

## Table of Contents

1 Teoría básica para frigoristas.....	2
1.1 Temperatura y calor.....	2
1.1.1 Escala de Celsius.....	2
1.1.2 Escala Fahrenheit.....	2
1.1.3 Escala absoluta.....	3
1.2 Presión.....	4
1.2.1 Presión absoluta, manométrica y presión de vacío.....	5
1.3 Ejercicios temperatura y presión.....	6
1.4 Energía y potencia.....	7
1.4.1 Trabajo y calor.....	7
1.4.2 Potencia.....	9
1.4.2.1 Potencia térmica.....	9
1.4.3 Rendimiento o eficiencia energética.....	10
1.5 Ejercicios energía y potencia.....	11
1.6 Calor.....	12
1.6.1 Calor específico.....	12
1.6.2 Cambio de estado. Calor sensible y latente.....	13
1.6.3 Transmisión del calor.....	15
1.6.4 Ejemplo de transmisión del calor a través de la pared de una cámara frigorífica.....	19
1.6.5 Saturación, subenfriado y sobrecalentado.....	20
1.7 Ejercicios calor.....	25
1.8 Leyes de los gases.....	27
1.8.1 Compresión de un gas a temperatura constante (Ley de Boyle).....	27
1.8.2 Expansión de un gas a presión constante (Ley de Gay-Lussac).....	28
1.8.3 Mezcla de gases (Ley de Dalton).....	29
1.8.4 Diagrama entálpico (Mollier).....	30
1.9 Ejercicios gases y diagrama p h.....	38
1.10 Caudal y velocidad.....	41
1.10.1 Conservación del caudal.....	42

# 1 Teoría básica para frigoristas

## 1.1 Temperatura y calor

La temperatura indica el nivel de calor que tiene un cuerpo. El calor es una forma de energía relacionada con el movimiento de las moléculas de una sustancia.

A medida que se aporta calor a una sustancia, el movimiento molecular aumenta. La temperatura también se incrementa, excepto cuando se produce un cambio de estado físico.

### 1.1.1 Escala de Celsius

La escala Celsius se basa en el punto de congelación y ebullición del agua a presión normal (1013 mbar).

Para graduar un termómetro en grados celsius, se toma como referencia para el valor inicial (0 °C) la temperatura de congelación del agua.

La temperatura de ebullición del agua se define como 100 °C.

### 1.1.2 Escala Farenheit

Igual que la escala Celsius, se basa en los puntos de congelación y ebullición del agua, pero dividiendo este rango en 180 grados y definiendo el punto de congelación como 32 ° F y el de ebullición como  $32\text{ °F} + 180\text{ °F} = 212\text{ °F}$ .

Por tanto, 1 °C equivale a 1,8 °F

Conversión de °C a °F

$$(T\text{ °C} \times 1,8) + 32\text{ °F} = T\text{ °F}$$

$$50\text{ °C} \rightarrow (50 \times 1,8) + 32\text{ °F} = 122\text{ °F}$$

Conversión de °F a °C

$$((T\text{ °F} - 32\text{ °F}) / 1,8) = T\text{ °C}$$

$$(122\text{ °F} - 32\text{ °F}) / 1,8 = 50\text{ °C}$$

### 1.1.3 Escala absoluta

En el [Sistema Internacional de Unidades](#) (SI), la escala de temperatura utilizada es grados Kelvin (K). Su cero corresponde a un estado en que la energía de movimiento (cinética) de las moléculas es cero. Teóricamente la temperatura en la que el movimiento molecular se detiene es 0 K y equivale a -273,15 °C. El punto de congelación del agua (o fusión del hielo), corresponde a 273,15 K y el de ebullición a 373,15 K.

Conversión entre K y °C

$$T\text{ K} = T\text{ °C} + 273,15\text{ K} \quad \text{y} \quad T\text{ °C} = T\text{ K} - 273,15\text{ °C}$$

## 1.2 Presión

La presión  $p$  se define como la fuerza  $F$  que actúa sobre la superficie  $A$ .

$$p = \frac{F}{A}$$

La unidad en el SI es el pascal  $1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$

Otra unidad de presión frecuentemente utilizada es el bar, que equivale a la presión que ejerce una columna de agua (c.a.) de 10 m de altura.

$$1 \text{ bar} = \frac{10\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{m^2} = 98\,100 \frac{N}{m^2} \text{ aprox. } 100\,000 \frac{N}{m^2}$$

100 000 Pa equivalen aproximadamente a 1 bar, por tanto, 1 Pa equivaldría a la presión de 0,1 mm c.a.

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 10 \text{ mm c.a.} = 1 \text{ cm c.a.}$$

Como la unidad de presión Pa daría valores muy grandes en las instalaciones frigoríficas, resulta más cómodo utilizar como unidad de presión el bar.

En la medición de la presión atmosférica se suele utilizar el mbar. Se ha definido la presión normal como 1013 mbar, por ser una presión atmosférica muy frecuente a nivel de mar. La presión normal sirve como una presión de referencia en cálculos termodinámicos.

### 1.2.1 Presión absoluta, manométrica y presión de vacío

La presión en cualquier sistema de unidades se puede expresar como presión absoluta  $p_{abs}$  o como presión relativa o manométrica  $p_{man}$ . Esta denominación no afecta a la unidad, sino al cero de la escala. La presión absoluta se mide respecto al cero absoluto (vacío total) y la presión relativa con relación a la presión atmosférica local  $p_{atm}$ . La presión atmosférica normal se suele aproximar con 1 bar.

La presión de vacío es una presión inferior a la atmosférica local, y se mide con el vacuómetro, indicando presiones negativas.

$$p_{abs} = p_{man} + p_{atm}$$

## 1.3 Ejercicios temperatura y presión

### ***1\_2 Ejercicio 1.3-1***

Busca información sobre diferentes tipos de termómetros y explica sus principios de funcionamiento.

### ***1\_2 Ejercicio 1.3-2***

¿A qué temperatura corresponden 30 °C en °F y en K?

### ***1\_2 Ejercicio 1.3-3***

¿A qué presión corresponde 1 m c.a. en bar y en Pa?

### ***1\_2 Ejercicio 1.3-4***

Un manómetro marca una presión de 5,3 bar.

¿Cuál es la presión absoluta?

## 1.4 Energía y potencia

### 1.4.1 Trabajo y calor

Mediante el trabajo o el calor, se transmite energía entre cuerpos.

Por ejemplo, para subir un compresor de 50 kg de masa desde la calle a la azotea de un edificio de 10 m de altura, se realiza un trabajo mecánico que causa un aumento de la energía potencial del compresor.

El trabajo  $W$  (work) sobre un objeto está definido como fuerza  $F$  por la distancia  $d$  recorrida por el objeto.

$$W = F \cdot d$$

En el ejemplo, sobre el compresor actúa la fuerza de la gravedad, que conociendo la masa  $m$  se calcula:

$$F = m \cdot g$$

constante de aceleración terrestre  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$

$$F = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 490,5 \text{ N}$$

Esta es la fuerza necesaria para levantar el compresor. El trabajo se calcula multiplicando esta fuerza por la altura a la que se eleva el compresor.

$$W = 490,5 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} = 4905 \text{ Nm}$$

Normalmente el trabajo no se indica en Nm, sino en julios (joule)  $J$ .

Como  $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$ , el trabajo necesario para subir el compresor a la azotea es de  $4905 \text{ J}$ .

El calor es la energía que se transmite de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura. La dirección de la transferencia del calor es siempre del cuerpo de mayor temperatura al cuerpo de menor temperatura, de caliente hacia frío. Decimos que se alcanza un equilibrio térmico cuando las temperaturas de los cuerpos se han igualado.

Como ejemplo podemos observar un cubito de hielo en una vaso de agua. El agua del vaso que rodea el cubito es el cuerpo caliente, el cubito el cuerpo frío. Si no aportamos energía desde el exterior, no podemos evitar que el cubito aumente su temperatura hasta fundirse y desaparecer. La temperatura del agua del cubito y del agua contenida en el vaso, al final del proceso, se han igualado. El agua del cubito ha aumentado su temperatura, mientras que la temperatura del agua del vaso ha bajado.

El calor se identifica con el símbolo **Q**. En el antiguo sistema métrico de unidades se usaba el término caloría **cal** para cuantificar el calor. La caloría está definida como la cantidad de calor necesaria para elevar 1 K la temperatura de 1 g de agua.

En el SI ([Sistema Internacional de Unidades](#)), la unidad en la que se mide el calor es el julio **J**.

Para elevar la temperatura de 1 g de agua 1 K, se necesitan 4,19 J.

La relación entre caloría y julio es:

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$$

El calor específico  $c_p$  (a presión constante) de una sustancia es la energía que se necesita para elevar la temperatura de 1 kg de la sustancia 1 K.

En el caso del agua en estado líquido, para elevar 1 kg de agua 1 K, necesitamos 4,19 kJ.

Por tanto el calor específico del agua ( $H_2O$  en estado líquido) es de  $c_{p \text{ H}_2\text{O}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

El calor específico indica la energía que se necesita para elevar la temperatura 1 K de 1 kg de la sustancia.

Para calcular la energía transmitida a una sustancia que cambia de temperatura, se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad \Delta T = v_{\text{final}} - v_{\text{inicial}}$$

con

$Q$  calor transmitido en J

$c_p$  calor específico de la sustancia en  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$\Delta T$  diferencia entre temperatura final ( $v_{\text{final}}$ ) y temperatura inicial ( $v_{\text{inicial}}$ )

Por ejemplo, para enfriar 2 l de agua de 20 °C a 10 °C, ¿cuánto calor tiene que ceder el agua?

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$$

$$Q = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2 \text{ kg} \cdot (10^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2 \text{ kg} \cdot (-10^\circ\text{K}) = -83,8 \text{ kJ}$$

En este ejemplo, el  $\Delta T$  negativo indica que el agua cede calor.

Las diferencias de temperatura se indican en grados Kelvin.



**+Energía interior a nivel molecular - Temperatura+**

[Marcombo](#) - Materia y moléculas, pág. 17

[Marcombo](#) - Energía, pág. 18

[Marcombo](#) – Calor y frío, pág. 19

[Marcombo](#) – Calor y temperatura, pág. 21

[Marcombo](#) – Calor y temperatura, pág. 22 – cálculo de la temperatura media de la mezcla de líquidos

[Marcombo](#) – Energía interna, pág. 28

### 1.4.2 Potencia

La potencia **P** está relacionada con el trabajo. La potencia indica la capacidad de hacer un trabajo **W** en un determinado tiempo **t**.

$$P = \frac{W}{t}$$

**W** trabajo en J

**t** tiempo en s

La unidad de la potencia es el watio **W**. Esto puede inducir a confusión con el trabajo, pues el símbolo para ambos es la W, pero hay que recordar que el trabajo es una magnitud y el watio la unidad de la potencia.

Por ejemplo, un compresor de 50 kg se puede subir a la azotea de un edificio en una hora, o en 10 minutos. Para subirlo en 10 minutos, se necesitará 6 veces más potencia que para subirlo en una hora.

El cálculo sería:

$$P_{1h} = \frac{4905 J}{3600 s} = 1,36 W$$

$$P_{10min} = \frac{4905 J}{600 s} = 8,18 W$$

El caballo de vapor **CV** y el caballo de fuerza **HP**, son unidades de potencia antiguas, pero que a veces todavía aparecen, sobre todo en documentación antigua.

$$1 CV = 735,5 W$$

$$1 HP = 745,7 W$$

#### 1.4.2.1 Potencia térmica

La potencia térmica indica la velocidad con la que el calor pasa de un cuerpo a otro. Se define como el calor referido a una unidad de tiempo.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

Por ejemplo, un depósito de agua de 50 kg se enfria de 50 a 40 °C en 10 minutos. La potencia térmica para realizar este enfriamiento es de :

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{4,19 \frac{kJ}{kg K} \cdot 50 kg \cdot 10 K}{600 s} = 3,49 kW = 3490 W$$

Antiguamente se utilizaba la kilocaloría, o frigoría para indicar la potencia térmica. 1 kcal = 4,19 kJ

### 1.4.3 Rendimiento o eficiencia energética

Las máquinas no pueden transformar íntegramente la energía que recibe en trabajo útil, ya que una parte de la energía se pierde, por ejemplo en forma de calor. Se distingue entre potencia consumida

$P_c$  y potencia útil o producida  $P_u$ . El rendimiento  $\eta$  indica la relación entre la potencia útil y la consumida.

$$\eta = \frac{\text{potencia útil}}{\text{potencia consumida}}$$

La potencia perdida es  $P_p = P_c - P_u$

## 1.5 Ejercicios energía y potencia

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-1***

Calcula el trabajo necesario para subir un vehículo de 1000 kg una altura de 100 m.

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-2***

Calcula la energía necesaria para calentar los 150 l de agua de una bañera. El agua llega con una temperatura de 10 °C y se calienta a 37 °C.

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-3***

Calcula la temperatura en °C de la mezcla de 15 l de agua a 10 °C con 30 l de agua a 30 °C.

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-4***

Calcula la potencia de un ciclista de 100 kg (peso del ciclista más bici) que sube 100 m en 10 min.

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-5***

Calcula la potencia necesaria para calentar 10 l de agua de 20 °C a 100 °C en 10 minutos.

Indica la potencia en kW y en  $\frac{kcal}{h}$  .

### ***1\_2 Ejercicio 1.5-6***

Calcula el rendimiento de un calentador de agua de 100 W, que tarda en calentar 2 l de agua de 10 °C a 100 °C en 3 h.

## 1.6 Calor

### 1.6.1 Calor específico

El calor específico  $c_p$  (a presión normal constante) de una sustancia es la cantidad de calor que debe ceder o absorber 1kg de dicha sustancia para modificar su temperatura 1 K.

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot (v_2 - v_1)} \quad \text{la unidad es} \quad \frac{J}{kg \cdot K}$$

$v_1$  temperatura inicial en °C

$v_2$  temperatura final en °C

Ejemplos de calor específico para distintas sustancias

$$C_{p \text{ aire}} = 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad (\text{a } 25 \text{ °C})$$

$$C_{p \text{ agua}} = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Material	Calor específico J/(kg·K°)
Aceite oliva	2000
Acero	460
Acero Inoxidable	510
Aire	1010
Agua	4186
Aluminio	880
Cobre	390
Estaño	230
Granito	800
Hierro	450
Madera	1760
Mercurio	138
Oro	130
Plata	235
Platino	130
Plomo	130
Sodio	1300

Fuente: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-calor-especifico.php>

### 1.6.2 Cambio de estado. Calor sensible y latente.

En la naturaleza, las sustancias se encuentran en tres estados (fases) diferentes, sólido, líquido y gaseoso. La presión y la temperatura determinan el estado de una sustancia. Variando presión o temperatura, se producen cambios de estado.

El paso de sólido a líquido se llama fusión, inversamente, de líquido a sólido se congela o solidifica. Aumentando la temperatura de un líquido hasta el punto de ebullición, el líquido comienza a hervir, pasando al estado gaseoso (ebullición, vaporización). El proceso inverso es la condensación, del estado gaseoso la sustancia pasa al estado líquido.

También existe una transformación de sólido directamente al estado gaseoso, sin pasar por el estado líquido. Esto se llama sublimación.

Cuando el calor aportado o eliminado a una sustancia provoca un cambio de temperatura, se habla de calor sensible. Esto sucede al calentar una sustancia sólida, líquida o gaseosa, sin que se produzca un cambio de estado.

Durante un cambio de estado, la temperatura se mantiene constante, a pesar de estar produciéndose una aportación o eliminación de calor.

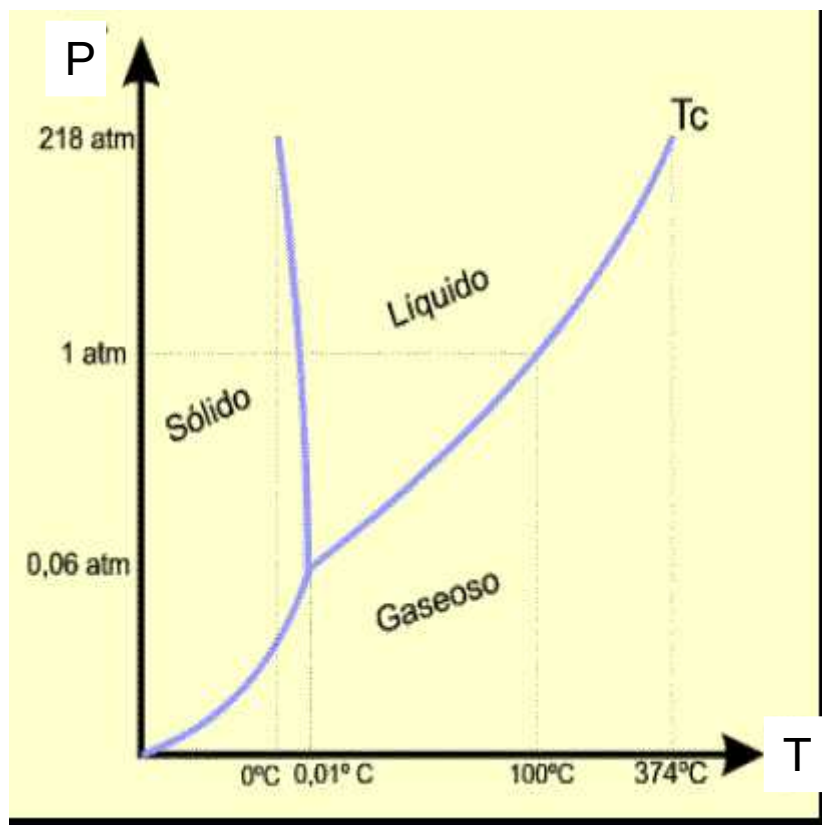


Diagrama de fases del agua

Para que ocurra un cambio de estado, tiene que cambiar el contenido de energía de una sustancia.

Para pasar del estado sólido al líquido, fusión, hay que aportar calor, o reducir la presión. A la inversa, para congelar una sustancia del estado líquido al sólido, la sustancia tiene que ceder calor o aumentar la presión.

Para pasar del estado líquido al gaseoso, ebullición (vaporización), hay que aportar calor, o reducir la presión. A la inversa, para condensar una sustancia del estado gaseoso al líquido, la sustancia tiene que ceder calor o aumentar la presión.

Los cambios de estado se producen a temperatura constante. Por ejemplo, el agua se congela a 0°C y vaporiza a 100 °C a presión normal.

El calor latente de fusión (congelación) es la cantidad de calor que hay que aportar (ceder) para que 1 kg de una sustancia se funda (congele).

El calor latente de vaporización (condensación) es la cantidad de calor que hay que aportar (ceder) para que 1 kg de una sustancia pase del estado líquido al gaseoso (condense).

En el caso del agua, el calor latente de fusión (congelación) es

$$Q_{fus} = 334 \frac{kJ}{kg}$$

El calor latente de fusión varía muy poco con la presión.

En el caso de la vaporización, el calor latente del agua es de

$Q_{vap} = 2264 \frac{kJ}{kg}$  a presión normal. Al aumentar la presión aumenta la temperatura de ebullición (saturación) del líquido y disminuye el calor latente de vaporización.

Información adicional:

[Marcombo](#) – Efecto del calor sobre el estado físico, pág. 30

[Marcombo](#) – Estados de un cuerpo, pág. 31

### 1.6.3 Transmisión del calor

Las diferencias de temperatura causan flujos de calor. Se diferencia entre la transmisión del calor por convección, conducción y radiación.

La **transmisión por convección** se produce en gases y líquidos, por el movimiento del gas o líquido en forma de corrientes. La convección natural son corrientes causadas por la diferencia de temperatura de la sustancia, que causa un cambio en su densidad. Tanto gases como líquidos reducen su densidad al aumentar su temperatura. Si se calienta un volumen de aire, este tiene tendencia a subir, por ser menos denso que el aire que lo rodea. Este efecto se aprovecha en los globos de aire caliente. También es la causa del tiro de una chimenea.

Para entender cómo influye la velocidad del fluido en la transmisión de calor entre el fluido y la superficie del cuerpo a enfriar, supongamos una persona, que se encuentra en el exterior, a  $-5^{\circ}\text{C}$  de temperatura ambiente.

Si no hay viento, el aire a su alrededor se ira calentando, formando una zona de aire (zona de transición), en la que la temperatura baja desde la temperatura de la superficie de la ropa, por ejemplo  $5^{\circ}\text{C}$ , hasta la temperatura ambiente  $-5^{\circ}\text{C}$ . El grosor de esta zona podría ser de unos pocos centímetros.

Si se levanta viento, el grosor de la zona de transición de temperatura se reduce y la temperatura de la superficie de la ropa baja. El flujo de calor  $\dot{Q}$  del cuerpo al ambiente aumenta.



Paulino Posada





Cuando se utiliza un ventilador para aumentar el flujo de aire y calor en un intercambiador (evaporador, condensador), se habla de convección forzada.

$$\dot{Q}_{convección} = \alpha \cdot A \cdot (v_2 - v_1)$$

A superficie de transmisión en m<sup>2</sup>

$\alpha = 20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  coeficiente de transmisión aproximado para la transmisión de calor del aire

(velocidad del aire < 5 m/s) a una pared lisa

$v_2$  Temperatura del aire alejado de la pared en °C

$v_1$  Temperatura de la pared en contacto con el aire °C

El coeficiente  $\alpha$  es complicado de obtener. Depende de muy diversas condiciones, por ello para los cálculos se utilizan valores que intentan ofrecer resultados aproximados a las condiciones reales.

**La transmisión por conducción** es la que se produce a través de una sustancia en estado sólido, por ejemplo una pared.

$$\dot{Q}_{conducción} = \frac{\lambda \cdot A \cdot (v_2 - v_1)}{x}$$

$\lambda$  conductividad térmica en  $\frac{W}{m \cdot K}$  depende del material

$v_2$  temperatura en superficie exterior de la pared °C

$v_1$  temperatura en superficie interior de la pared °C

A superficie de transmisión en m<sup>2</sup>

x grosor de la pared en m

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m·K)
Chapa de Aluminio	2.700	203
Hormigón	2.400	1,63
Vidrio plano	2.500	0,81
Ladrillo macizo	1.600	0,81
Tejas (plana)	1.800	0,76
Yeso (placas)	1.000	0,44
Hormigón liviano	1.000	0,36
Nieve compactada	300	0,23
Madera (pino)	700	0,17
Lana de vidrio	11	0,041
Lana de vidrio	15	0,038
Lana de vidrio	35	0,038
Lana de vidrio	50	0,032
Lana de vidrio	70	0,031
Lana de vidrio	100	0,032
Poliuretano rígido	35	0,020
Poliuretano proyectado	30	0,024

*Fuente: Norma IRAM 11601. (Argentina)*

<https://es.wikipedia.org/wiki/Poliuretano>

La **transmisión por radiación** se produce sin necesidad de una sustancia transmisora. Por ejemplo, el sol transmite energía a la tierra por radiación. Esta radiación se propaga a través del vacío en el espacio entre el sol y la tierra.

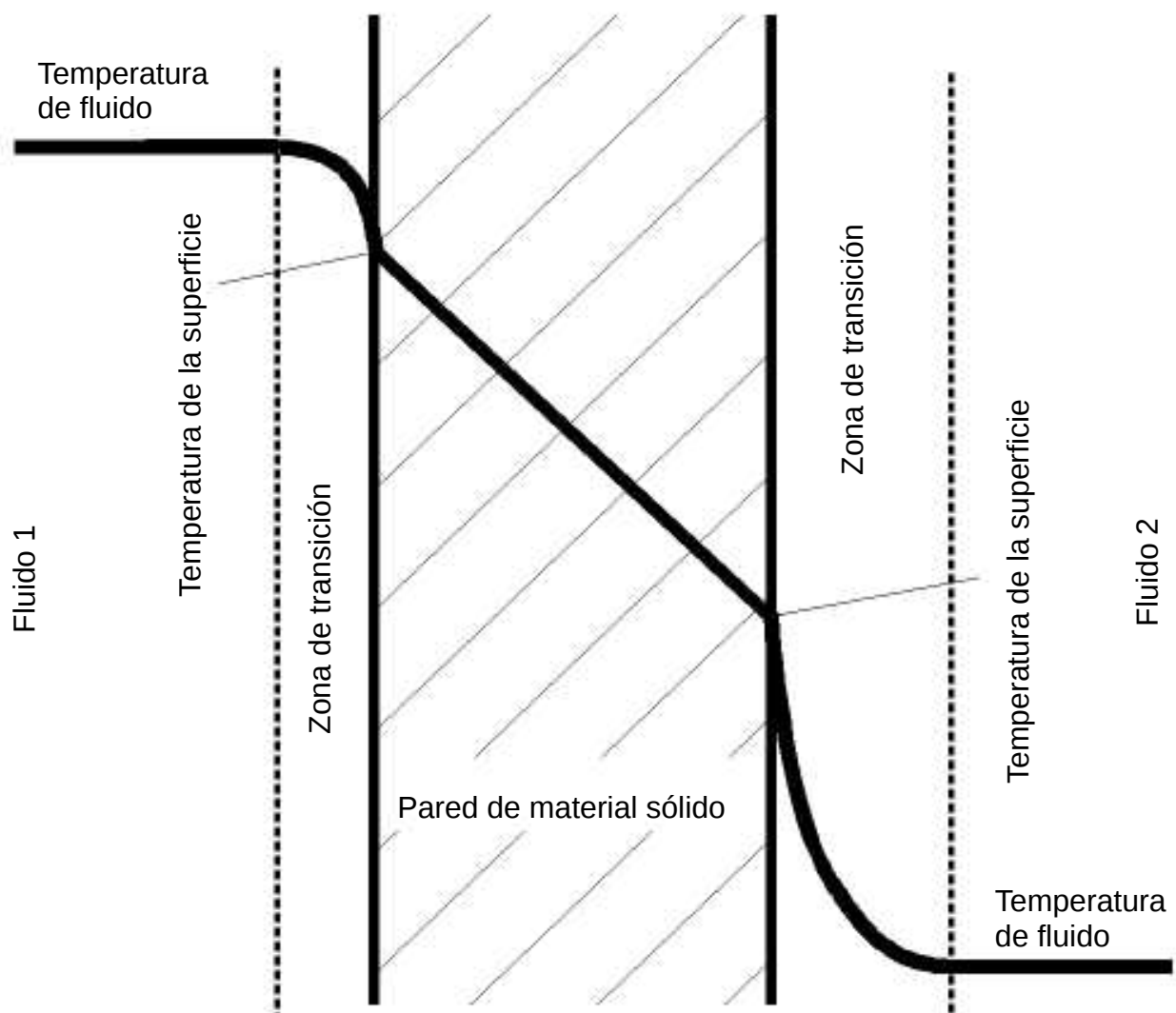
$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$\varepsilon$  grado de emisión sin unidad,  $0 < \varepsilon < 1$

$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  constante

$T$  temperatura absoluta en K

$A$  superficie de transmisión en  $m^2$



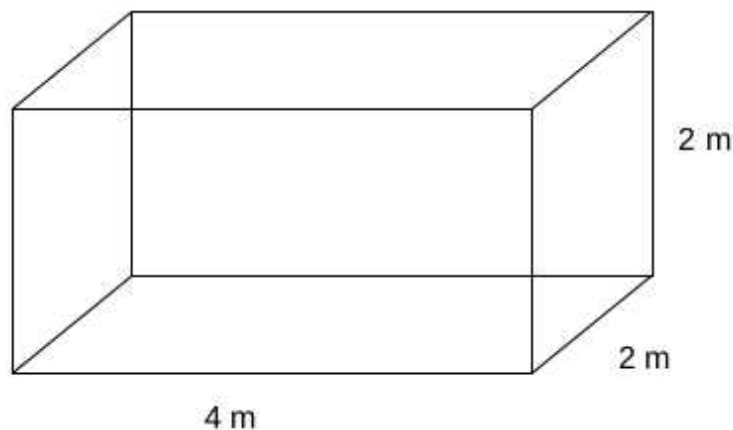
### 1.6.4 Ejemplo de transmisión de calor a través de la pared de una cámara frigorífica

Supongamos una cámara frigorífica con paredes de polietileno de alta densidad (conductividad térmica  $\lambda = 0,5 \frac{W}{m \cdot K}$ ), de 100 mm de espesor.

La temperatura del aire en el interior es de 7,5 °C y en el exterior de 29,5 °C.

El flujo de calor desde el suelo se desprecia.

Calcula el flujo de calor que se produce a través de las paredes y el techo.



Conducción a través del polietileno

$$\dot{Q}_{condu} = \frac{\lambda \cdot A \cdot (v_{pex} - v_{pin})}{x}$$

Conociendo el flujo de calor, se pueden calcular las temperaturas del aire interior y exterior:

Transmisión de calor por convección del aire exterior a pared exterior .

$$\dot{Q}_{convec} = \alpha \cdot A \cdot (v_{aex} - v_{pex})$$

Transmisión de calor por convección del aire interior a pared interior .

$$\dot{Q}_{convec} = \alpha \cdot A \cdot (v_{pin} - v_{ain}) \quad \dot{Q}_{convec} = \alpha \cdot A \cdot (v_{pin} - v_{ain})$$

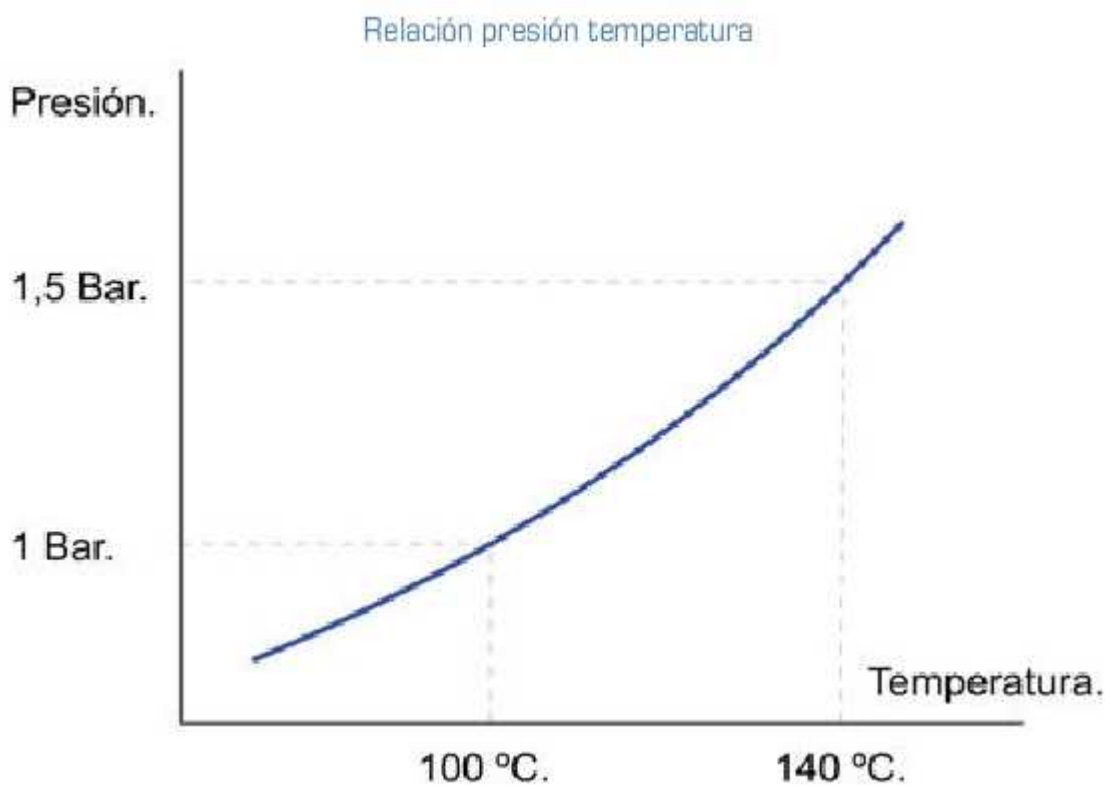
### 1.6.5 Saturación, subenfriamiento y sobrecalentamiento

A las condiciones de presión y temperatura a las cuales hierve un determinado líquido se les llama estado saturado, el punto de ebullición está determinado por la temperatura de saturación y presión de saturación. Un líquido a la temperatura de saturación se le llama líquido saturado y un vapor a la temperatura de saturación se le llama vapor saturado. Aunque el vapor saturado y el líquido saturado están a la misma temperatura y presión, su contenido de energía es distinto.

Un líquido a una temperatura por debajo de su temperatura de saturación se le llama subenfriado.

Un vapor a una temperatura por encima de su temperatura de saturación se le llama sobrecalentado o recalentado.

La energía utilizada para aumentar la temperatura del vapor por encima de la temperatura de saturación se llama energía de sobrecalentamiento o recalentamiento.



Variación del punto de ebullición del agua

### Estados saturado, subenfriado y sobrecalentado

A las condiciones de presión y temperatura a las cuales hierve un determinado líquido se les llama estado saturado, y al punto de ebullición se le conoce como temperatura de saturación y presión de saturación. Un líquido a la temperatura de saturación se le llama líquido saturado y un vapor a la temperatura de saturación se le llama vapor saturado.

Un líquido a cualquier temperatura por debajo de su temperatura de saturación correspondiente es un líquido subenfriado. Dicho de otra forma, si después de la condensación, el líquido resultante es enfriado de tal manera que su temperatura esté por debajo de la temperatura de saturación, se dice que el líquido está subenfriado.

Un vapor a cualquier temperatura por encima de su temperatura de saturación correspondiente es un vapor sobrecalentado. Una vez que un líquido haya sido vaporizado, la temperatura del vapor resultante podrá ser incrementada mediante la adición de energía. La energía suministrada para sobrecalentar el vapor se conoce como sobrecalentamiento.

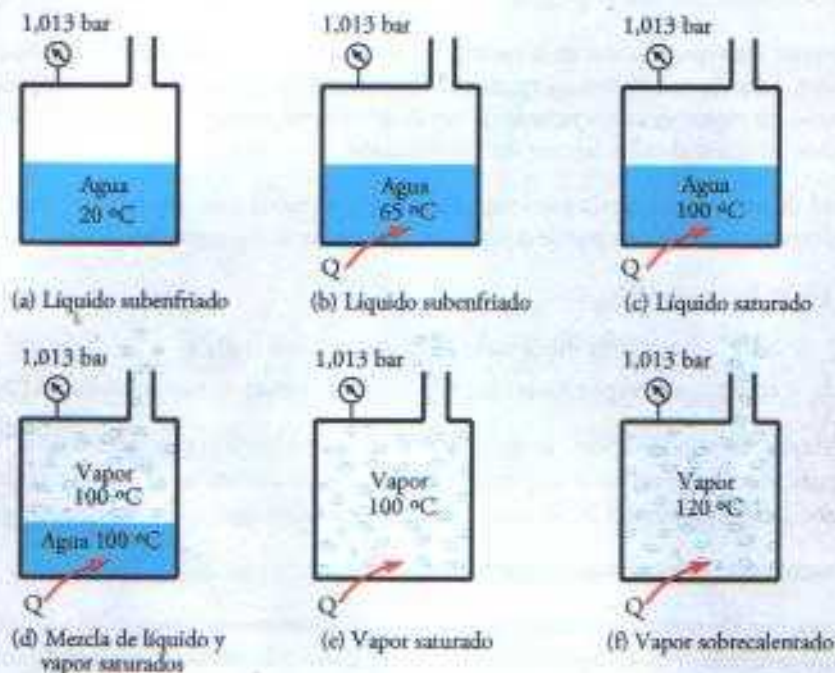
### Estudio del fenómeno de vaporización y condensación

Se produce vaporización en una sustancia cuando esta cambia de estado líquido a estado vapor o gaseoso. Para comprender mejor el significado de lo anterior, realicemos un experimento en el que se muestra el cambio de estado del agua a la presión atmosférica.

La Figura (a) muestra un recipiente de agua a temperatura ambiente. El recipiente está abierto y se encuentra al nivel del mar, por tanto, el agua está sujeta a una presión atmosférica



de 1,013 bar. A medida que se agrega calor ( $Q$ ) al agua (b), su temperatura aumenta de forma continuada. Llega un momento (a 100 °C) en que la temperatura deja de subir (c), aunque sigue agregándose más calor. A partir de este momento, el agua líquida se transforma gradualmente en vapor de agua (d) y la temperatura sigue sin aumentar. A este proceso se le llama vaporización o ebullición. Llega un momento (e) en el que toda el agua se ha vaporizado, manteniéndose todavía a 100 °C. Si a partir de este momento, se agrega más calor (f), la temperatura del vapor de agua comienza a aumentar de nuevo.



Esta serie de procesos descritos para la vaporización pueden llevarse a cabo en orden inverso. Si eliminamos calor del vapor (f) disminuye su temperatura. Si seguimos enfriando (e), la temperatura deja de descender, y el vapor de agua se transforma en agua líquida (d). A este proceso se le llama condensación o licuefacción. Cuando todo el vapor se ha condensado (c), la disminución de calor provoca un descenso en la temperatura del líquido.

La vaporización de un líquido se logra de diferentes modos:

- Aportando calor al líquido.
- Disminuyendo la presión del líquido.
- Combinando estos dos métodos.

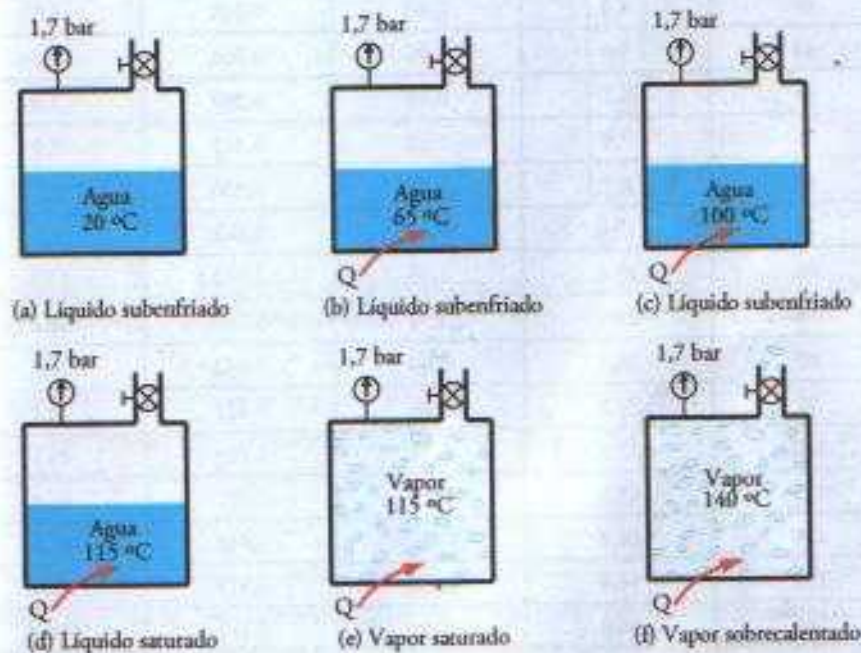
La condensación de un vapor se logra de diferentes modos:

- Extrayendo calor del vapor.
- Aumentando la presión del vapor.
- Combinando estos dos métodos.

### Efecto de la presión sobre la temperatura de saturación

En el experimento anterior, la presión atmosférica era de 1,013 bar. Ahora llevaremos a cabo el mismo experimento pero esta vez con una presión más elevada, de 1,7 bar.

Cuando el agua alcanza los 100 °C (c) y se agrega más calor, esta no hierve como en el caso anterior, pero la temperatura continúa aumentando. Sin embargo, cuando la temperatura alcanza los 115 °C, comienza el proceso de vaporización y la temperatura permanece constante hasta que el líquido se evapora por completo. Esto demuestra que la temperatura a la cual hierve el agua cambia con la presión. Cuanto mayor es la presión sobre una sustancia, mayor es la temperatura de vaporización, y viceversa.



Un ejemplo práctico es cuando se cocina comida dentro de un recipiente cerrado que pueda presurizarse (olla a presión). Dejando que la presión suba 1 bar por encima de la presión atmosférica (2 bar o 200 kPa), puede elevarse el punto de ebullición a 120 °C.

Si queremos que una sustancia entre en ebullición a baja temperatura se debe reducir su presión hasta que coincida con la temperatura a la cual se está en el punto de líquido saturado. Por ejemplo, en un lugar a 2.240 m por encima del nivel del mar, la presión atmosférica es de unos 0,70 bar o 525 mm Hg. A esa presión, el agua se vaporiza a unos 90 °C. Disminuyendo la presión hasta 6 mm Hg (0,8 kPa), el agua se vaporizará a 4 °C.

En la tabla siguiente se da la relación presión/temperatura, que relaciona la presión de saturación y la temperatura de saturación del agua:



**Tabla de presión del vapor saturado en función de la temperatura**

Temperatura en °C	Presión absoluta del vapor saturado en bar
0	0,0061
10	0,0123
20	0,0234
30	0,0425
40	0,0739
50	0,1235
60	0,1995
70	0,312
80	0,4742
90	0,7018
100	1,0142
110	1,4342
120	1,99
130	2,7
140	3,62

Fuente:

[https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-d\\_599.html?vA=20&units=C#](https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-d_599.html?vA=20&units=C#)

## 1.7 Ejercicios calor

### 1\_2 Ejercicio 1.7-1

Calcula la energía necesaria para calentar 0,5 kg de aceite de oliva de 30 °C a 120 °C.

### 1\_2 Ejercicio 1.7-2

Calcula la energía necesaria para enfriar 0,5 kg de agua a 15 °C a una temperatura de -5 °C

(p = 1013 mbar).

### 1\_2 Ejercicio 1.7-3

Calcula la energía necesaria para calentar 0,5 kg de agua a 80 °C a una temperatura de 120 °C

(p = 1013 mbar).

### 1\_2 Ejercicio 1.7-4

Calcula el flujo de calor que entra a una cámara frigorífica de las siguientes características:

- Pared de panel sandwich de PU de 80 mm y  $0,24 \frac{W}{m \cdot K}$
- Movimiento de aire en paralelo a la pared de menos de  $5 \frac{m}{s}$
- Temperatura exterior 40 °C, temperatura interior 5 °C
- Superficie pared cámara  $40 m^2$
- ¿Cual es la dirección del calor?
- ¿De que tipo de transmisión de calor se trata?

<https://www.panelsandwich.com/panel-frigorifico/panel-sandwich-camaras-frigorificas/>

**1\_2 Ejercicio 1.7-5**

Calcula el flujo de calor a través de la fachada de una vivienda de las siguientes características:

- Pared de ladrillo de 24 cm y  $0,19 \frac{W}{m \cdot K}$
- Movimiento de aire en paralelo a la pared de menos de  $5 \frac{m}{s}$
- Temperatura exterior 0 °C, temperatura interior 20 °C
- Superficie fachada  $100 m^2$
- ¿Cual es la dirección del calor?
- ¿De que tipo de transmisión de calor se trata?

**1\_2 Ejercicio 1.7-6**

Calcula el flujo de calor causado por un cuerpo negro ( $\varepsilon = 1$ ) de  $0,5 m^2$  a una temperatura de 0 °C, 100 °C y 200 °C.

**1\_2 Ejercicio 1.7-7**

Calcula el flujo de calor por m<sup>2</sup> en la pared de una vivienda, de 20 cm de espesor, suponiendo que la pared es lisa y la velocidad del aire menor a 5 m/s. La conductividad térmica de la pared es de

$\lambda = 0,2 \frac{W}{m \cdot K}$ . La temperatura de la superficie de la pared exterior es de 0 °C, la de la interior de

20 °C.

Indica las temperaturas del aire en el interior y exterior.

Fuentes:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion\\_\(W%C3%A4rme%C3%BCbertragung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion_(W%C3%A4rme%C3%BCbertragung))

[https://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang\\_gase/wuebergang\\_gase.php](https://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php)

<https://mefics.org/es/coeficiente-global-de-transferencia-de-calor/>

<https://me-lrt.de/strahlung-warmeleitung-konvektion>

<http://www.erica.es/aislamiento-termico/>

## 1.8 Leyes de los gases

### 1.8.1 Compresión de un gas a temperatura constante (Ley de Boyle)

Si se comprime un gas contenido en un recipiente, aumentan la presión y la temperatura del gas. Si se espera a que el gas se enfrie hasta volver a la temperatura ambiente, es decir, ceda al ambiente la energía térmica equivalente a la energía mecánica que le fue aportada durante la compresión, se establece la siguiente relación entre presión y volumen:

$$p \cdot V = \text{constante}$$

Siendo  $p$  la presión absoluta.

El volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión a temperatura constante.

$$V = \frac{\text{constante}}{p}$$

De ello se deduce

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Siendo  $p_1$  y  $V_1$  presión y volumen iniciales

y  $p_2$  y  $V_2$  presión y volumen finales a la temperatura absoluta  $T$ .

### 1.8.2 Expansión de un gas a presión constante (Ley de Gay-Lussac)

Si se calienta un gas contenido en un recipiente, manteniendo constante la presión, el volumen del gas aumenta de forma proporcional a la temperatura absoluta.

El volumen de un gas es proporcional a la temperatura a presión constante.

$$V = \text{constante} \cdot T$$

De ello se deduce

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Siendo  $V_1$  y  $T_1$  presión y volumen iniciales

y  $V_2$  y  $T_2$  presión y volumen finales a la presión absoluta  $p$ .

### 1.8.3 Mezcla de gases (Ley de Dalton)

A inicios del siglo XIX, John Dalton, químico británico, descubrió que la atmósfera está compuesta por muchos gases distintos. Encontró que cada uno de estos gases creaba su propia presión y que la presión total era igual a la suma de las presiones parciales. La Ley de Dalton establece que la presión total de una mezcla de gases confinada en un recipiente es la suma de las presiones de cada uno de los gases de la mezcla.

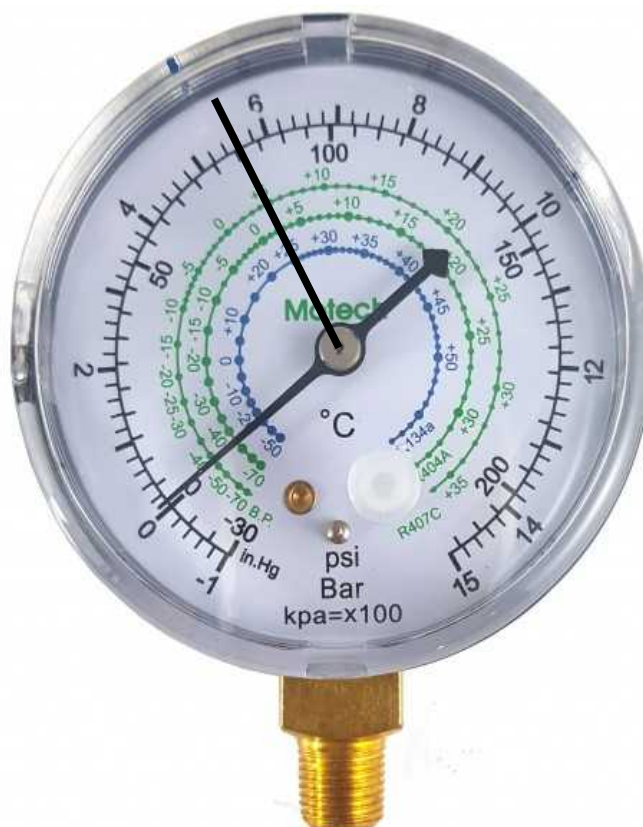
$$p_{total} = p_1 + p_2 + \dots + p_i$$

Un aplicación práctica de esta ley en una instalación frigorífica es la siguiente:

Si la lectura de presión del manómetro indica un valor superior al correspondiente a la temperatura ambiente (del refrigerante utilizado en la instalación), estando el compresor parado, se deduce que hay otros de gases (diferentes al refrigerante) en la instalación.

Ejemplo:

¿Qué presión corresponde al refrigerante R-134a a una temperatura ambiente de 25 °C ?



### 1.8.4 Diagrama entálpico (Mollier)

La entalpía  $H$  está definida como la suma de la energía interna y el producto de la presión y el volumen de un sistema termodinámico. La unidad en la que se mide la entalpía es el julio  $J$ .

$$H = U + p \cdot V$$

$U$  energía interna que depende de la temperatura

Para cada fluido refrigerante existe un diagrama  $p-h$  específico.

$h$  es la entalpía por kg de refrigerante en  $\frac{J}{kg}$

Como ejemplo se toma el refrigerante R-134a.

En el diagrama  $p-h$ , el eje horizontal indica el valor de la entalpía específica (entalpía / kg) del fluido refrigerante y el vertical la presión. Se diferencian 3 zonas, la zona de líquido, a la izquierda, la zona de mezcla de líquido y gas en el centro, bajo la campana, y la zona de gas a la derecha.

Bajo la campana, las líneas de calidad, de recorrido aproximadamente vertical, siguiendo la curva de la campana, indican el porcentaje de vapor.

A modo de ejemplo, se ha marcado de amarillo la línea de calidad del 50 %.



ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE

**gasservei**

**R-134a**

C/Motores 151-155 Nave 9

08038 Barcelona

Teléfono: 93 223 13 77

DRUCK

PRESSURE (BARA)

PRESSURE

PRESSION

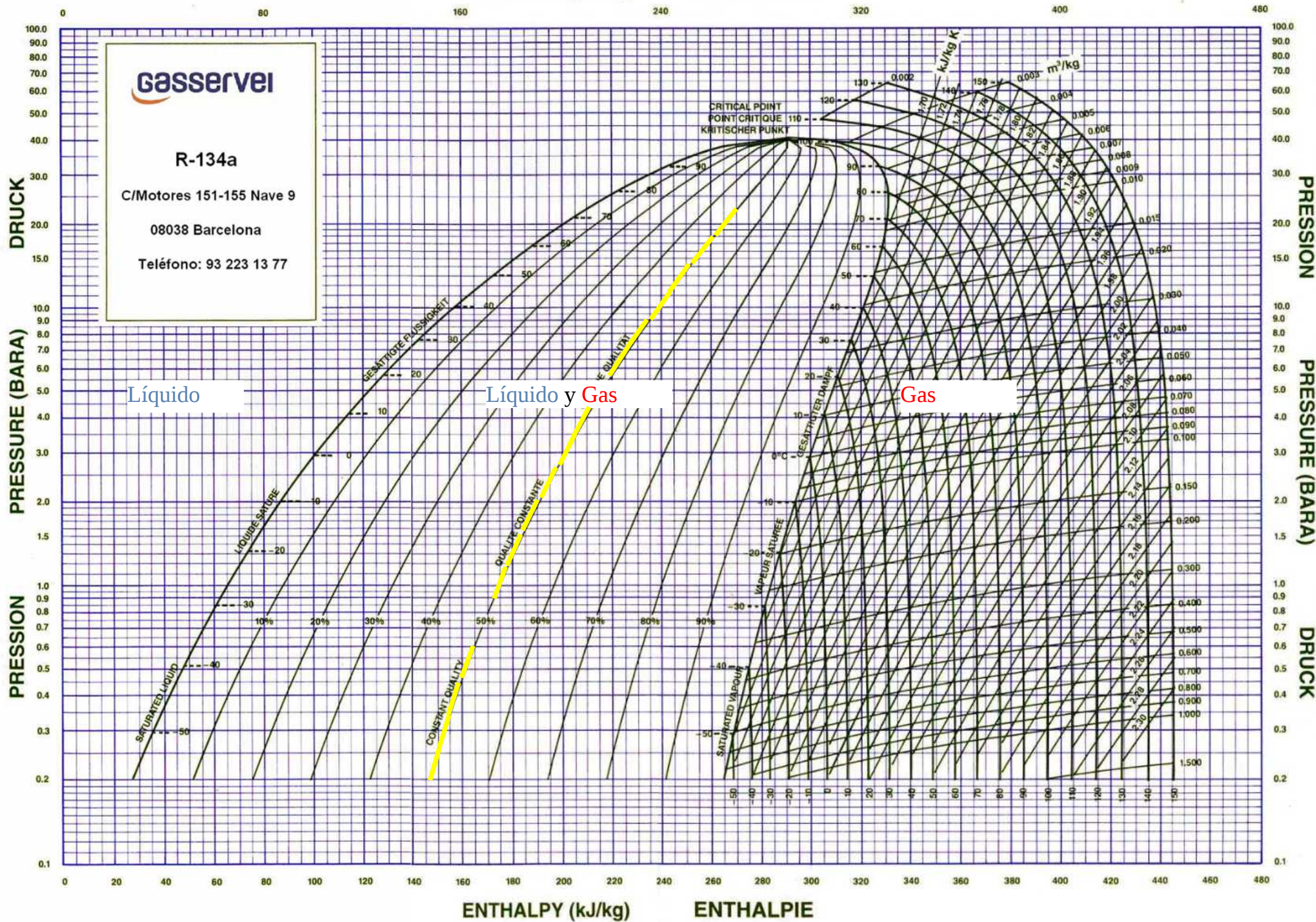
PRESSURE (BARA)

DRUCK

Líquido

Líquido y Gas

Gas





En la siguiente imagen se ve marcada una línea de temperatura constante a 0 °C.

Las líneas de temperatura son verticales en zona de líquido, porque al ser incompresibles los líquidos, no pueden absorber o ceder energía mecánica por compresión o expansión.

$$\Delta W = p \cdot \Delta V = 0 \quad \text{ya que} \quad \Delta V = 0, \quad \text{no hay variación de volumen}$$

**En la zona de líquido → Temperatura constante = Entalpía constante**

Bajo la campana, se produce el cambio de fase y por tanto, a presión constante, también se mantiene constante la temperatura. A una línea de presión constante le corresponde una temperatura constante.

Suponiendo que la instalación frigorífica se encuentra en un estado de funcionamiento estable, es decir, que los flujos de calor en evaporador y condensador son fijos (no varían con el tiempo), los procesos de evaporación y condensación, se producen a presión constante.



ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE

**gasservei**

**R-134a**

C/Motores 151-155 Nave 9

08038 Barcelona

Teléfono: 93 223 13 77

DRUCK

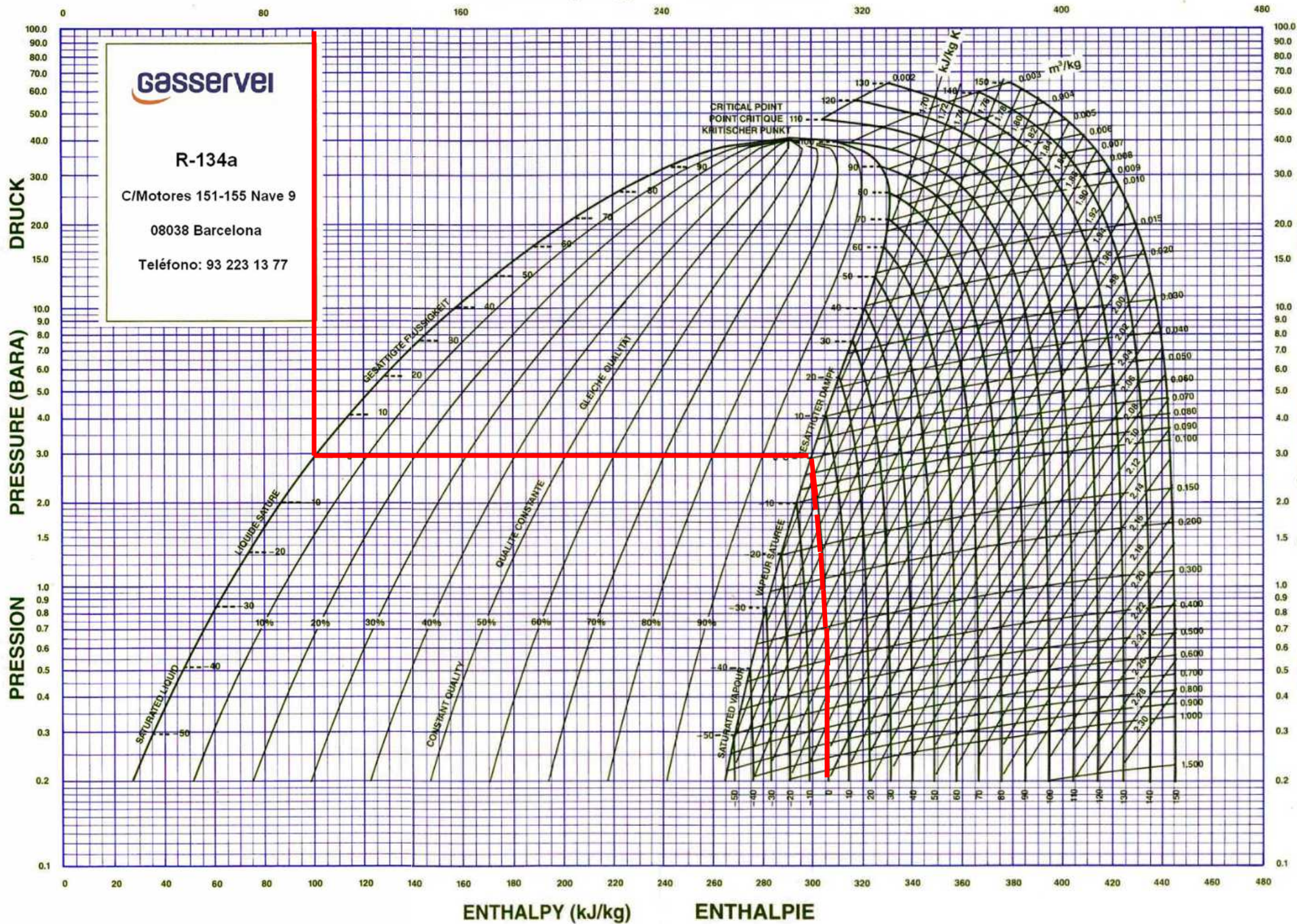
PRESSURE (BARA)

PRESSURE

PRESSION

PRESSURE (BARA)

DRUCK





Una línea de presión constante, es una horizontal, independientemente de la zona en que se encuentre. En el siguiente ejemplo está marcada la presión de 3 bar.



ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE

**gasservei**

**R-134a**

C/Motores 151-155 Nave 9

08038 Barcelona

Teléfono: 93 223 13 77

DRUCK

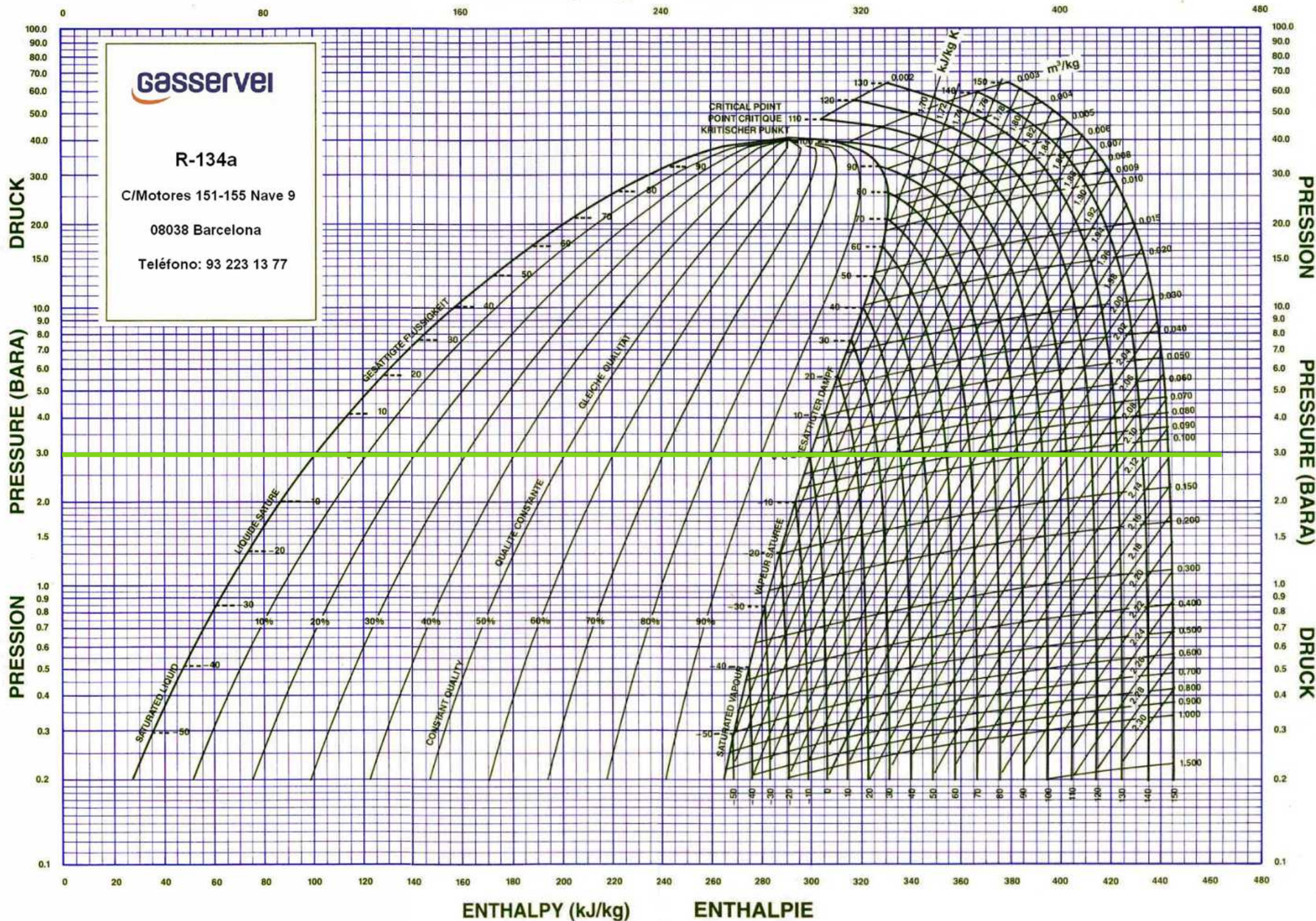
PRESSURE (BARA)

PRESSURE

PRESSION

PRESSURE (BARA)

DRUCK





Sobre una línea de entropía constante (iséntropa) se representa una compresión, en la que en el compresor no se producen pérdidas por rozamiento, ni por transmisión de calor. Se trata de una compresión ideal, que en la realidad no existe.

En los procesos de compresión reales, la entropía siempre aumenta.

En el siguiente ejemplo está marcada una compresión de 3 a 12 bar, con una entropía constante de

$$1,8 \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ .}$$



ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE

**gasservei**

**R-134a**

C/Motores 151-155 Nave 9

08038 Barcelona

Teléfono: 93 223 13 77

DRUCK

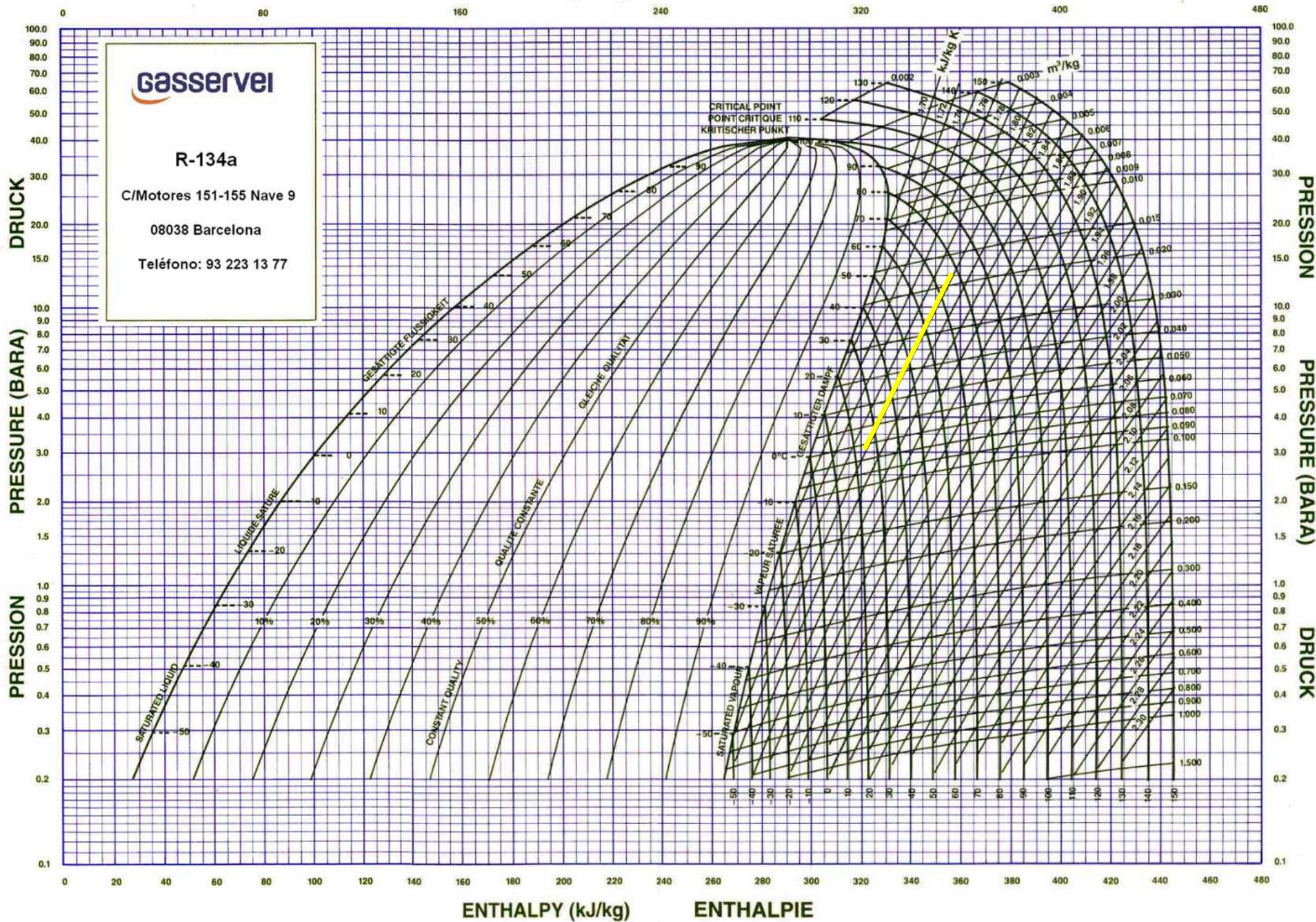
PRESSURE (BARA)

PRESSURE

PRESSION

PRESSURE (BARA)

DRUCK





## 1.9 Ejercicios gases y diagrama p h

### 1\_2 Ejercicio 1.9-1

A temperatura constante, la presión absoluta de un metro cúbico de gas pasa de 1 bar a 2 bar.

¿Cómo cambia su volumen?

### 1\_2 Ejercicio 1.9-2

A presión constante, el volumen de un gas pasa de un metro cúbico y 0°C a dos metros cúbicos.

¿Cómo cambia su temperatura?

### 1\_2 Ejercicio 1.9-3

La composición de la atmósfera es aproximadamente la siguiente;

$$N_2 = 78 \%$$

$$O_2 = 21 \%$$

$$Ar = 0,9 \%$$

Calcula las presiones parciales de los tres gases a nivel de mar.

### 1\_2 Ejercicio 1.9-4

En una instalación frigorífica con refrigerante R-134a se han medido las siguientes presiones con el puente de manómetros  $p_1 = 2 \text{ bar}$  y  $p_2 = 20 \text{ bar}$ .

Indica las temperaturas de condensación y evaporación.

**1\_2 Ejercicio 1.9-5**

Marca en el diagrama p h correspondiente a R-134a, el punto en el que un 80% del fluido es gas, a una temperatura de 10 °C .

**1\_2 Ejercicio 1.9-6**

En el punto inicial (1), el refrigerante R134a se encuentra a una presión de 3 bar (presión manométrica) y una temperatura de -20 °C.

La temperatura final es de 40 °C.

Indica la temperatura de saturación (evaporación).

Indica el calor necesario para aumentar la temperatura del líquido de -20 °C a la temperatura de saturación.

Indica el calor necesario para evaporar el refrigerante.

Indica el calor necesario para aumentar la temperatura del vapor saturado a la temperatura final.



ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE

**Gasservei**

**R-134a**

C/Motores 151-155 Nave 9

08038 Barcelona

Teléfono: 93 223 13 77

DRUCK

PRESSURE (BARA)

PRESSURE

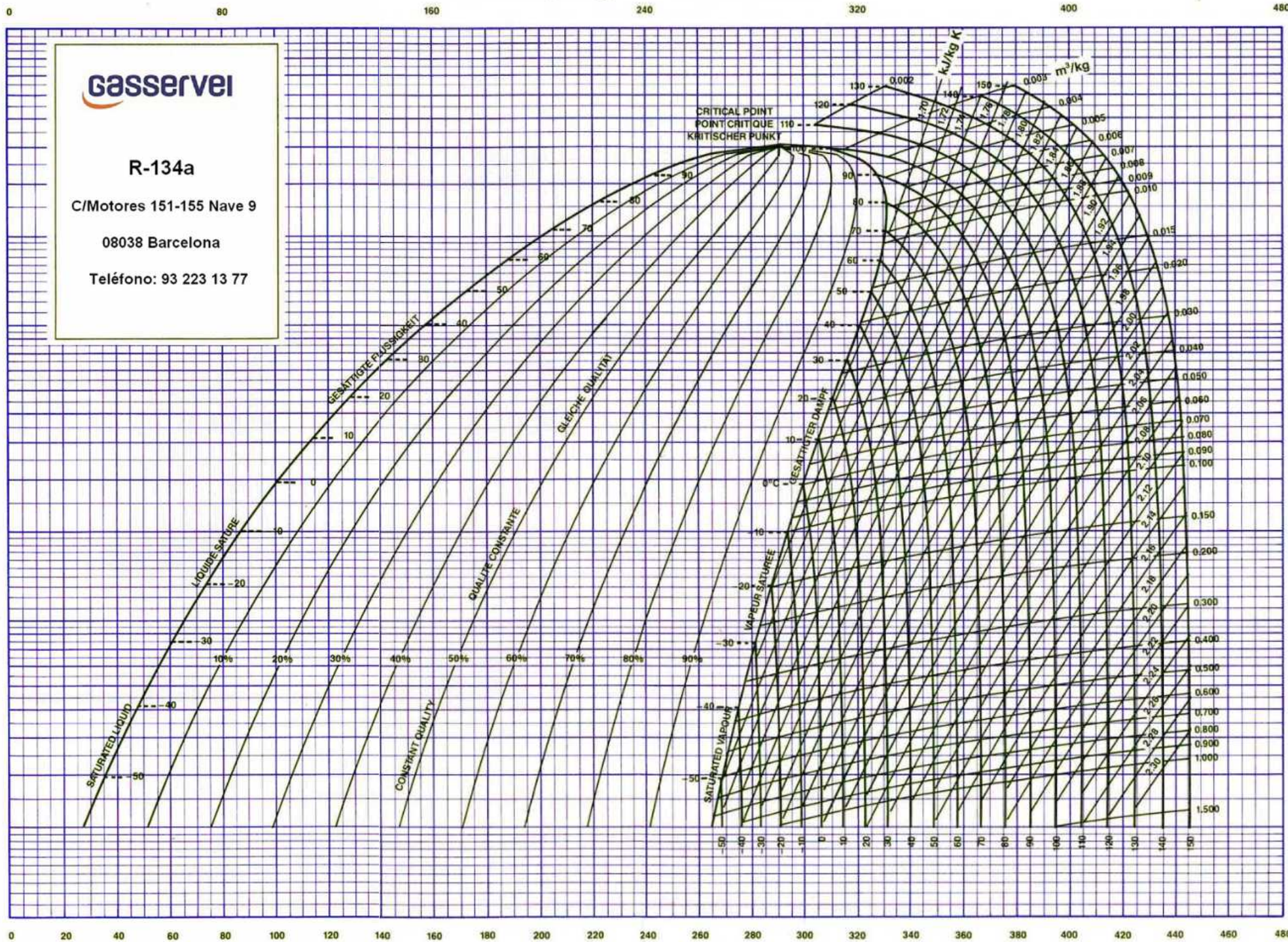
PRESSION

PRESSURE (BARA)

DRUCK

ENTHALPY (kJ/kg)

ENTHALPIE





## 1.10 Caudal y velocidad

El caudal  $\dot{V}$  que circula por una tubería depende de la velocidad del fluido y de la sección de la tubería.

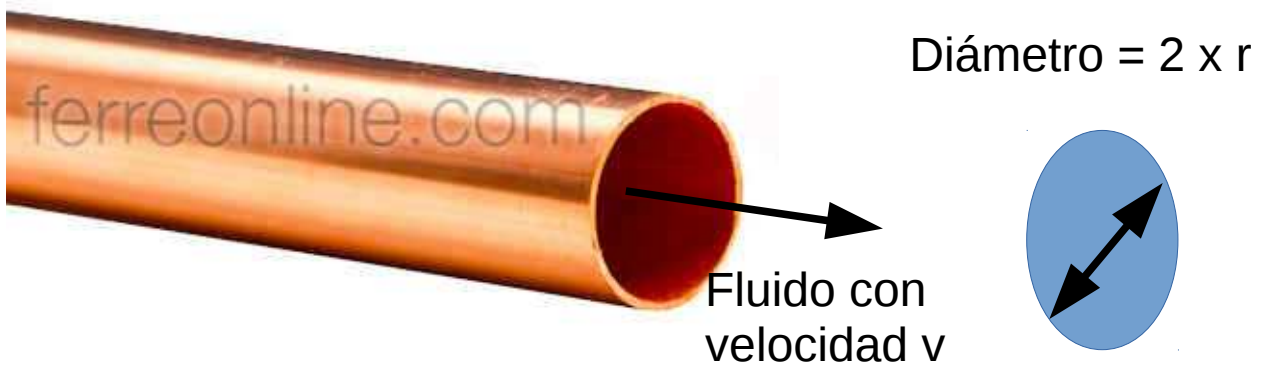
$$\dot{V} = v \cdot A$$

$v$  velocidad del fluido

$A$  área de la sección de la tubería

El área de la sección de una tubería se calcula con

$$A_{\text{tub}} = 3,14 \cdot r^2 \quad \text{siendo } r \text{ el radio de la tubería}$$



### 1.10.1 Conservación del caudal

Para un fluido incompresible, esto es de densidad constante, en caso de una variación de sección de la tubería, siendo el caudal volumétrico (másico) constante, se deduce:

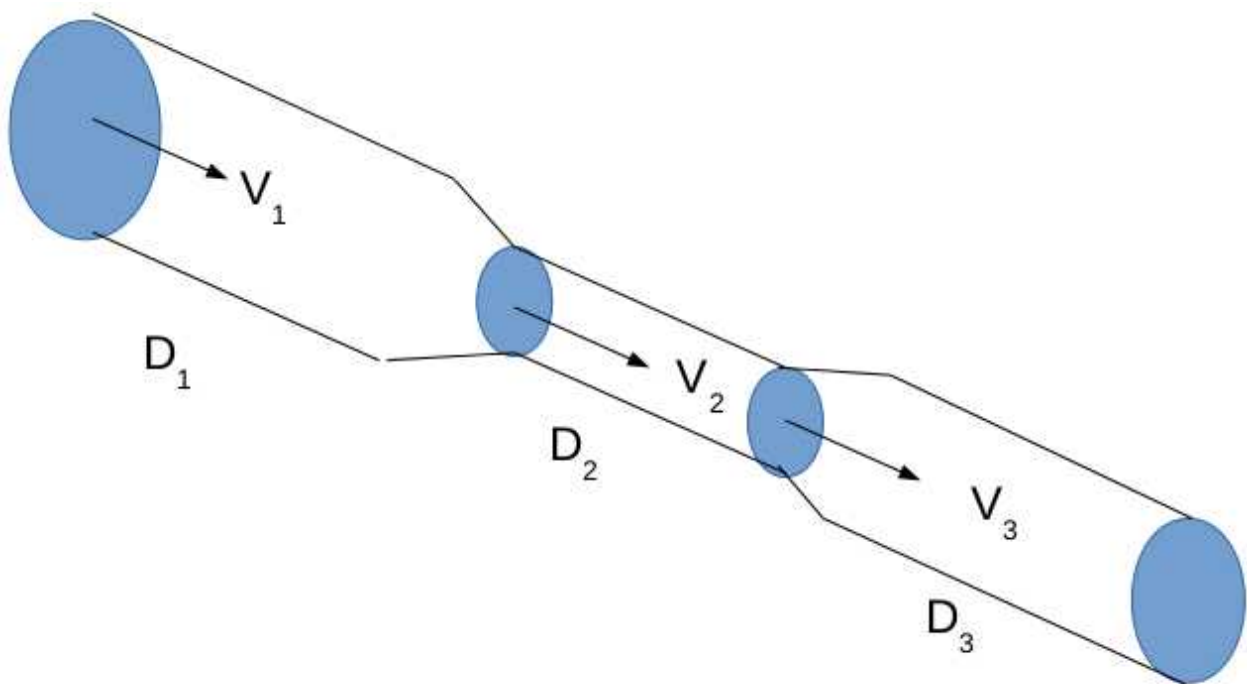
$$\dot{V} = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \text{constante}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = \text{constante}$$

$$\rho \text{ densidad en } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Una instalación frigorífica es un circuito cerrado. Por tanto, el caudal másico es igual en cualquier parte del circuito.

Para el supuesto de que la tubería de aspiración reduzca su diámetro de 1" a 5/8", para a continuación aumentar a 3/4", y el espesor de pared del tubo sea de 1 mm, calcula la velocidad del refrigerante si el caudal másico es de  $\dot{m} = 0,0005 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  y la densidad del refrigerante  $\rho = 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



Diámetro nominal pulgadas	Diámetro exterior mm	Diámetro interior mm	Espesor mm	Sección Interior dm4	Volumen interior dm3/m	Superficie exterior m2/m	Peso Kg/m	Presión admisible	Presión admisible
								Recocido Bar	Rígido Bar
3/16	4,76	3,24	0,76	0,0008	0,008	0,015	0,085	160	
1/4	6,35	4,83	0,76	0,0018	0,018	0,020	0,119	116	143
1/4	6,35	4,75	0,80	0,0018	0,018	0,020	0,125	122	151
5/16	7,94	6,34	0,80	0,0032	0,032	0,025	0,161	96	118
5/16	7,93	6,31	0,81	0,0031	0,031	0,025	0,162	97	120
3/8	9,52	8,00	0,76	0,0050	0,050	0,030	0,187	74	92
3/8	9,52	7,92	0,80	0,0049	0,049	0,030	0,196	79	97
3/8	9,52	7,90	0,81	0,0049	0,049	0,030	0,198	80	98
1/2	12,70	11,18	0,76	0,0098	0,098	0,040	0,255	55	68
1/2	12,70	11,10	0,80	0,0097	0,097	0,040	0,268	58	72
1/2	12,70	11,08	0,81	0,0096	0,096	0,040	0,271	59	73
1/2	12,70	10,92	0,89	0,0094	0,094	0,040	0,296	65	80
1/2	12,70	10,70	1,00	0,0090	0,090	0,040	0,329	73	91
5/8	15,87	14,35	0,76	0,0162	0,162	0,050	0,323	43	54
5/8	15,87	14,27	0,80	0,0160	0,160	0,050	0,339	46	57
5/8	15,87	14,25	0,81	0,0159	0,159	0,050	0,343	46	57
5/8	15,87	14,09	0,89	0,0156	0,156	0,050	0,375	51	63
5/8	15,87	13,87	1,00	0,0151	0,151	0,050	0,418	58	72
5/8	15,87	13,85	1,01	0,0151	0,151	0,050	0,422	59	72
3/4	19,05	17,45	0,8	0,0239	0,0239	0,060	0,411	38	47
3/4	19,05	17,43	0,81	0,0239	0,239	0,060	0,415	38	47
3/4	19,05	17,27	0,89	0,0234	0,234	0,060	0,454	42	52
3/4	19,05	17,05	1,00	0,0228	0,228	0,060	0,508	48	59
3/4	19,05	16,91	1,07	0,0225	0,225	0,060	0,541	51	63
7/8	22,22	20,60	0,81	0,0333	0,333	0,070	0,488	33	41
7/8	22,22	20,44	0,89	0,0328	0,328	0,070	0,534	36	45
7/8	22,22	20,22	1,00	0,0321	0,321	0,070	0,597	41	50
7/8	22,22	19,94	1,14	0,0312	0,312	0,070	0,676	47	58
1	25,40	23,62	0,89	0,0438	0,438	0,080	0,613		39
1	25,40	23,40	1,00	0,0430	0,430	0,080	0,686		44

Diámetro nominal pulgadas	Diámetro exterior mm	Diámetro interior mm	Espesor mm	Sección interior dm <sup>4</sup>	Volumen interior dm <sup>3</sup> /m	Superficie exterior m <sup>2</sup> /m	Peso Kg/m	Presión admisible	Presión admisible
								Recocido Bar	Rígido Bar
1 1/8	28,57	26,79	0,89	0,0564	0,564	0,090	0,693		34
1 1/8	28,57	26,57	1,00	0,0554	0,554	0,090	0,775		39
1 1/8	28,57	26,07	1,25	0,0534	0,534	0,090	0,960		49
1 1/8	28,57	26,03	1,27	0,0532	0,532	0,090	0,975		50
1 3/8	34,92	32,78	1,07	0,0844	0,844	0,110	1,018		34
1 3/8	34,92	32,42	1,25	0,0825	0,825	0,110	1,183		40
1 3/8	34,92	32,12	1,40	0,0810	0,810	0,110	1,319		45
1 5/8	41,27	38,77	1,25	0,1181	1,181	0,130	1,407		33
1 5/8	41,27	38,73	1,27	0,1178	1,178	0,130	1,428		34
1 5/8	41,27	38,27	1,50	0,1150	1,150	0,130	1,677		40
2 1/8	53,97	51,47	1,25	0,2081	2,081	0,170	1,853		25
2 1/8	53,97	51,03	1,47	0,2045	2,045	0,170	2,170		30
2 1/8	53,97	50,67	1,65	0,2016	2,016	0,170	2,427		34
2 1/8	53,97	50,37	1,80	0,1993	1,993	0,170	2,640		37
2 5/8	66,67	63,37	1,65	0,3154	3,154	0,209	3,017		27
2 5/8	66,67	62,67	2,00	0,3085	3,085	0,209	3,637		33
2 5/8	66,67	62,61	2,03	0,3079	3,079	0,209	3,690		34
3 1/8	79,38	76,08	1,65	0,4546	4,546	0,249	3,606		23
3 1/8	79,38	75,78	1,80	0,4510	4,510	0,249	3,926		25
3 1/8	79,38	75,72	1,83	0,4503	4,503	0,249	3,990		25
3 1/8	79,38	74,80	2,29	0,4394	4,394	0,249	4,964		32
3 1/8	79,38	74,38	2,50	0,4345	4,345	0,249	5,404		35
3 5/8	92,08	87,86	2,11	0,6063	6,063	0,289	5,338		25
3 5/8	92,08	87,08	2,50	0,5956	5,956	0,289	6,297		30
4 1/8	104,80	99,98	2,41	0,7851	7,851	0,329	6,938		25
4 1/8	104,80	99,80	2,50	0,7823	7,823	0,329	7,191		26

Tabla diámetros tubos frigoríficos según norma  
UNE-EN 12735-1

<https://frigoristatorpe.com/tuberias-frigorificas>

Se puede comenzar calculando el caudal volumétrico:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,0005 \frac{kg}{s}}{0,05 \frac{kg}{m^3}} = 0,01 \frac{m^3}{s}$$

Sabiendo que  $\dot{V} = v \cdot A = \text{constante}$  se deduce que

$$\dot{V} = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = v_3 \cdot A_3 = 0,01 \frac{m^3}{s}$$

con

$$A_1 = 3,14 \cdot r_1^2 \quad y \quad r_1 = \frac{(25,4 \text{ mm} - 2 \text{ mm})}{2} = 11,7 \text{ mm} = 0,0117 \text{ m} \rightarrow A_1 = 0,00043 \text{ m}^2$$

$$A_1 = 3,14 \cdot r_2^2 \quad y \quad r_2 = \frac{(15,87 \text{ mm} - 2 \text{ mm})}{2} = 6,9 \text{ mm} = 0,0069 \text{ m} \rightarrow A_2 = 0,00015 \text{ m}^2$$

$$A_1 = 3,14 \cdot r_3^2 \quad y \quad r_3 = \frac{(19,5 \text{ mm} - 2 \text{ mm})}{2} = 8,75 \text{ mm} = 0,00875 \text{ m} \rightarrow A_3 = 0,00024 \text{ m}^2$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}}{A_1} = \frac{0,01 \frac{m^3}{s}}{0,00043 \text{ m}^2} = 23,2 \frac{m}{s}$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A_2} = \frac{0,01 \frac{m^3}{s}}{0,00015 \text{ m}^2} = 66,67 \frac{m}{s}$$

$$v_3 = \frac{\dot{V}}{A_3} = \frac{0,01 \frac{m^3}{s}}{0,00024 \text{ m}^2} = 41,7 \frac{m}{s}$$

Conclusión:

A menor sección de tubería, mayor velocidad del fluido.