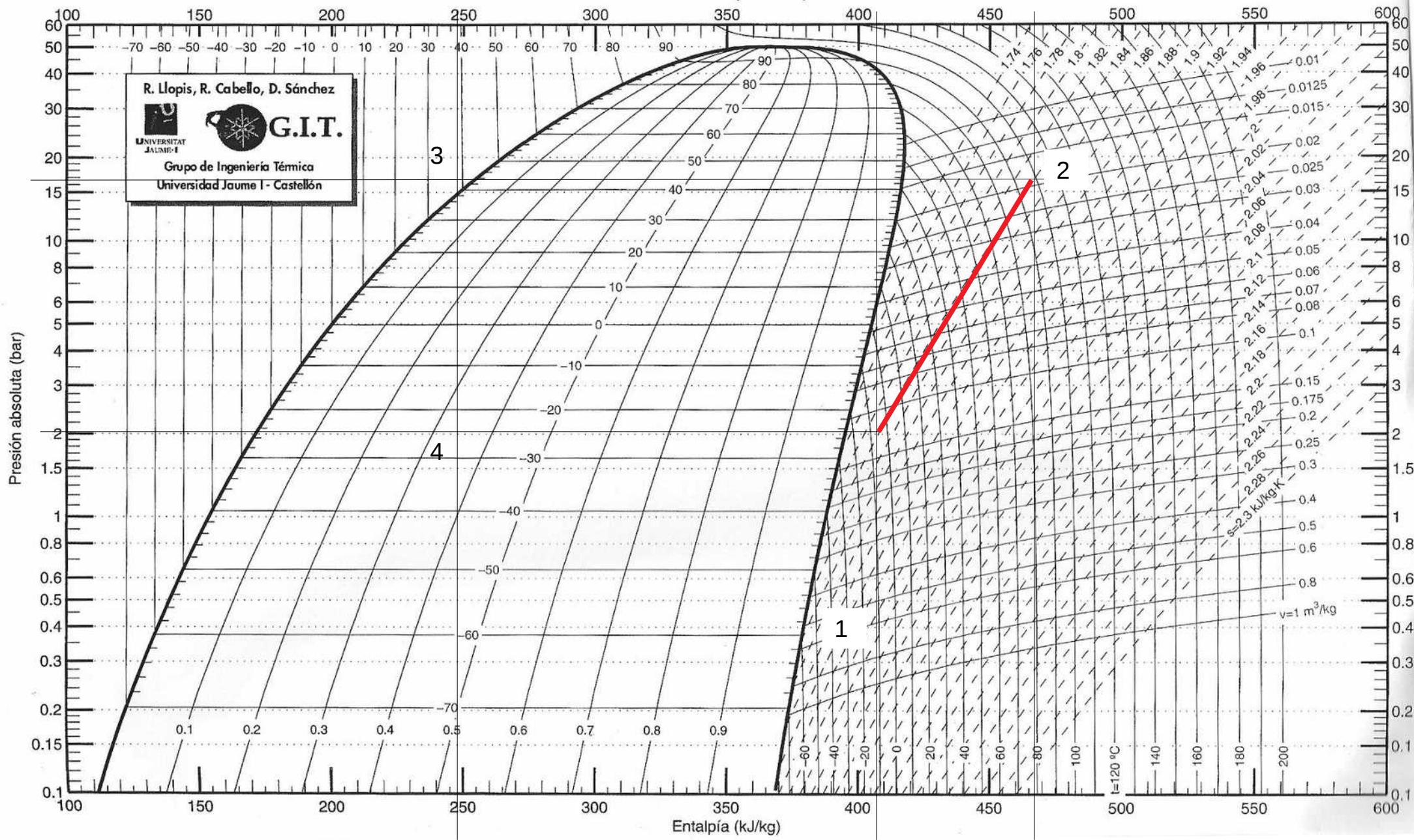
$$h_4 = 248 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_E = h_1 - h_4 = 405 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 248 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 243 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$EER_{ciclo} = \frac{Q_E}{W_C} = \frac{186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{61,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 3$$

$$EER_{max} = \frac{T_E}{T_C - T_E} = \frac{248 \text{ K}}{316 - 248 \text{ K}} = 3,6$$

## R22 ( $\text{CHClF}_2$ )



**Ejercicio 2.12-5**

En el siguiente diagrama está marcado un ciclo frigorífico.

El caudal de masa es de  $150 \frac{kg}{h}$ .

Indica

Sobrecalentamiento

Subenfriamiento

Presiones  $p_E$  y  $p_C$

Temperaturas  $v_E$  y  $v_C$

Calor absorbido en el evaporador  $Q_E$

Potencia frigorífica  $\dot{Q}_E$

Calor cedido en el condensador  $Q_C$

Trabajo aportado por el compresor  $W_C$

Portencia del compresor  $P_{compresor}$

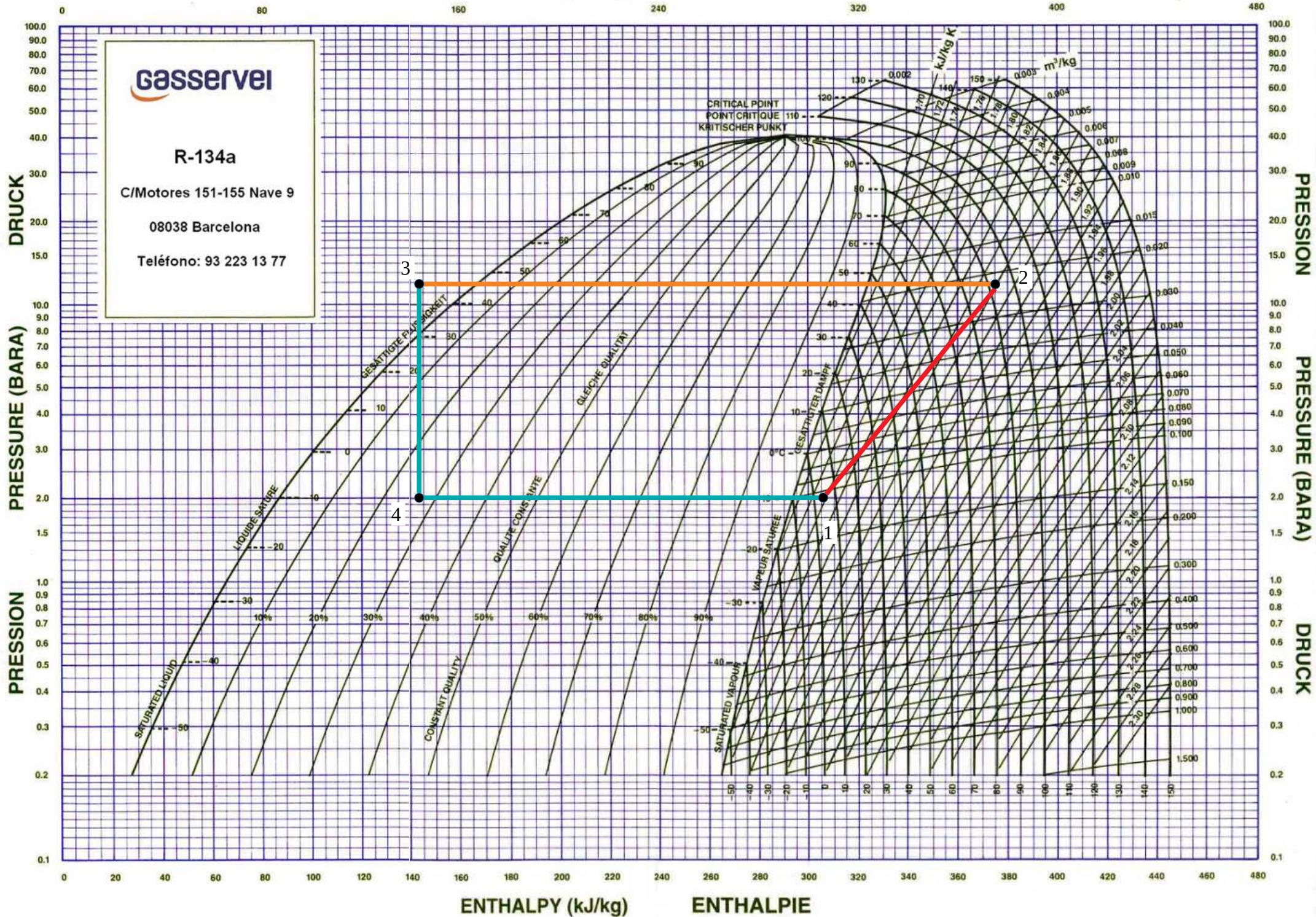
Porcentaje de refrigerante líquido tras la expansión

EER del ciclo y máximo.

Velocidad del gas refrigerante en la tubería de descarga de 20 mm de diámetro interior.

## ENTHALPY (kJ/kg)

## ENTHALPIE



**Ejercicio 2.12-6**

Explica como influyen el subenfriamiento y el sobrecalentamiento en la eficiencia del ciclo.

### 1.3 Influencia del sobrecalentamiento y subenfriamiento en la eficiencia y el compresor

Un intercambiador de calor entre el refrigerante líquido antes de llegar a la válvula de expansión y el gas procedente del evaporador, permite aumentar el subenfriamiento del líquido y el sobrecalentamiento del gas.

Al aumentar el subenfriamiento del refrigerante líquido antes de llegar a la válvula de expansión, aumenta la proporción de refrigerante líquido después la expansión. Este aumento de líquido en el evaporador permite absorber más calor, es decir, aumentar  $Q_E$ , sin influir en el trabajo del compresor  $W_C$ . Por tanto, la eficiencia de la instalación aumenta.

El sobrecaleamiento incide de forma negativa sobre la eficiencia de la instalación, ya que a mayor temperatura del gas, mayor es su volumen específico y menor su densidad. A velocidad de rotación constante, el caudal volumétrico del compresor es fijo. Esto significa que a menor densidad y caudal volumétrico fijo, menor es el caudal de masa del refrigerante y por tanto, menor el calor que transporta el circuito frigorífico.

Además, a mayor temperatura del gas aspirado, mayor es la temperatura de descarga. Una temperatura de descarga excesivamente alta causa la descomposición del refrigerante, que se quemé el aceite, se produzcan ácidos y se deposite cobre en los cilindros (cobreado).

Una de las razones para aislar térmicamente la tubería de aspiración entre el evaporador y el compresor es reducir al mínimo la absorción de calor fuera de la cámara frigorífica y limitar el sobrecalentamiento del gas refrigerante.

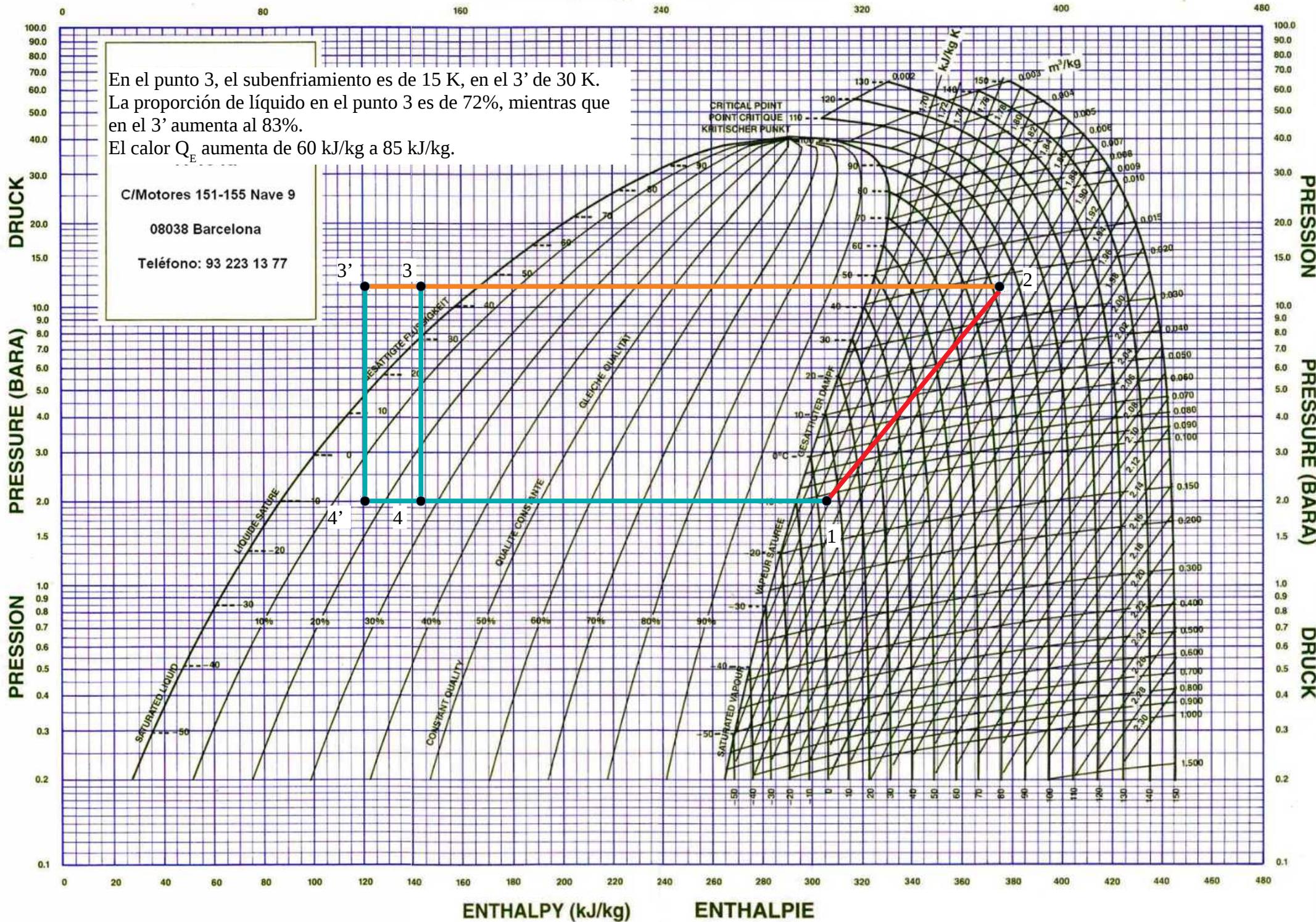
Sin embargo, sobreentalentar el refrigerante tiene ciertas ventajas, por ejemplo reduce el riesgo de que al compresor le llegue refrigerante líquido y se produzca una avería por golpe de líquido en el compresor.

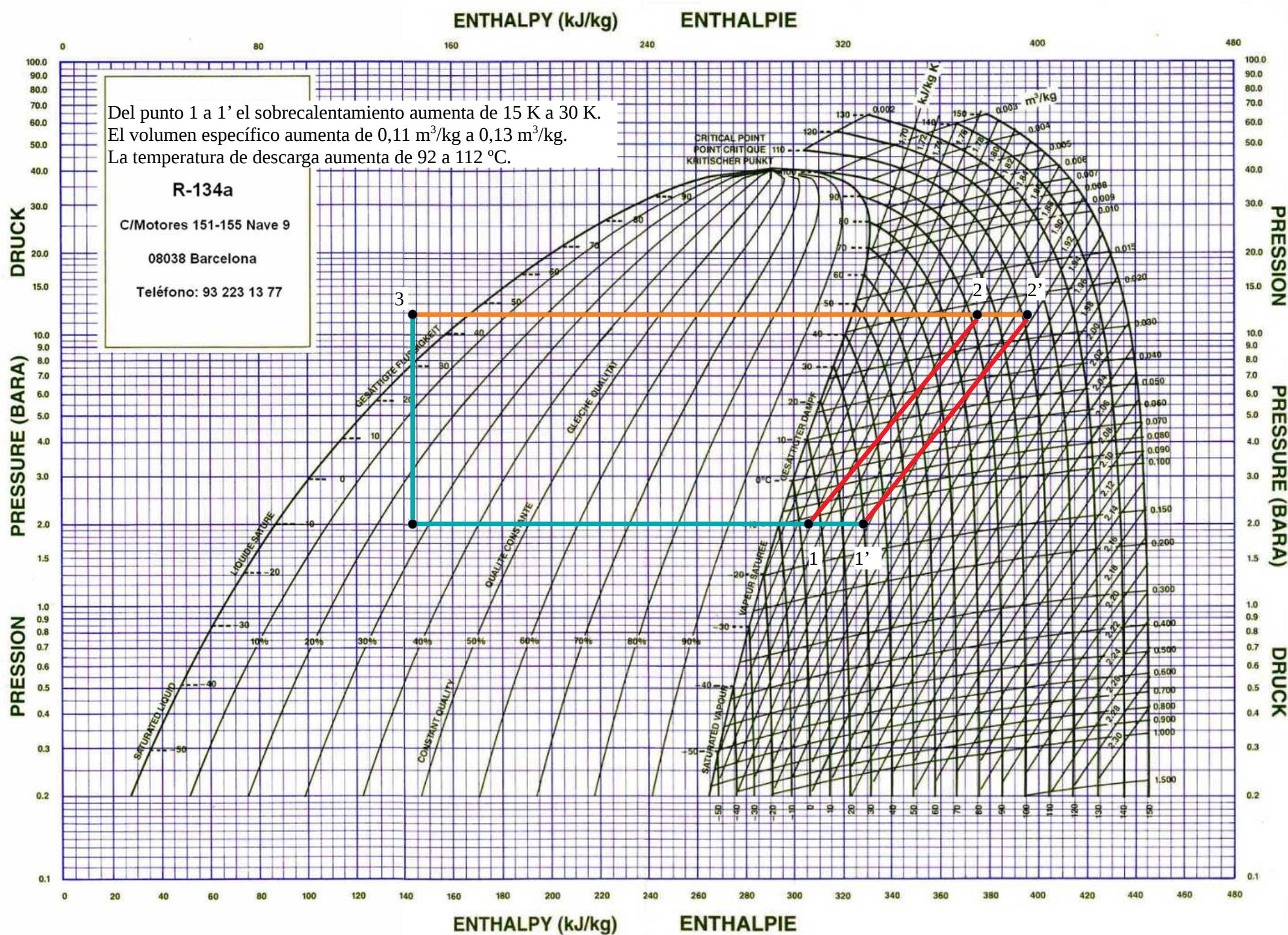
<http://bohnmxico.blogspot.com/2017/05/cobrizado-en-el-interior-de-los.html>

<https://www.dk-kaelteanlagen.de/produkte/dk-sauggas-waermetauscher/>

## ENTHALPY (kJ/kg)

## ENTHALPIE





## 1.4 Puntos de medición de temperatura y presión

En una instalación frigorífica las mediciones en los siguientes puntos son de especial importancia:

**a) Presión de evaporación**

Se mide en una toma de la tubería de aspiración.

De la presión de evaporación se deduce la temperatura de evaporación.

**b) Presión de condensación**

Se mide en una toma de la tubería de descarga del compresor.

De la presión de condensación se deduce la temperatura de condensación.

**c) Temperatura del refrigerante a la entrada de la expansión**

Se mide justo antes de la válvula de expansión.

**d) Temperatura del refrigerante a la salida del recinto refrigerado (  $t_o$  ).**

Se mide en la tubería de aspiración en el lugar en donde sale del recinto refrigerado.

Indica el sobrecalentamiento útil del refrigerante.

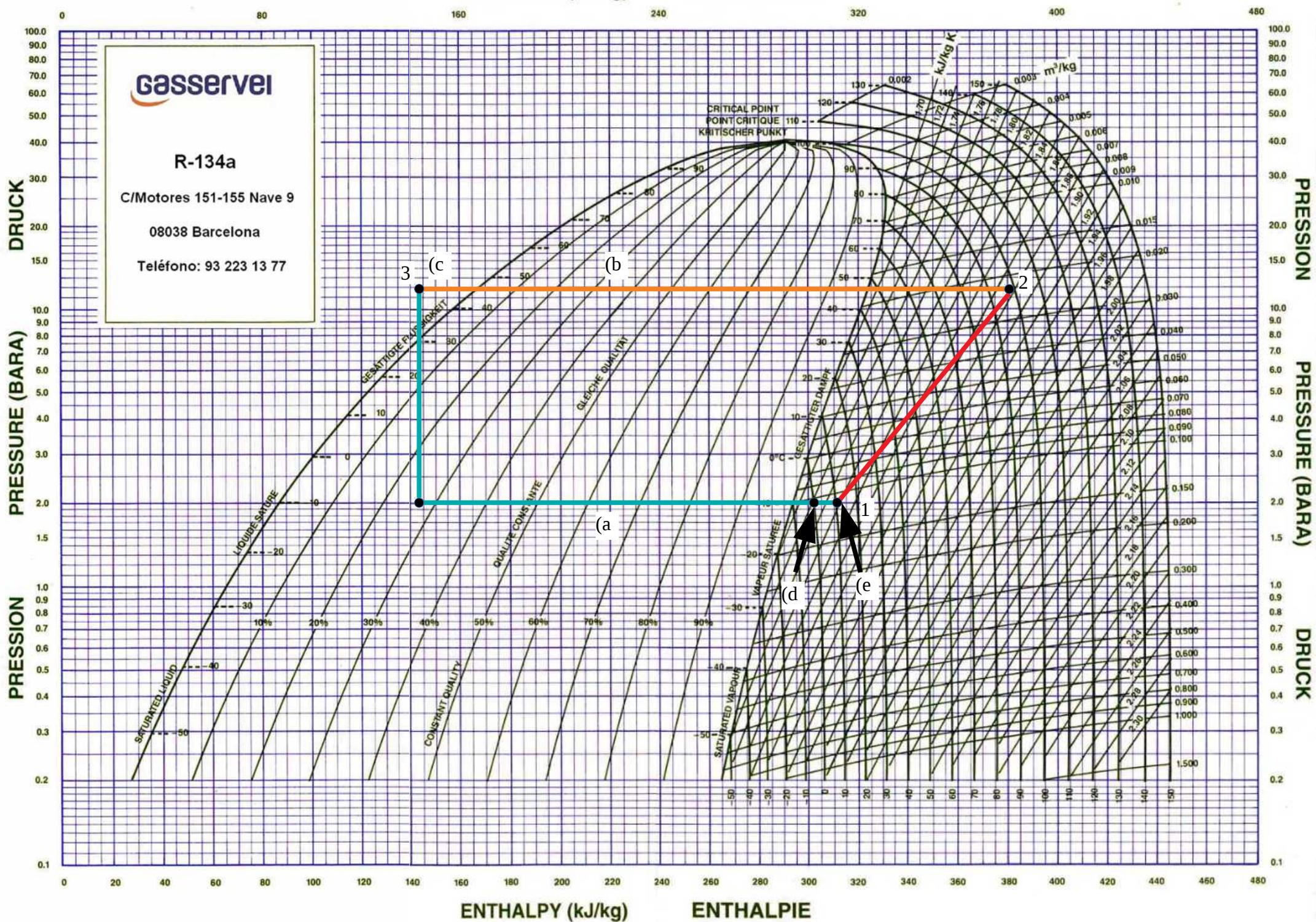
**e) Temperatura del refrigerante en la toma de aspiración del compresor(  $t_{oh}$  ).**

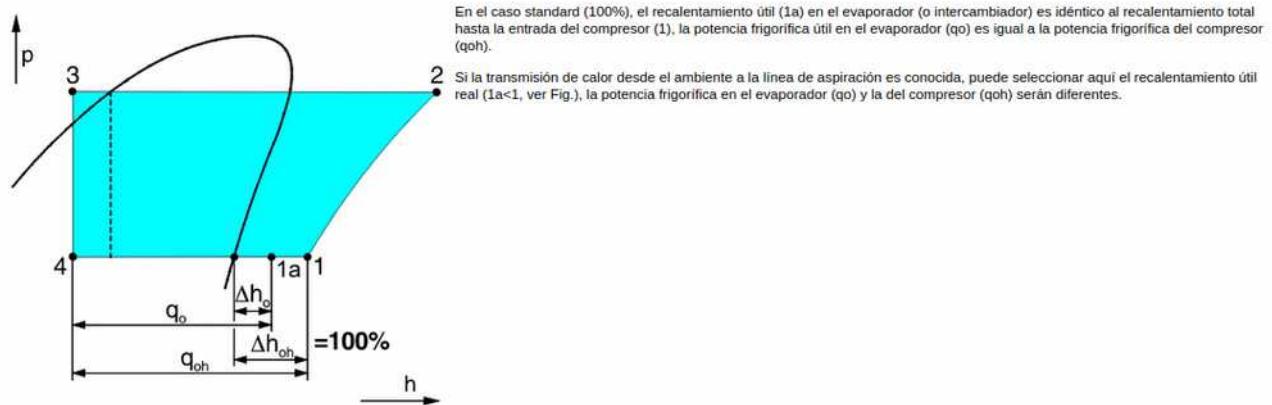
Se mide en la tubería de aspiración en la toma de aspiración del compresor.

Indica el sobrecalentamiento total del refrigerante.

## ENTHALPY (kJ/kg)

## ENTHALPIE





<https://www.bitzer.de/websoftware/Calculate.aspx?cid=1666546491573&mod=HHK>

## 1.5 Símbolos según UNE EN 1861

