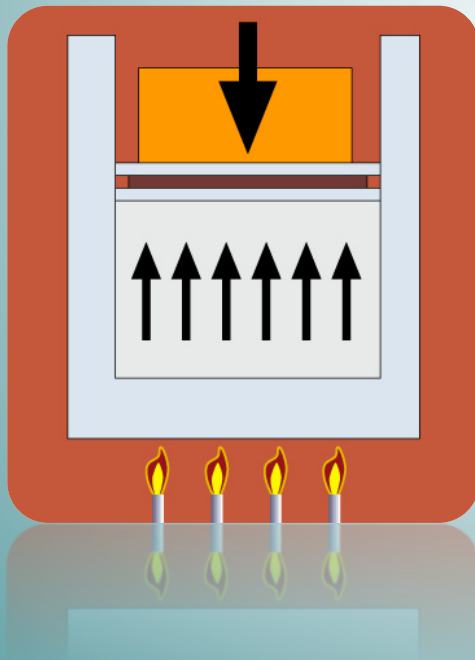


Termodinámica y Termotecnia

Tema 07. Ciclos de Refrigeración



Inmaculada Fernández Diego
Severiano F. Pérez Remesal
Carlos J. Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

T 07.- Ciclos de Refrigeración

Objetivos:

En este tema se describen los principales métodos de producción de frío industrial (compresión y absorción), y sus ciclos termodinámicos de funcionamiento.

- 1.- Introducción
- 2.- Refrigeración por compresión
- 3.- Refrigeración por absorción
- 4.- Bombas de calor

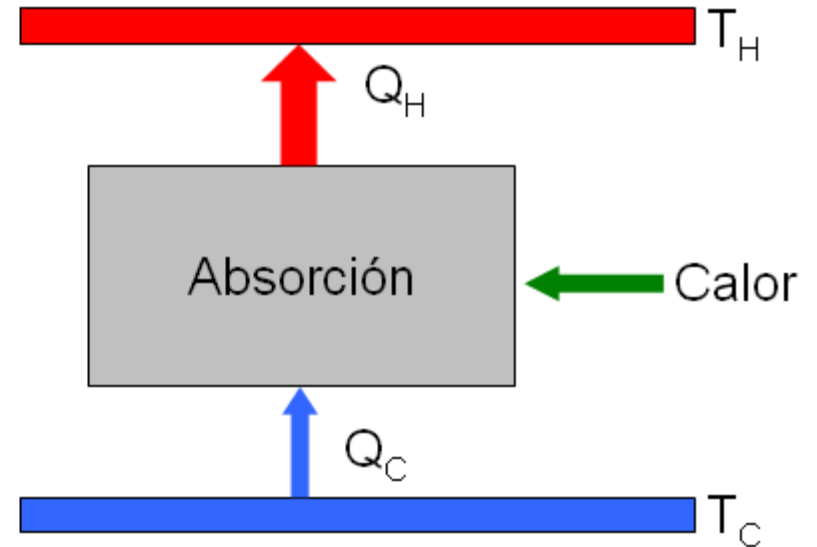
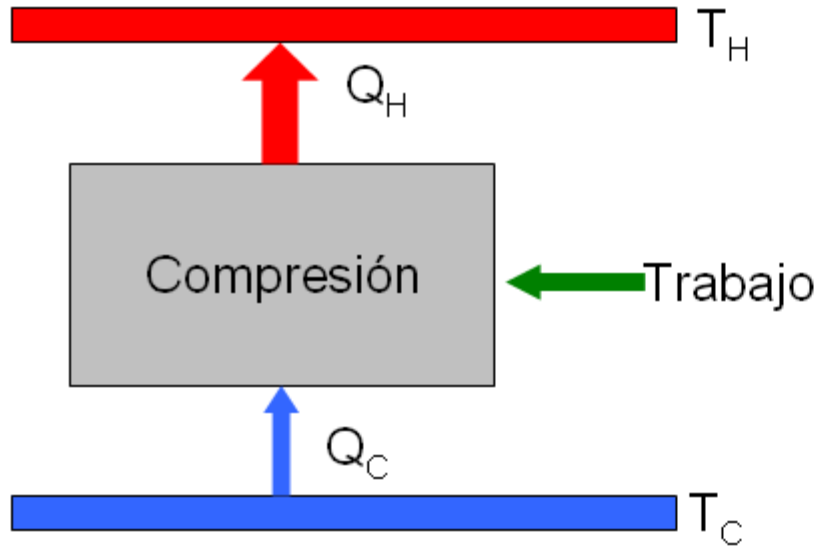
1.- Introducción (I)

Para transportar calor desde un foco a baja temperatura a otro a alta temperatura es necesario la aportación de energía

Interviene un fluido, refrigerante, que sufre una serie de transformaciones termodinámicas. Cada refrigerante tiene un comportamiento definido y diferente

Los ciclos evitan la reposición continua del refrigerante

1.- Introducción (II)



2.- Refrigeración por compresión (I)

Basado en los cambios de estado (líquido-vapor y vapor-líquido) de un fluido refrigerante

T de cambio de estado = $f(p)$ (si $p \downarrow$ la $T \downarrow$, si $p \uparrow$ la $T \uparrow$)

Calores latente $\gg$ Calor sensibles $\Rightarrow \downarrow$ la cantidad refrig y tamaño

Se busca tener un líquido a baja p y T para evaporarlo

El calor requerido lo toma de los alrededores, los enfría

En un sistema abierto el refrigerante se perdería en la atmósfera; lo normal es trabajar con ciclos de refrigeración

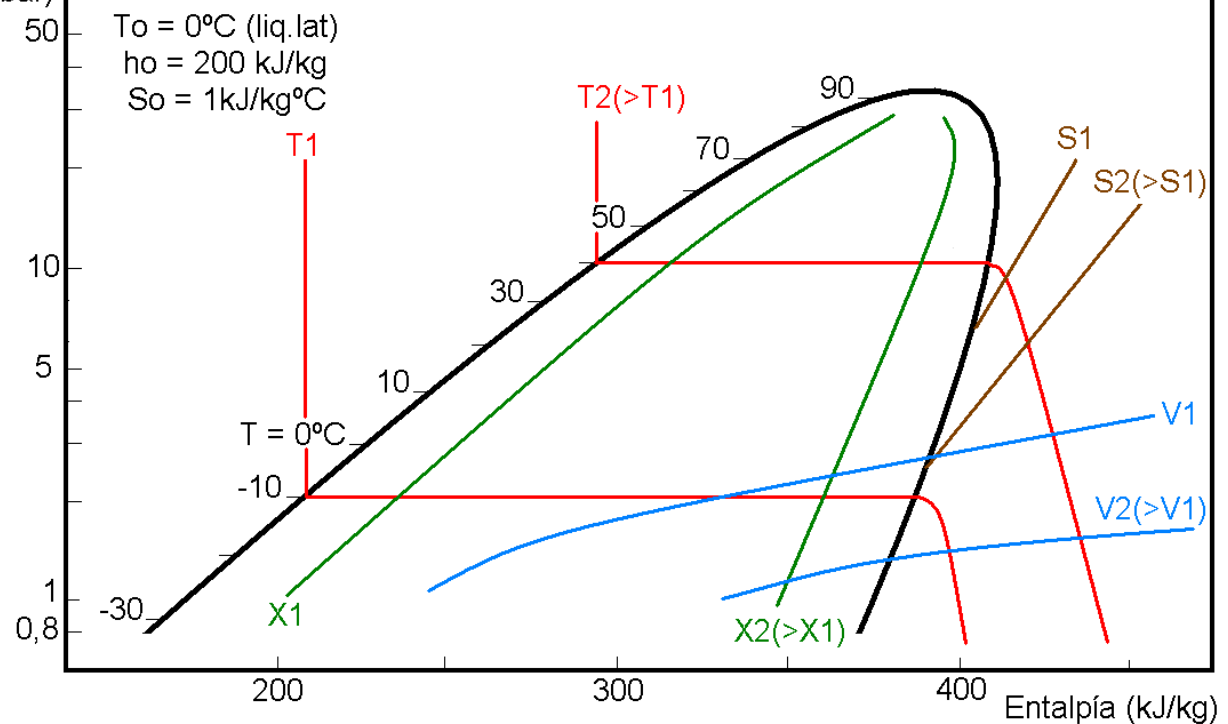
2.- Refrigeración por compresión (II)

Diagrama característico de un refrigerante

P_{absoluta}

**Los manómetros
marcan P_{relativas}**

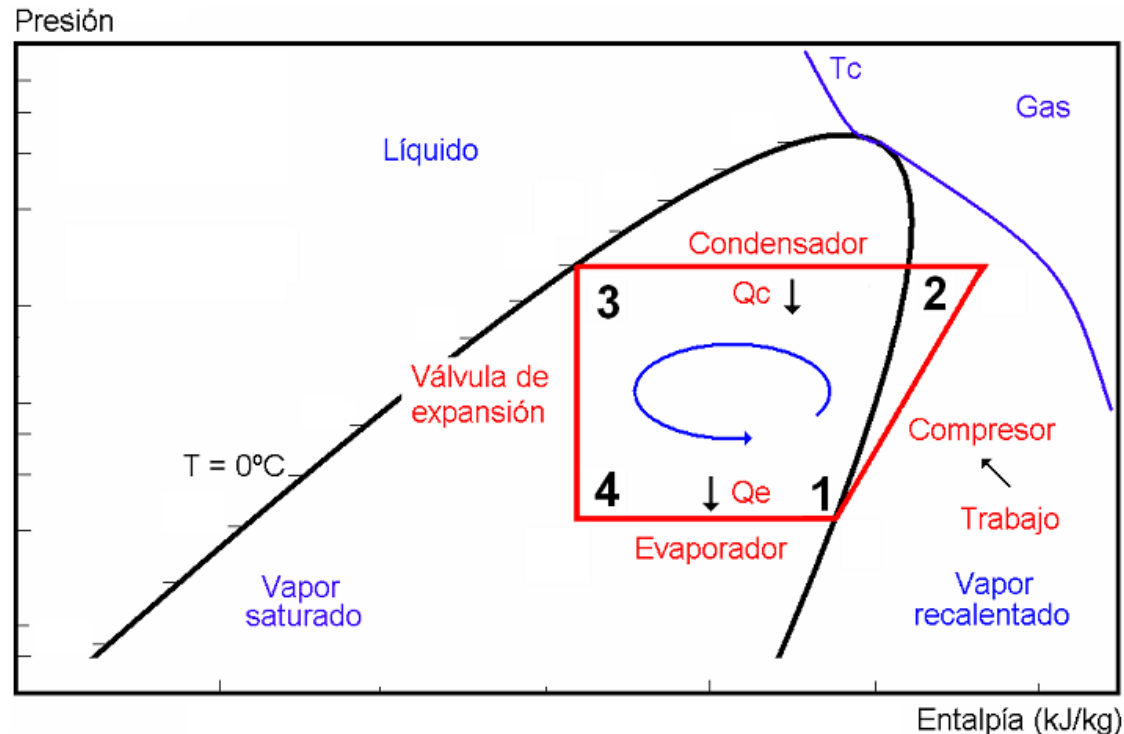
Presión 10^5 Pa
(bar)



2.- Refrigeración por compresión (III)

Basado en los cambios de estado (líquido-vapor y vapor-líquido) de una sustancia (fluido refrigerante)

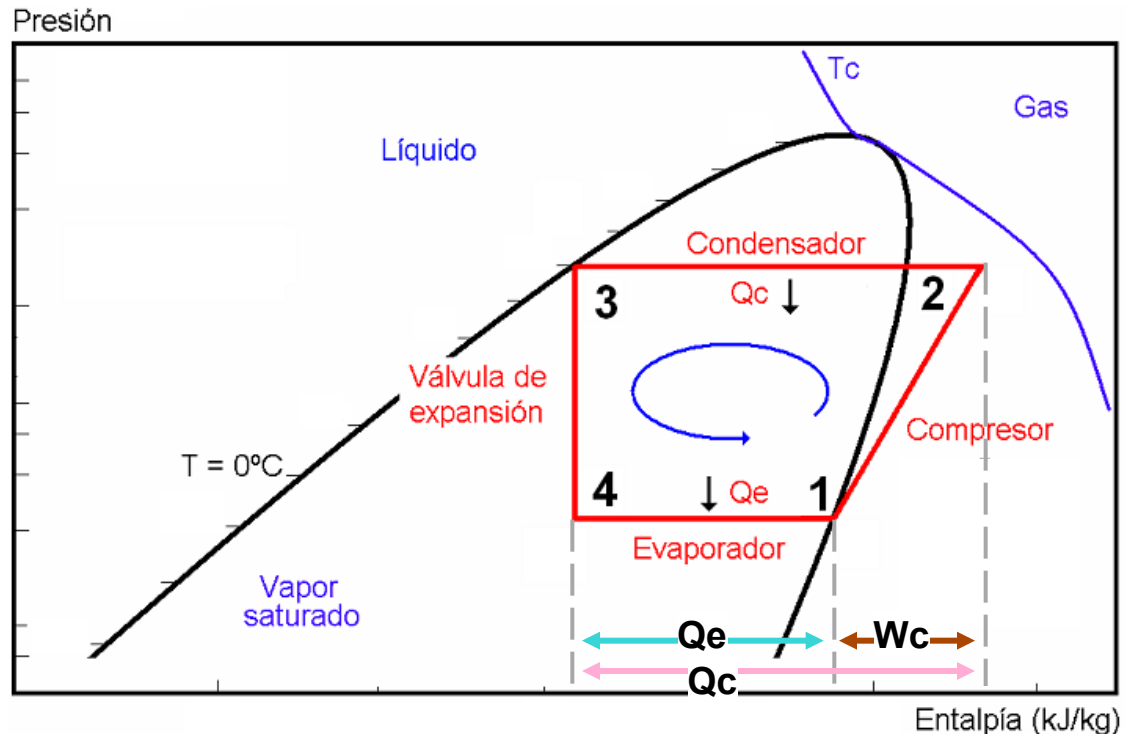
- Compresión
- Condensación
- Expansión
- Evaporación



2.- Refrigeración por compresión (IV)

Basado en los cambios de estado (líquido-vapor y vapor-líquido) de una sustancia (fluido refrigerante)

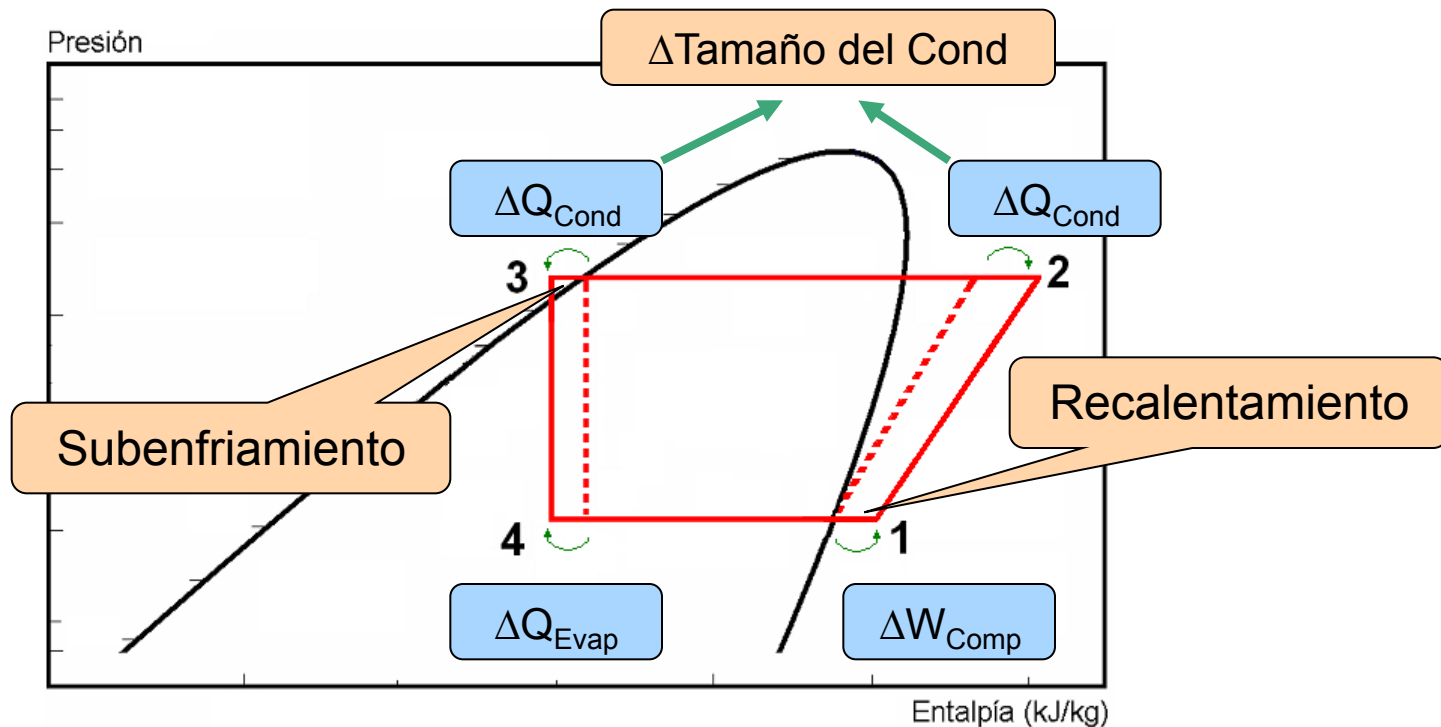
- Compresión
- Condensación
- Expansión
- Evaporación



2.- Refrigeración por compresión (V)

Subenfriamiento: salida del condensador, asegura líquido en la Val. Exp.

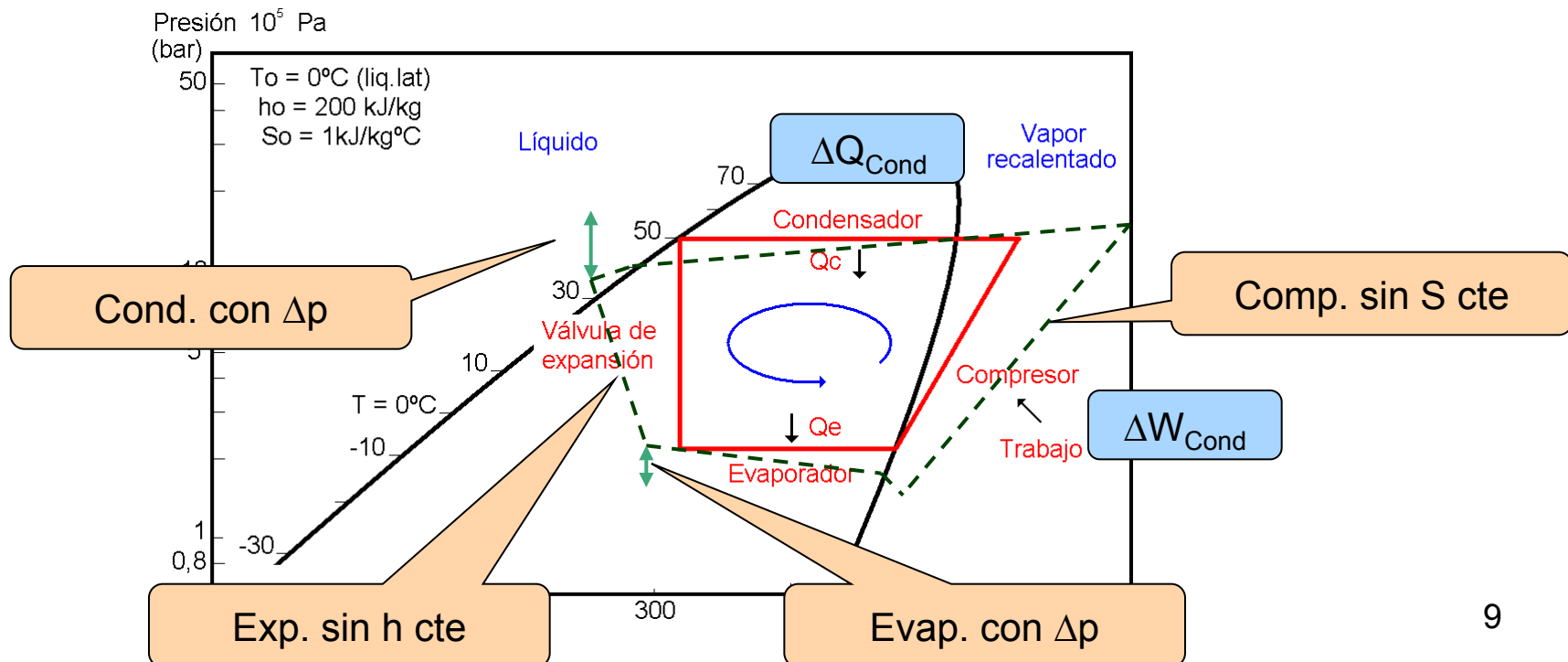
Recalentamiento: salida del evaporador, asegura vapor en el Comp.



2.- Refrigeración por compresión (VI)

Ciclo real:

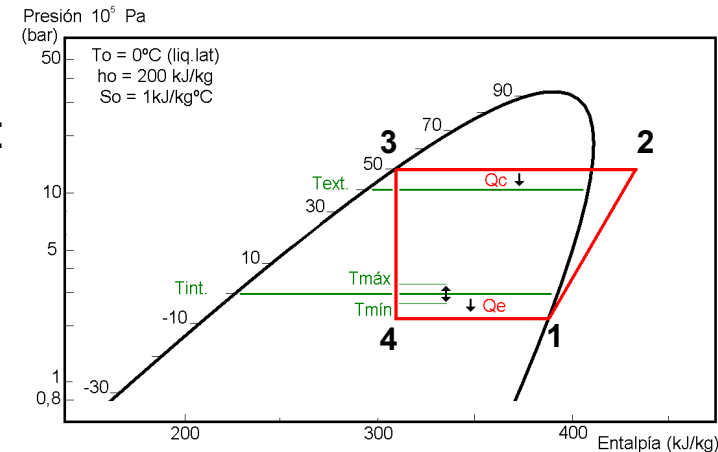
- Con pérdidas de presión en condensador y evaporador
- La compresión no es isoentrópica
- La expansión no es isoentálpica



2.- Refrigeración por compresión (VII)

Los **límites de funcionamiento** de un equipo son:

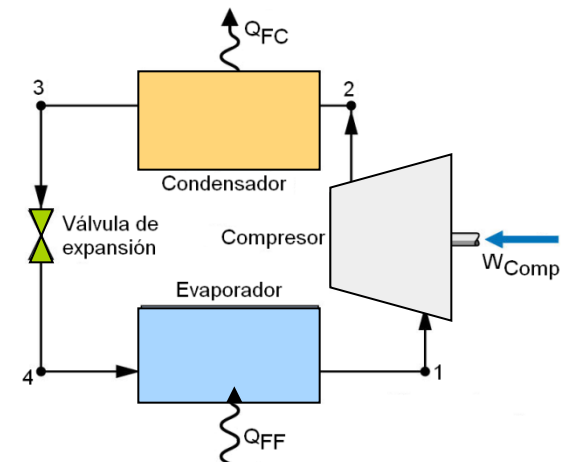
- En el evaporador: la T de la cámara > T del refrigerante
- En el condensador: la T ambiente < T del refrigerante



Para calcular el **rendimiento del ciclo de compresión** hay que conocer las energías y los calores;

- El calor extraído de la cámara es: $(h_1 - h_4)$ (kJ/kg)
- El calor cedido al exterior es: $(h_2 - h_3)$ (kJ/kg)
- El trabajo útil del compresor es: $(h_2 - h_1)$ (kJ/kg)

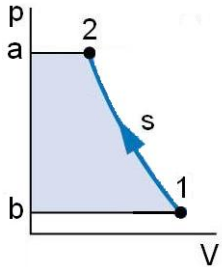
estos valores se obtienen del diagrama, ó de las tablas



2.- Refrigeración por compresión (VIII)

Análisis Termodinámico (I):

• *Etapas de compresión (1-2)*



$$W_{\text{admisión (b-1)}} = p_1 v_1$$

$$W_{\text{impulsión (2-a)}} = -p_2 v_2$$

$$W_{(a-b)} = \left| v = \text{cte} \right| = 0$$

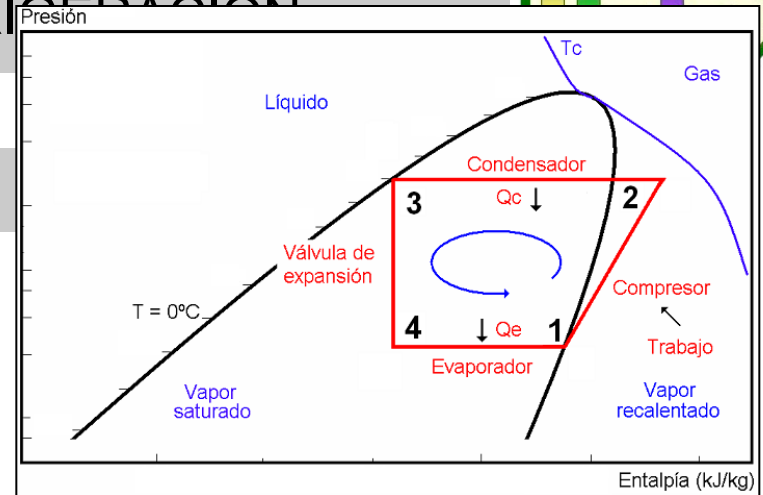
$$W_{\text{comp (1-2)}} = \left| \begin{array}{l} \text{si } (S = \text{cte}) \Rightarrow q = 0 \\ \text{[P.P.T.} \Rightarrow q = u + w] \end{array} \right| = -\Delta u = u_1 - u_2$$

$$W_{\text{Ciclo Comp}} = (p_1 v_1) + (u_1 - u_2) - (p_2 v_2) = h_1 - h_2$$

• *Etapas de condensación (2-3)*

[P.P.T.]

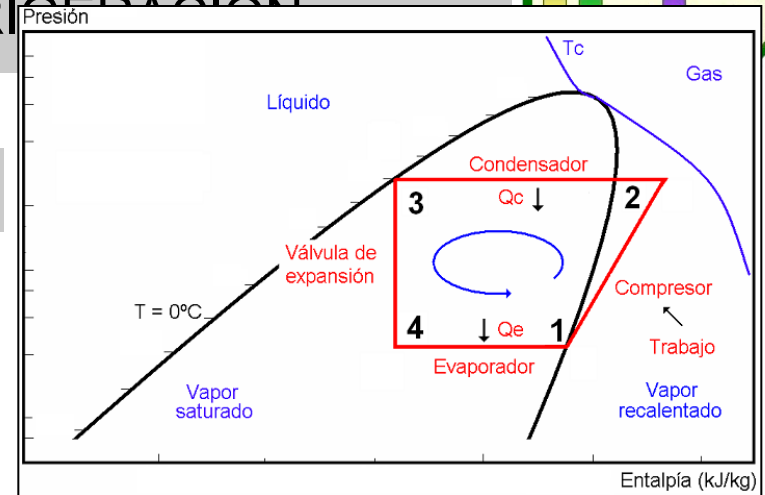
$$q = \int_2^3 du + \int_2^3 dw = \int_2^3 du + \int_2^3 p dv = \left| p_2 = p_3 \right| = u_3 - u_2 + p(v_3 - v_2) = h_3 - h_2$$



Valores por kg de masa

2.- Refrigeración por compresión (IX)

Análisis Termodinámico (II):



• *Etapas de expansión (3-4)*

[P.P.T.]

$$q = u + w \left| \begin{array}{l} \text{sin área no hay posibilidad de intercambio térmico} \\ q = 0 \end{array} \right| \Rightarrow \Delta u = -\Delta w$$

$$\int_3^4 du = -\int_3^4 dw \Rightarrow u_4 - u_3 = -p_4 v_4 + p_3 v_3 \Rightarrow u_4 + p_4 v_4 = u_3 + p_3 v_3 \quad h_3 = h_4$$

• *Etapas de evaporación (4-1)*

[P.P.T.]

$$q = \int_4^1 du + \int_4^1 dw = \int_4^1 du + \int_4^1 p dv = \left| p_4 = p_1 \right| = u_1 - u_4 + p(v_1 - v_4) = h_1 - h_4$$

2.- Refrigeración por compresión (X)

COP (**C**oefficient of **P**erformance)

$$\text{COP} = \frac{\text{Calor Extraído } (h_1 - h_4)}{\text{Trabajo Compresor } (h_2 - h_1)}$$

En función de las temperaturas del ciclo, puede ser superior a 3

EER (**E**nergy **E**fficiency **R**atio)

$$\text{EER} = \frac{\text{Capacidad Frigorífica } (BTUh)}{\text{Potencia Compresor } (W)}$$

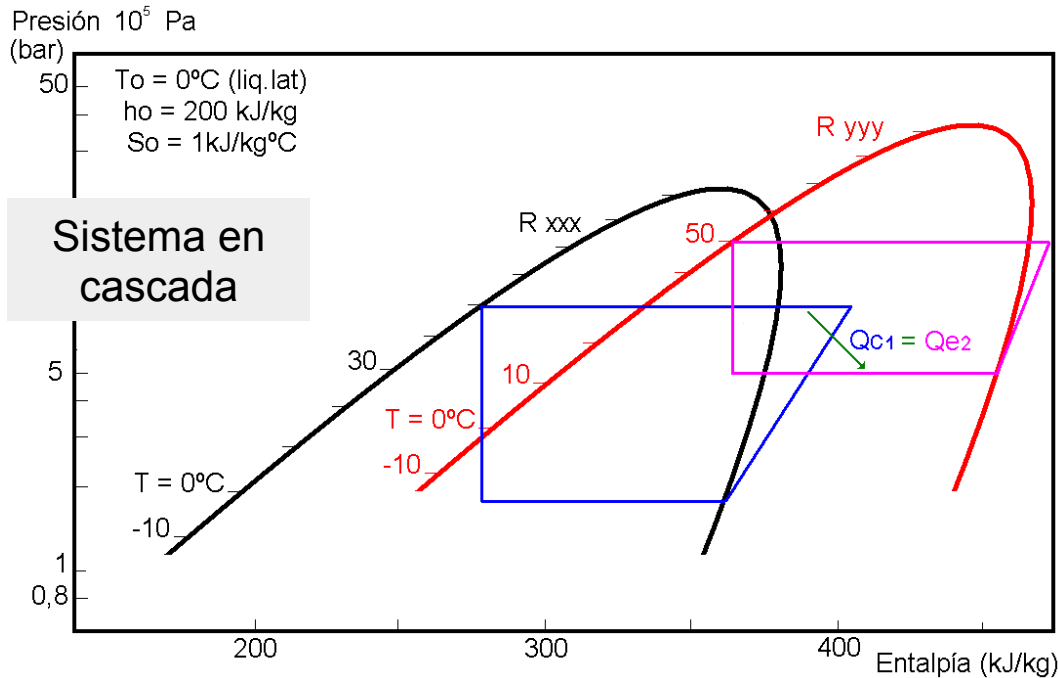
En aire acondicionado puede ser superior a 13

1.000 BTU y 293 Wh

SEER (**S**easonal **E**nergy **E**fficiency **R**atio)

El EER durante un periodo de tiempo

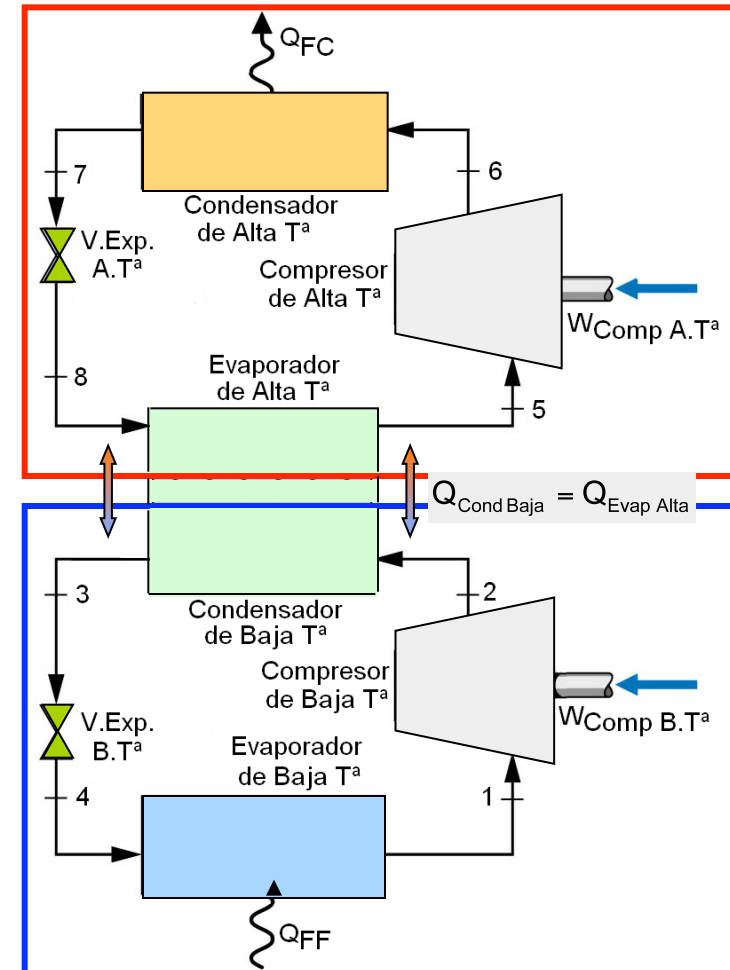
2.- Refrigeración por compresión (XI)



$$Q_{\text{Cond Baja}} = Q_{\text{Evap Alta}}$$

$$m_{\text{Baja}} \Delta h_{\text{Cond Baja}} = m_{\text{Alta}} \Delta h_{\text{Evap Alta}}$$

$$m_{\text{Baja}} (h_2 - h_3) = m_{\text{Alta}} (h_5 - h_8)$$



3.- Refrigeración por absorción (I)

El ciclo necesita calor a $\uparrow T$ (generador), para obtener efecto refrigerante a $\downarrow T$ (evaporador); como residuo se ha de extraer calor a media T (absorbedor y condensador)

Su coste de operación es bajo si el calor es residual. Apenas tienen partes móviles, no genera vibraciones ni ruidos, y tiene mantenimiento reducido.

Se usa una **mezcla de dos componentes**: refrigerante y absorbente. Las mezclas más utilizadas son: $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{LiBr-H}_2\text{O}$

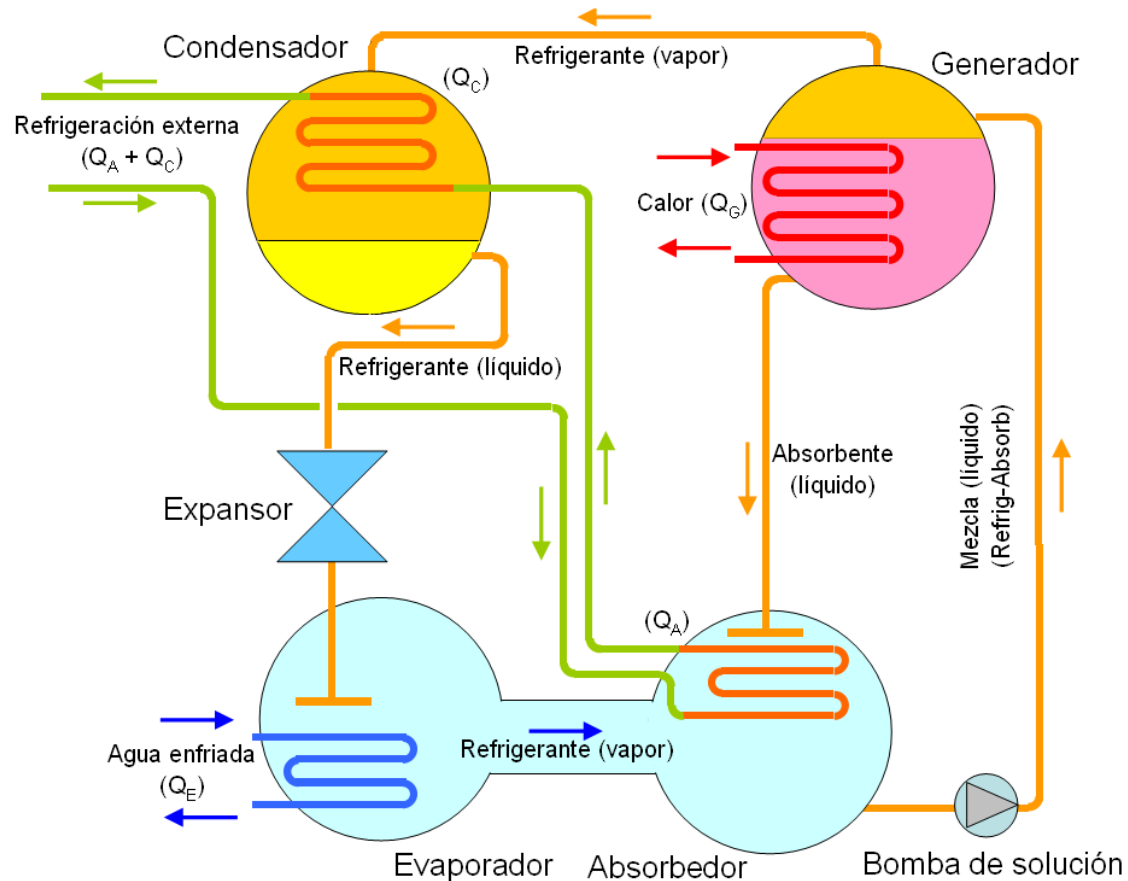
- El NH_3 es el refrigerante y el H_2O el absorbente
- El H_2O es el refrigerante, y el LiBr el absorbente ($T_{\text{evap}} > 0^\circ\text{C}$, entre 5 y 10°C)

La tensión de vapor del refrigerante **se ve alterada por** la presencia del **absorbente** ($\downarrow$ al $\uparrow$ la cantidad de absorbente)

Con la concentración de la mezcla, se controla la T de evaporación

3.- Refrigeración por absorción (II)

Una máquina de absorción de **efecto simple**

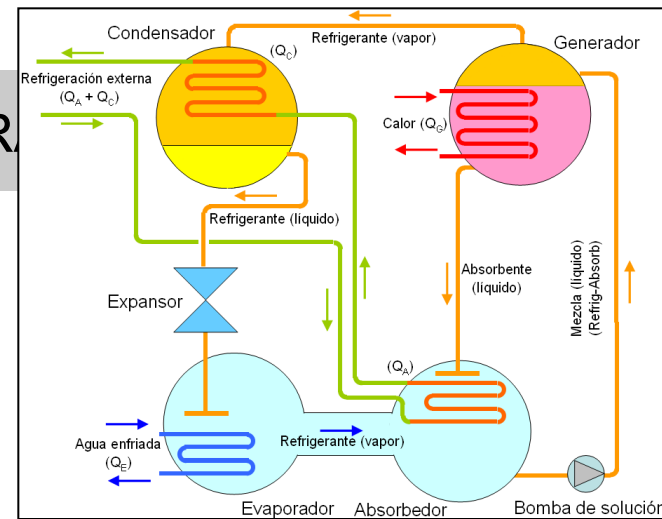
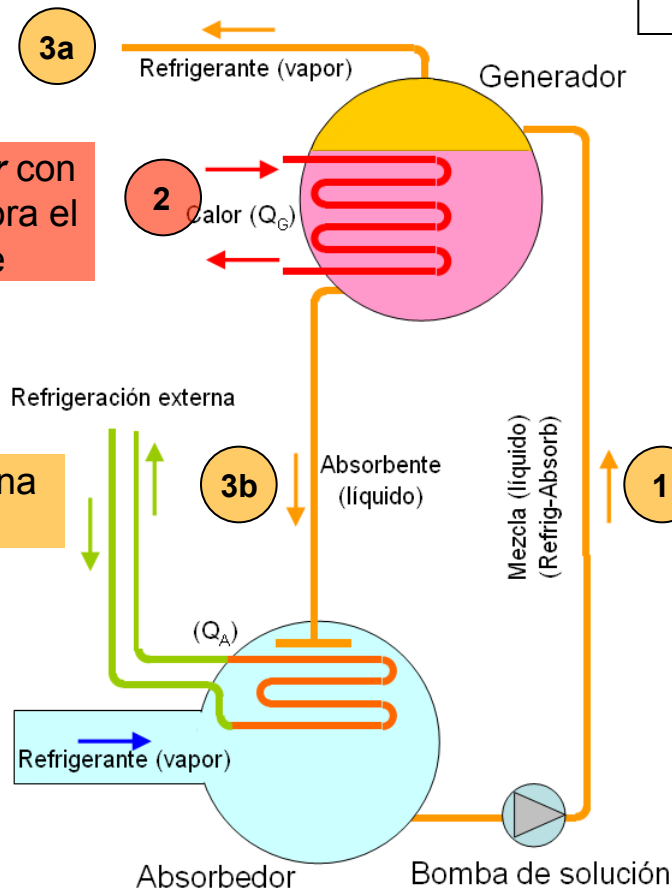


3.- Refrigeración por absorción (III)

El refrigerante continúa hacia el condensador

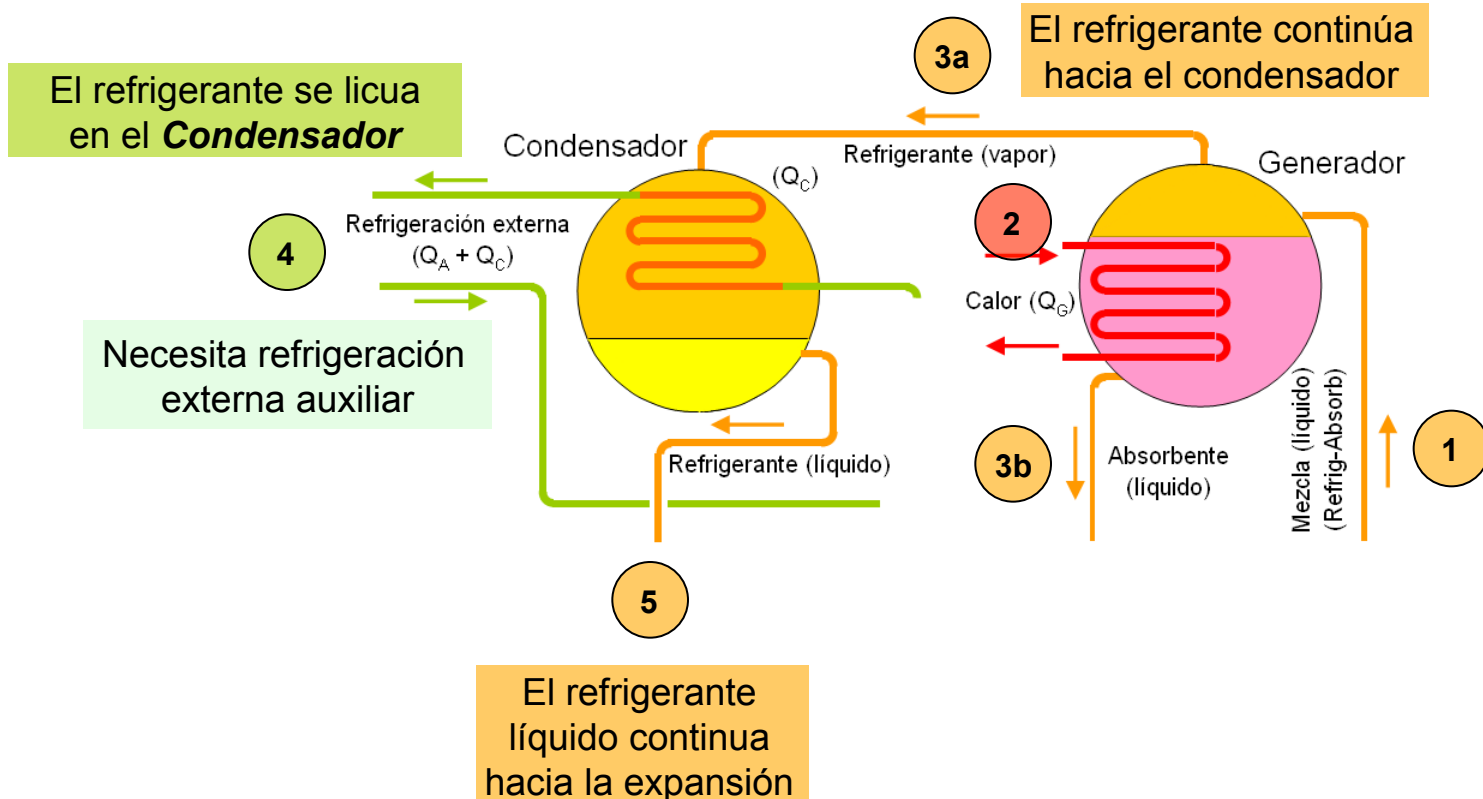
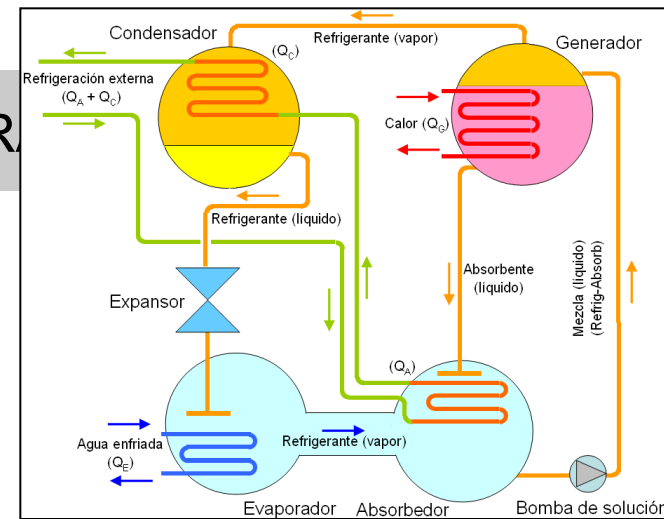
Se aporta **calor** con el que se evapora el refrigerante

Al absorbente retorna al absorbedor

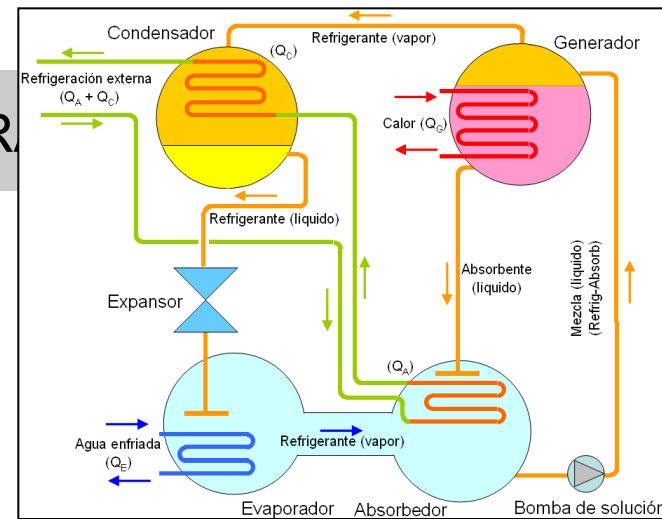


Al **generador** se le aporta la mezcla líquida de refri. y absorbente

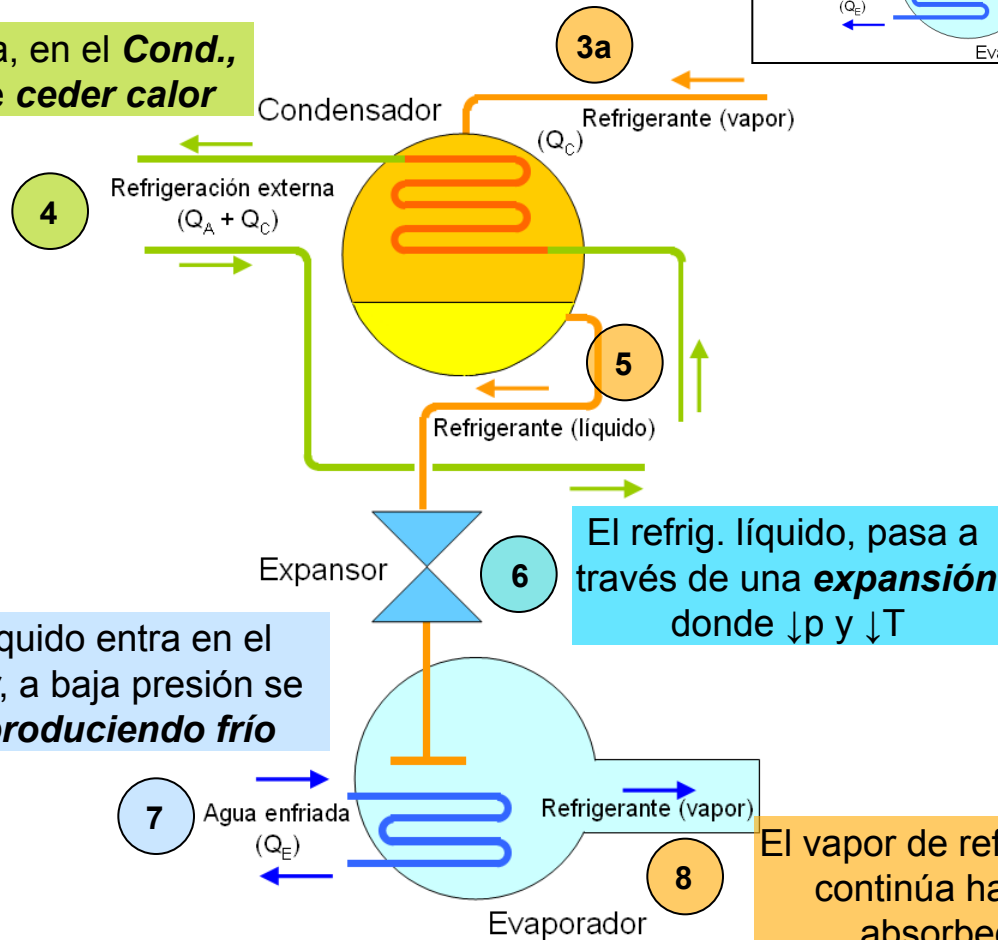
3.- Refrigeración por absorción (IV)



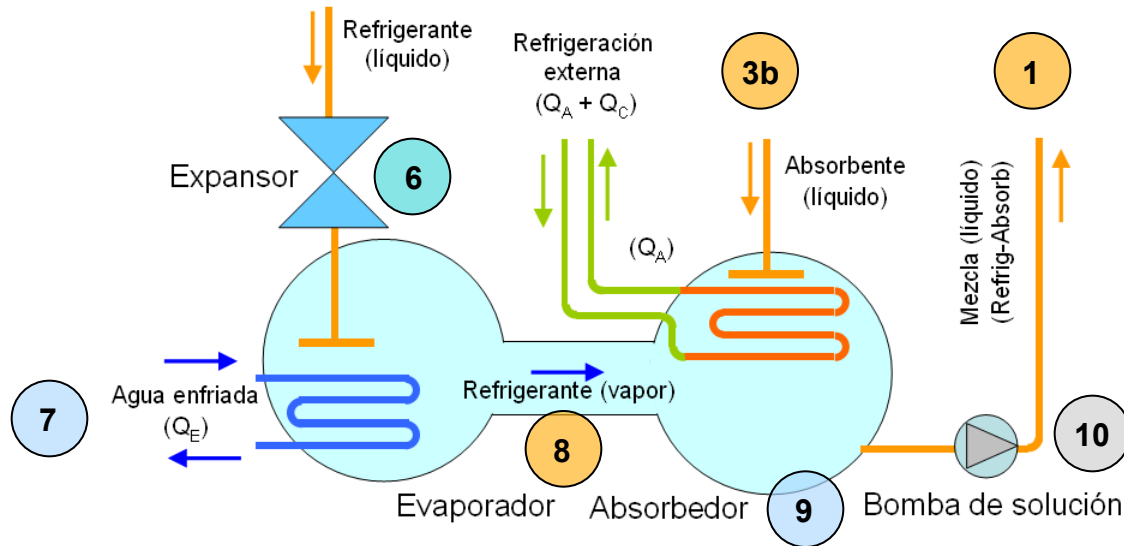
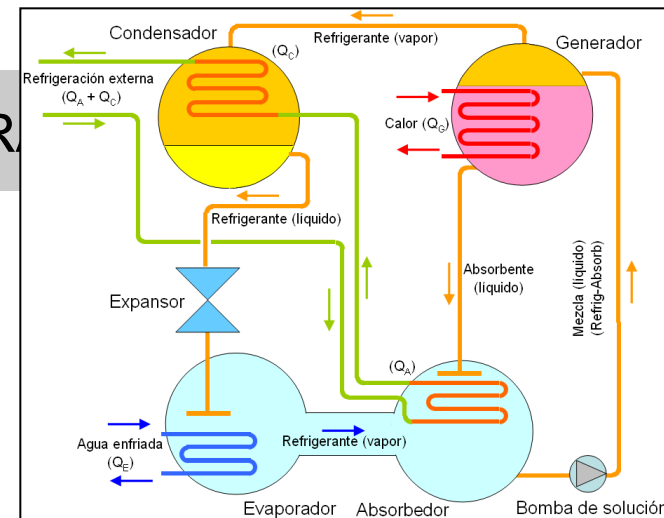
3.- Refrigeración por absorción (V)



El refrigerante se licua, en el **Cond.**, lo que requiere **ceder calor**



3.- Refrigeración por absorción (VI)



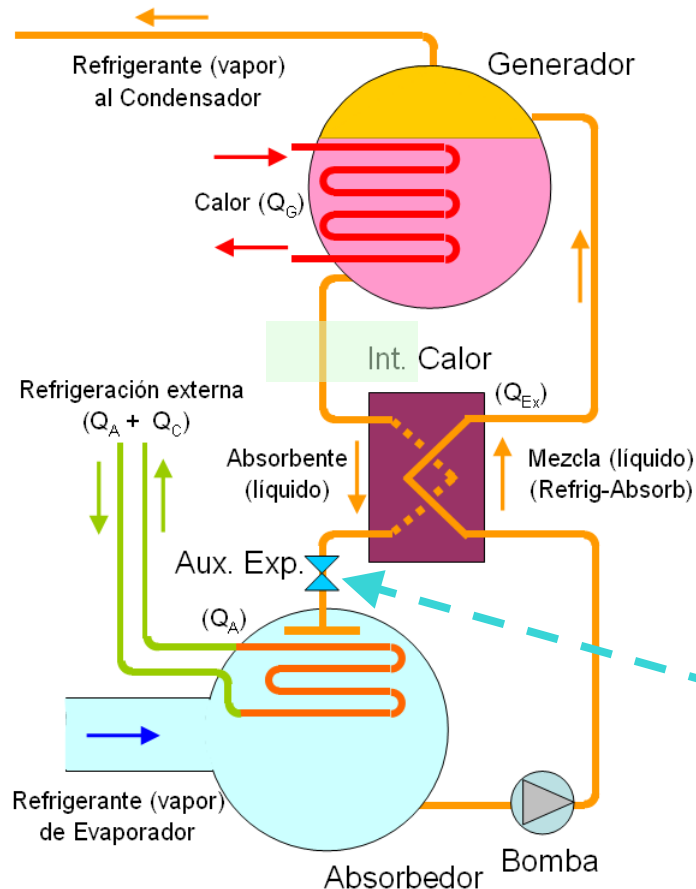
El paso de la mezcla desde el absorbedor al generador requiere $\uparrow p$, $\Rightarrow$ **una bomba**, (única parte móvil del sistema)

En el **Absorbedor** se mezclan:

- el vapor de refri. (evap); 8
- la mezcla diluida (gen.); 3b

La reacción de absorción es exotérmica, y necesita refrigeración, externa auxiliar. De no ser así $\uparrow p$, dificultando la absorción

3.- Refrigeración por absorción (VII)



Para mejorar la eficiencia se instala un ***intercambiador de calor***

- precalienta la mezcla que va al generador
- refrigera el absorbente que retorna al absorbedor

Se puede instalar una expansión auxiliar en el absorbente que retorna del generador

3.- Refrigeración por absorción (VIII)

El calor que se debe eliminar ($Q_{\text{abs}} + Q_{\text{cond}}$) es grande, ($Q_{\text{gen}} + Q_{\text{evap}}$)

En máquinas de absorción: ($Q_{\text{abs}} + Q_{\text{cond}}$) $\cong$ 2,5 Potencia maquina

$$|Q_C| + |Q_A| = |Q_G| + |Q_E| = \left| \text{COP} \approx \frac{|Q_E|}{|Q_G|} = 0.7 \Rightarrow |Q_G| = \frac{|Q_E|}{0.7} = 2.43 |Q_E| \right|$$

En máquinas de compresión: (Q_{cond}) $\cong$ 1,25 Potencia maquina

$$|Q_C| = W_{\text{comp}} + |Q_E| = \left| \text{COP} \approx \frac{|Q_E|}{W_{\text{comp}}} = 4 \Rightarrow W_{\text{comp}} = \frac{|Q_E|}{4} = 1.25 |Q_E| \right|$$

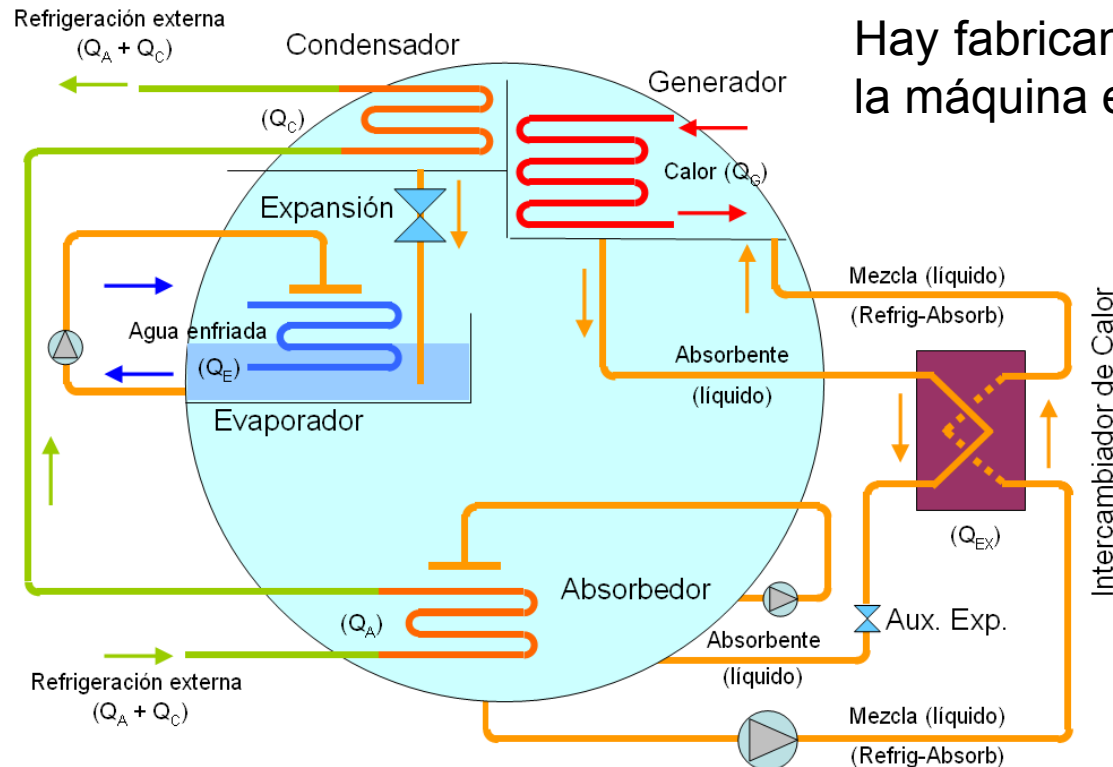
Q eliminado en absorción $\cong$ 2 Q eliminado en compresión

3.- Refrigeración por absorción (IX)

Las máquinas suelen tener dos partes:

- el generador y el condensador
- el evaporador y el absorbedor

Hay fabricantes que colocan toda la máquina en una única carcasa



3.- Refrigeración por absorción (X)

El suministro térmico en los arranques debe ser mayor que en régimen

La capacidad se controla con la concentración el absorbedor:

- Estrangulando la alimentación de calor en el generador

- Disminuyendo la refrigeración del condensador

- Regulando el caudal que le llega al hervidor

- Bypassando la solución con una válvula de tres vías en el hervidor

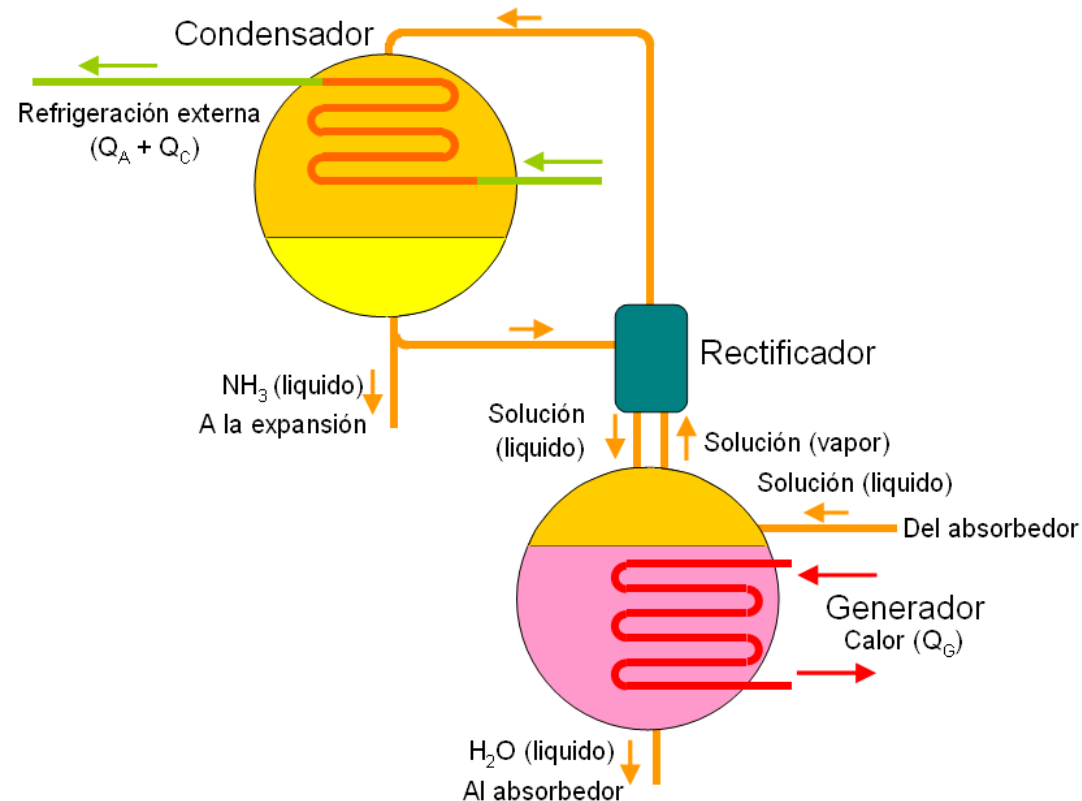
- (las dos conexiones con el absorbedor)

Sistema bromuro de litio-agua ($\text{BrLi-H}_2\text{O}$), requiere en el generador T^a de 100°C

3.- Refrigeración por absorción (XI)

Sistema amoniaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$), requiere en el generador de $120\text{-}150^\circ\text{C}$

- El NH_3 es tóxico y además ataca el cobre
- Las máquinas y tuberías tienen que ser de acero e inoxidable
- Necesita un rectificador entre el generador y el condensador ya que con el amoniaco se evapora agua



3.- Refrigeración por absorción (XII)

En el **rendimiento del ciclo** hay que considerar el aporte de calor en el generador, la energía mecánica (bombas y ventiladores) se desprecia

El *COP* típico de las máquinas comerciales de LiBr-H₂O, es de 0,7

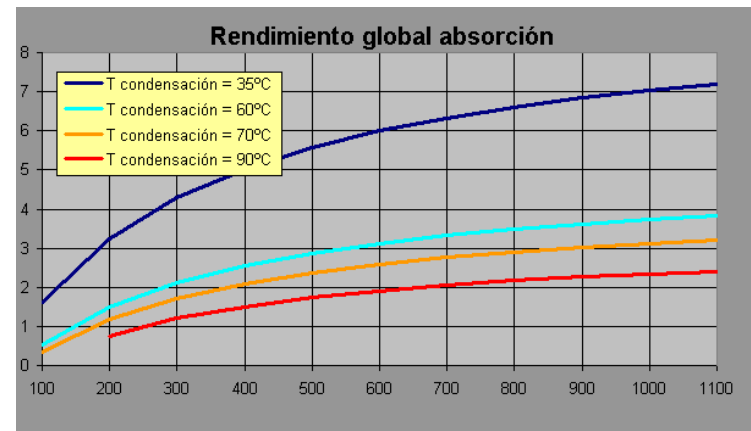
El COP de las de NH₃-H₂O es de 0,5 (trabajan a menores T_{evap})

El rendimiento total es el de la producción del frío por el de la de calor

$$\eta_{\text{Frío Abs}} = \frac{T_{\text{evaporador}}}{T_{\text{condensador}} - T_{\text{evaporador}}} \cdot \frac{T_{\text{generador}} - T_{\text{condensación}}}{T_{\text{generador}}} \quad \text{con T en K}$$

al $\uparrow T$ en el generador $\square \eta$

$r \downarrow \eta$



3.- Refrigeración por absorción (XIII)

Las **máquinas** son **voluminosas y caras**, especialmente si funcionan con T bajas en el generador

Sólo son rentables cuando el calor muy barato, y las horas de funcionamiento anual a plena carga son elevadas

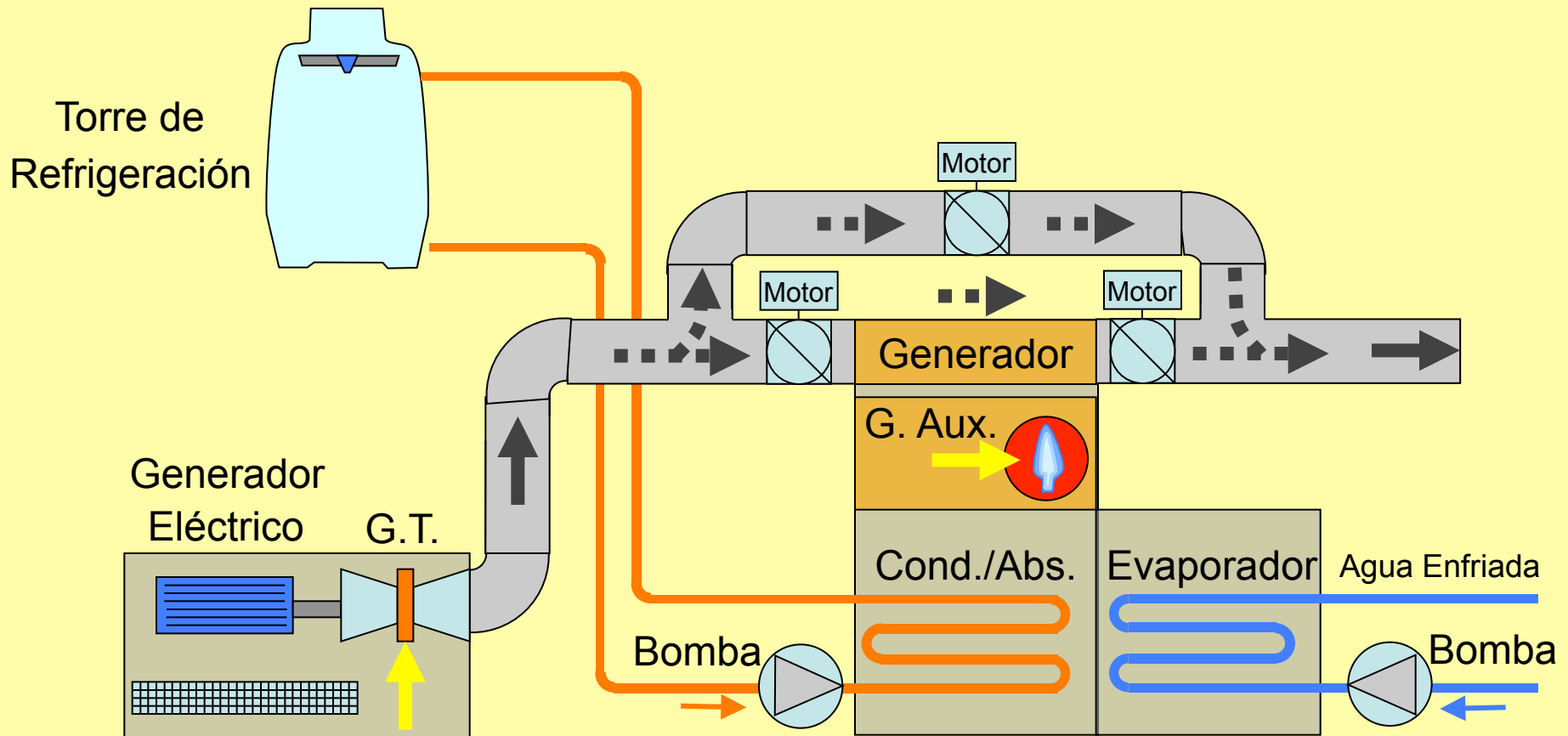
En los sistemas solares la disponibilidad de calor con la necesidad de refrigeración

La intermitencia del Sol hace necesario un sistema de almacenamiento térmico

No son rentables

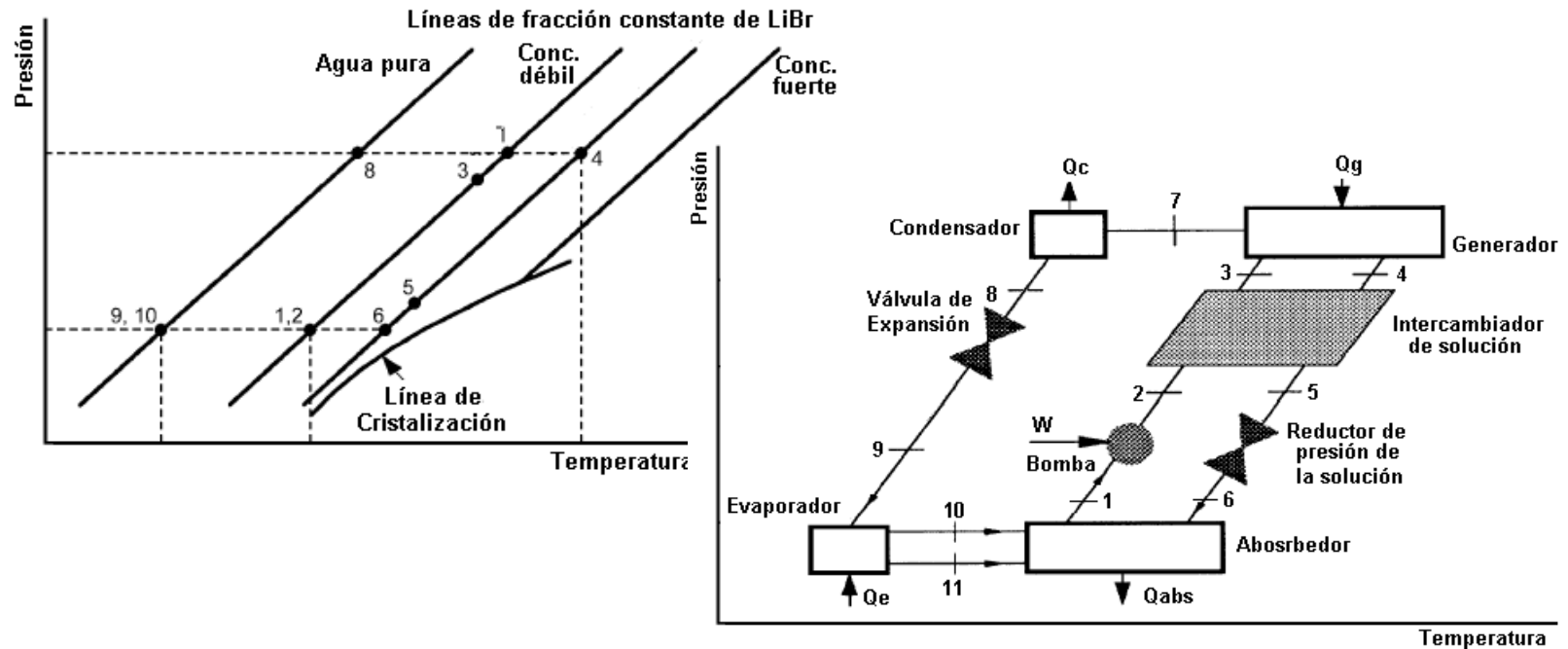
3.- Refrigeración por absorción (XIV)

Las **máquinas** son **voluminosas v caras**, especialmente si funcionan con T



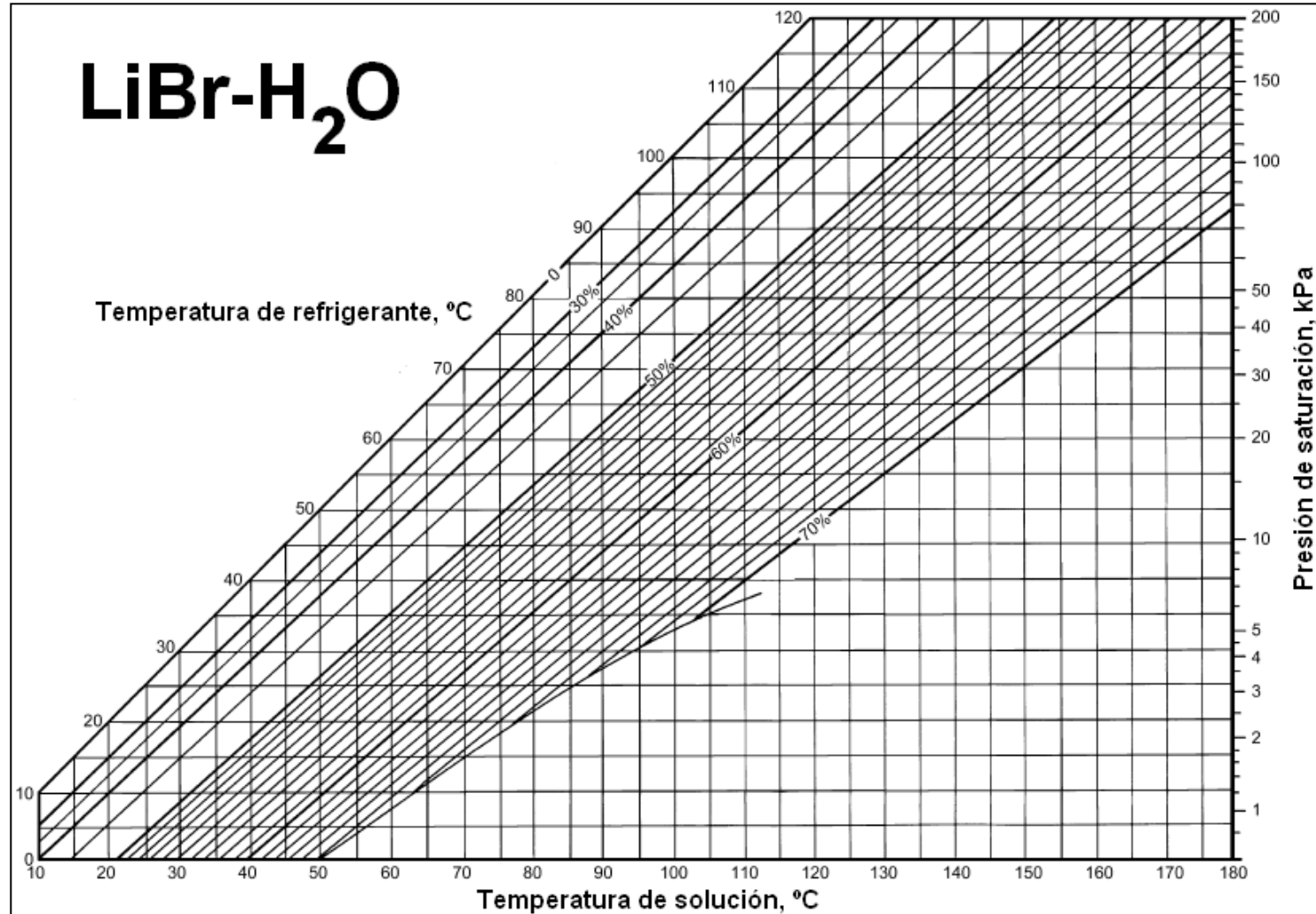
3.- Refrigeración por Absorción (XV)

El diagrama que representa la mezcla de trabajo es el **Dühring** (P-T)



Se debe evitar la **cristalización** de la sal, que depende de la presión, y es peligroso en el arranque de la máquina, cuando la T es baja

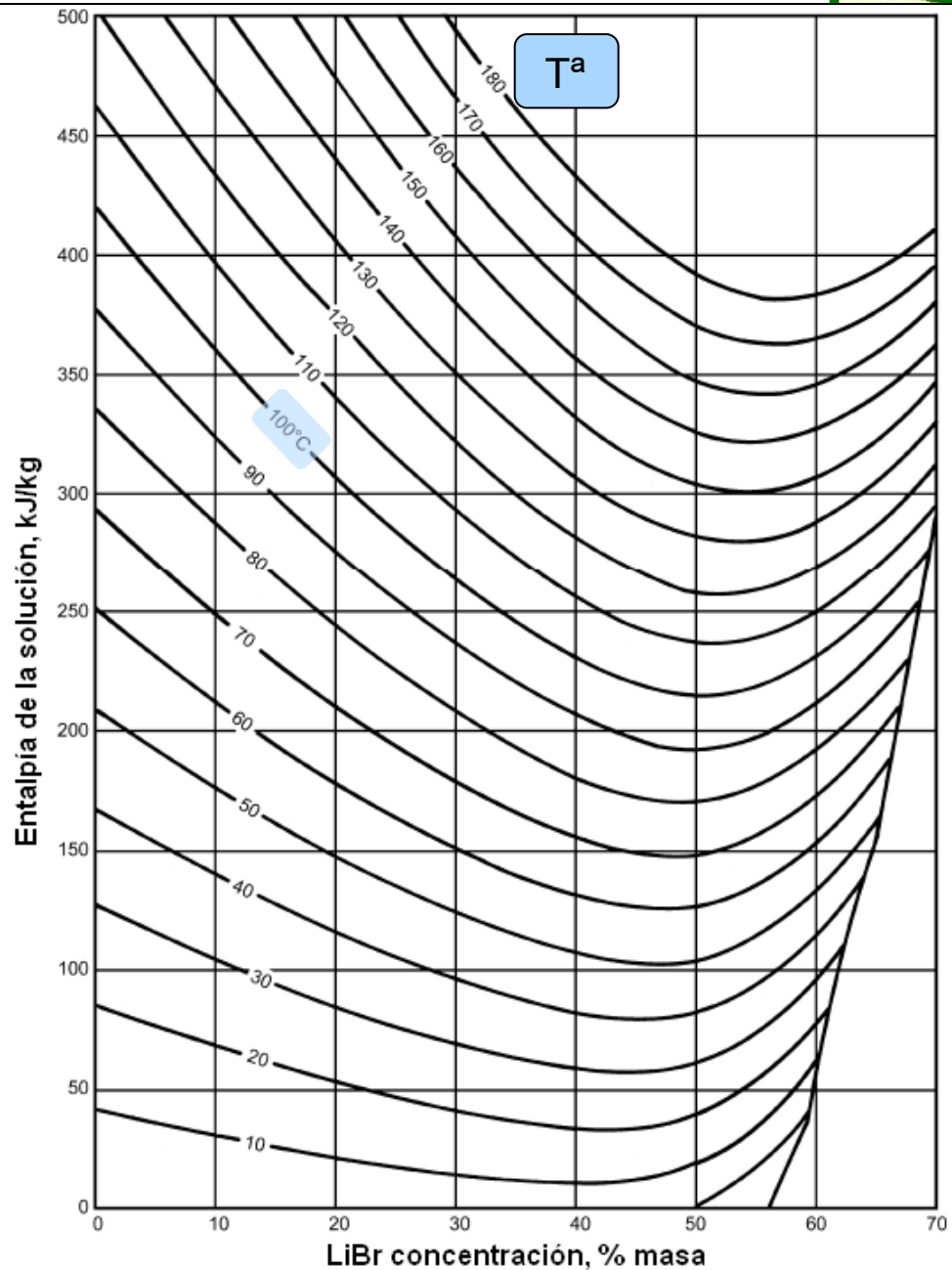
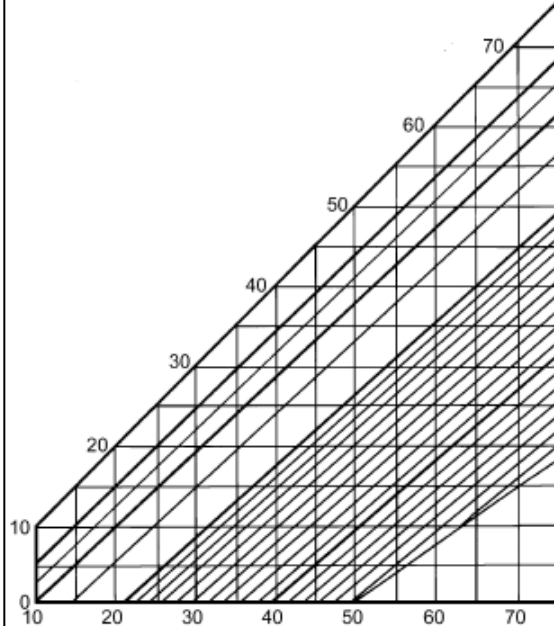
3.- Refrigeración por Absorción (XVI)



3.- Refrigeración por Abs

LiBr-H₂O

Temperatura de refrigerante, °C



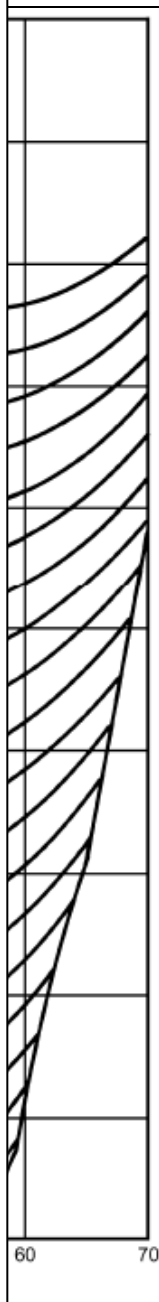
Temperatura de solución, °C

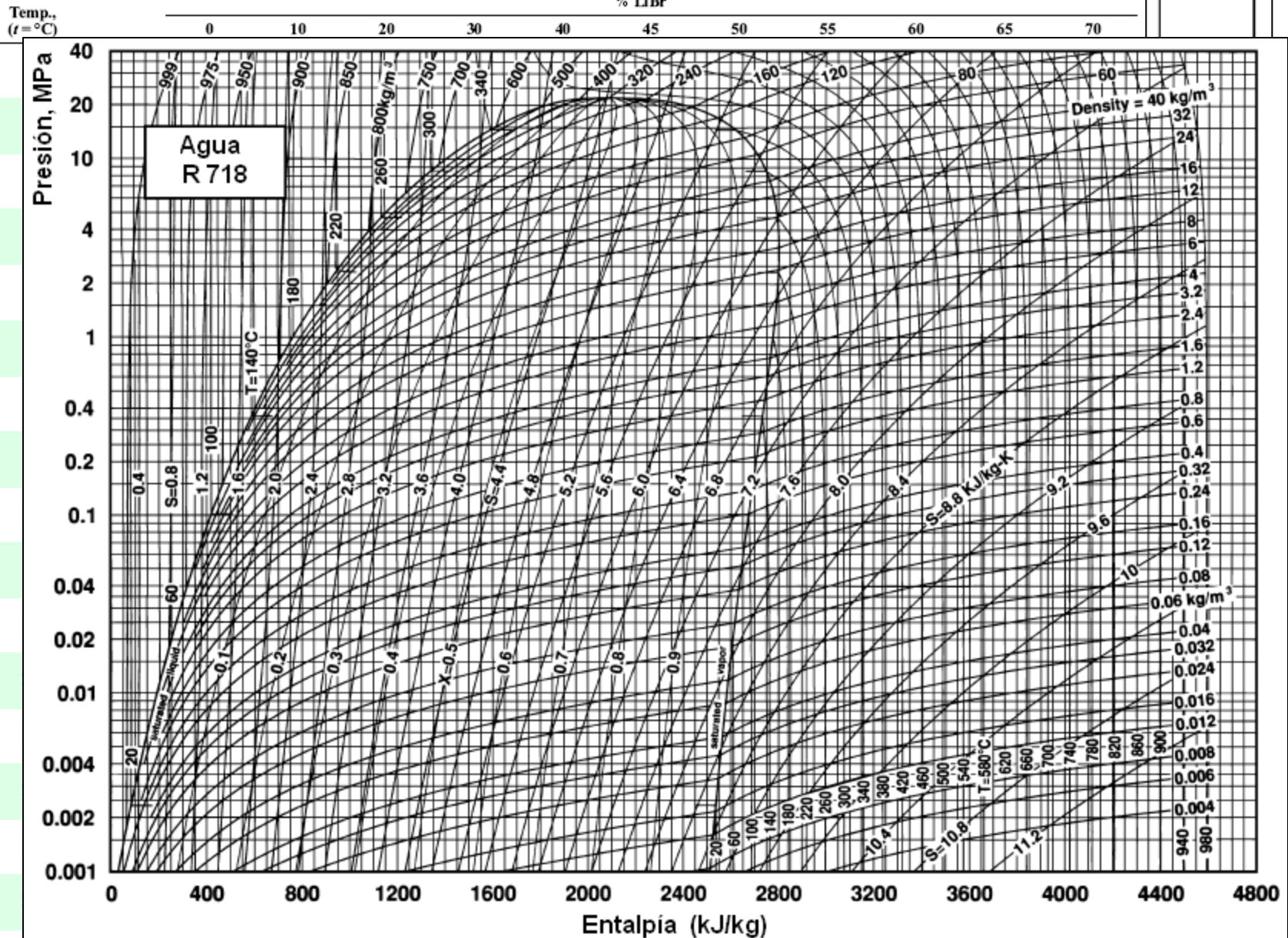
T Refrigerante(°C) y Entalpía de la Solución LiBr(kJ/kg)

Temp., (t = °C)		% LiBr										
		0	10	20	30	40	45	50	55	60	65	70
20	t'	20	19.1	17.7	15.0	9.8	5.8	-0.4	-7.7	-15.8	-23.4#	-29.3#
	h	84.0	67.4	52.6	40.4	33.5	33.5	38.9	53.2	78.0	111.0#	145.0#
30	t'	30.0	29.0	27.5	24.6	19.2	15.0	8.6	1.0	-7.3	-15.2#	-21.6#
	h	125.8	103.3	84.0	68.6	58.3	56.8	60.5	73.5	96.8	128.4#	161.7#
40	t'	40.0	38.9	37.3	34.3	28.5	24.1	17.5	9.8	1.3	-7.0#	-14.0#
	h	167.6	139.5	115.8	96.0	82.5	79.7	82.2	93.5	115.4	146.0#	178.3#
50	t'	50.0	48.8	47.2	44.0	37.9	33.3	26.5	18.5	9.9	1.3	-6.3#
	h	209.3	175.2	147.0	123.4	106.7	102.6	103.8	114.0	134.5	163.5	195.0#
60	t'	60.0	58.8	57.0	53.6	47.3	42.5	35.5	27.3	18.4	9.5	1.4#
	h	251.1	211.7	179.1	151.4	131.7	125.8	125.8	134.7	153.7	181.4	211.9#
70	t'	70.0	68.7	66.8	63.3	56.6	51.6	44.4	36.1	27.0	17.7	9.0#
	h	293.0	247.7	210.5	178.8	155.7	148.9	148.0	155.6	173.2	199.4	228.8#
80	t'	80.0	78.6	76.7	73.0	66.0	60.8	53.4	44.8	35.6	26.0	16.7#
	h	334.9	287.8	243.6	207.3	181.0	172.8	170.0	176.2	192.6	217.2	245.7#
90	t'	90.0	88.6	86.5	82.6	75.4	70.0	62.3	53.6	44.1	34.2	24.3#
	h	376.9	321.1	275.6	235.4	206.1	195.8	192.3	197.1	212.2	235.6	262.9#
100	t'	100.0	98.5	96.3	92.3	84.7	79.1	71.3	62.4	52.7	42.4	32.0
	h	419.0	357.6	307.9	263.8	231.0	219.9	214.6	218.2	231.5	253.5	279.7
110	t'	110.0	108.4	106.2	101.9	94.1	88.3	80.2	71.1	61.3	50.6	39.7
	h	461.3	394.3	340.1	292.4	255.9	243.3	236.8	239.1	251.0	271.4	296.3
120	t'	120.0*	118.3*	116.0*	111.6	103.4	97.5	89.2	79.9	69.8	58.9	47.3
	h	503.7*	431.0*	372.5*	320.9	281.0	267.0	259.0	260.0	270.2	289.5	313.4
130	t'	130.0*	128.3*	125.8*	121.3*	112.8	106.7	92.8	88.7	78.4	67.1	55.0
	h	546.5*	468.4*	404.5*	349.6*	306.2	290.7	281.0	280.4	289.1	306.9	330.2
140	t'	140.0*	138.2*	135.7*	130.9*	122.2*	115.8	107.1	97.4	87.0	75.3	62.7
	h	589.1*	505.6*	437.8*	377.9*	331.3*	314.2	303.2	301.1	308.1	324.7	346.9
150	t'	150.0*	148.1*	145.5*	140.6*	131.5*	125.0*	116.1*	106.2	95.5	83.5	70.3
	h	632.2*	542.7*	470.5*	406.8*	356.6*	337.8*	325.5*	321.6	327.3	342.7	363.6
160	t'	160.0*	158.1*	155.3*	150.3*	140.9*	134.2*	125.0*	115.0	104.1	91.8	78.9
	h	675.6*	580.8*	503.1*	435.4*	381.9*	361.2*	347.7*	342.2	346.1	360.3	380.1
170	t'	170.0*	168.0*	165.2*	159.9*	150.3*	143.3*	134.0*	123.7	112.7	100.0	85.7
	h	719.2*	618.9*	536.1*	464.3*	406.8*	384.9*	369.9*	362.9	365.4	378.3	396.0
180	t'	180.0*	177.9*	175.0*	169.6*	159.6*	152.5*	142.9*	132.5*	121.2*	108.2	93.3
	h	763.2*	657.1*	569.4*	493.4*	432.1*	408.8*	392.1*	383.4*	384.3*	395.8	411.3

*Extensions of data above 115°C are well above the original data and should be used with care.

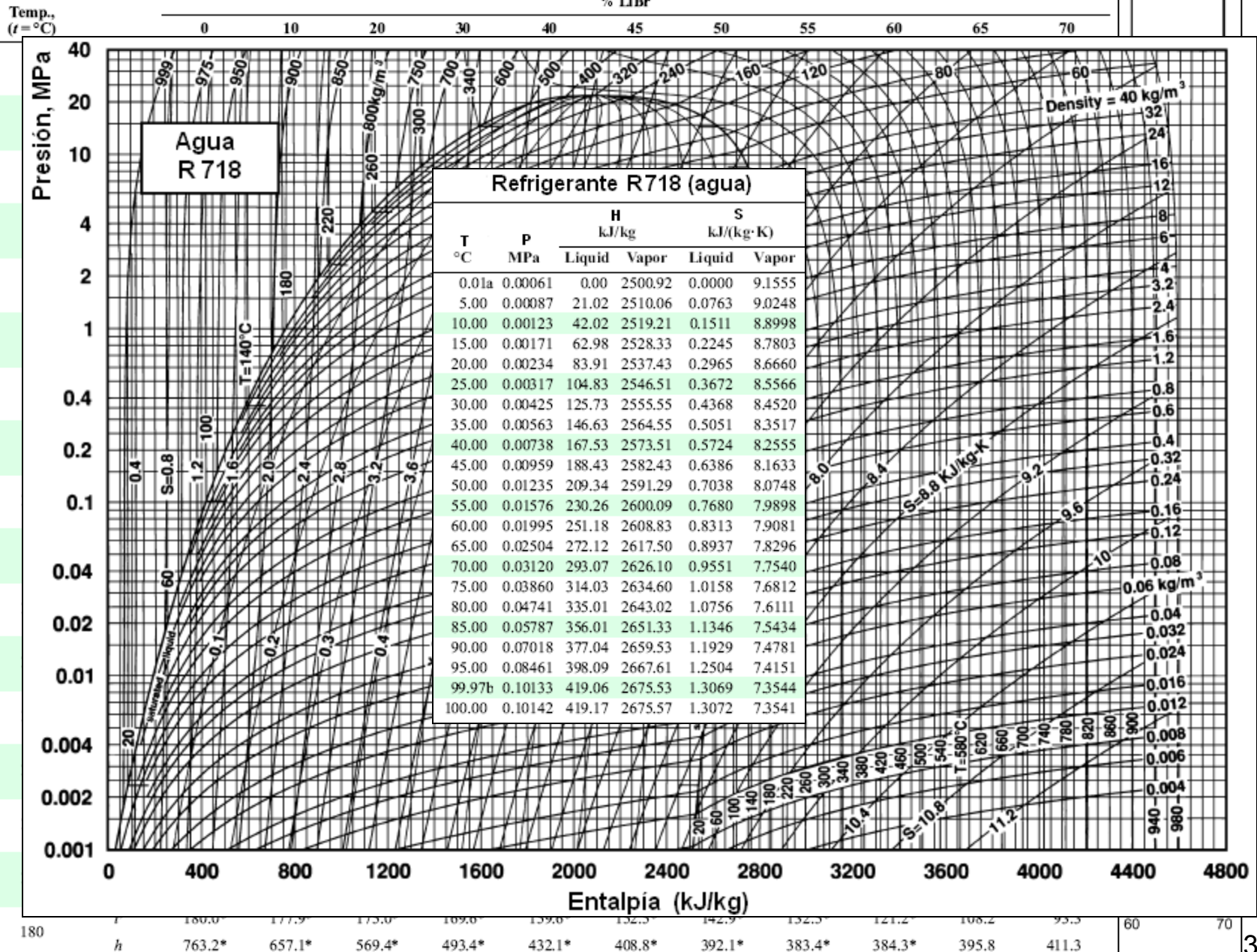
#Supersaturated solution.





*Extensions of data above 115°C are well above the original data and should be used with care.

#Supersaturated solution.



*Extensions of data above 115°C are well above the original data and should be used with care.

#Supersaturated solution.

4.- La Bomba de Calor (I)

Máquina frigorífica que **aprovecha el calor del condensador**

Pueden ser **reversibles**: aprovechar calor o frío (calefacción en invierno y refrigeración en verano, aptas para climatización)

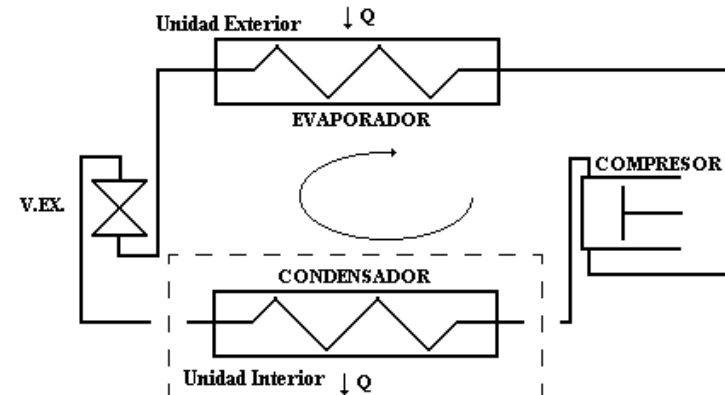
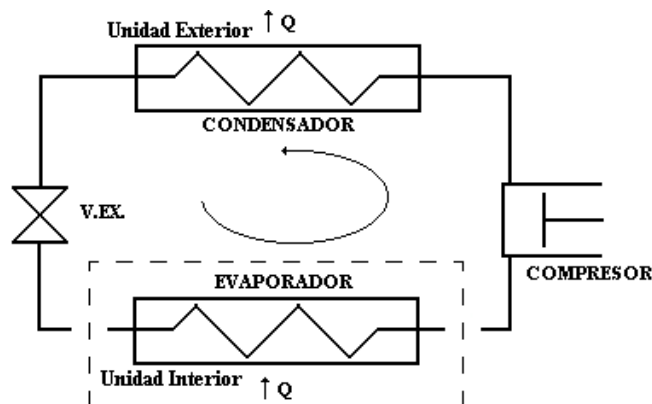
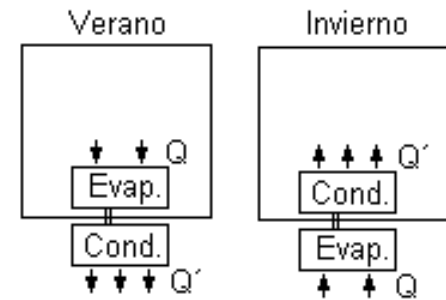
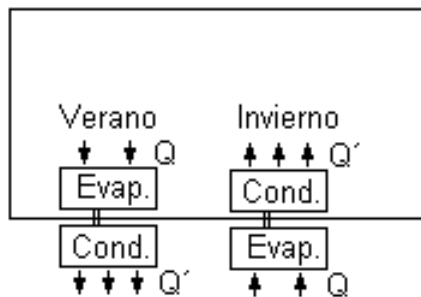
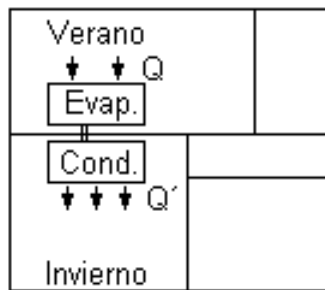
	Unidad interior	Unidad exterior
Invierno	Condensador	Evaporador
Verano	Evaporador	Condensador

Si se aprovecha simultáneamente el frío y el calor que hace la máquina, aumenta considerablemente el rendimiento

Son máquinas frigoríficas que incorporan algún elemento nuevo

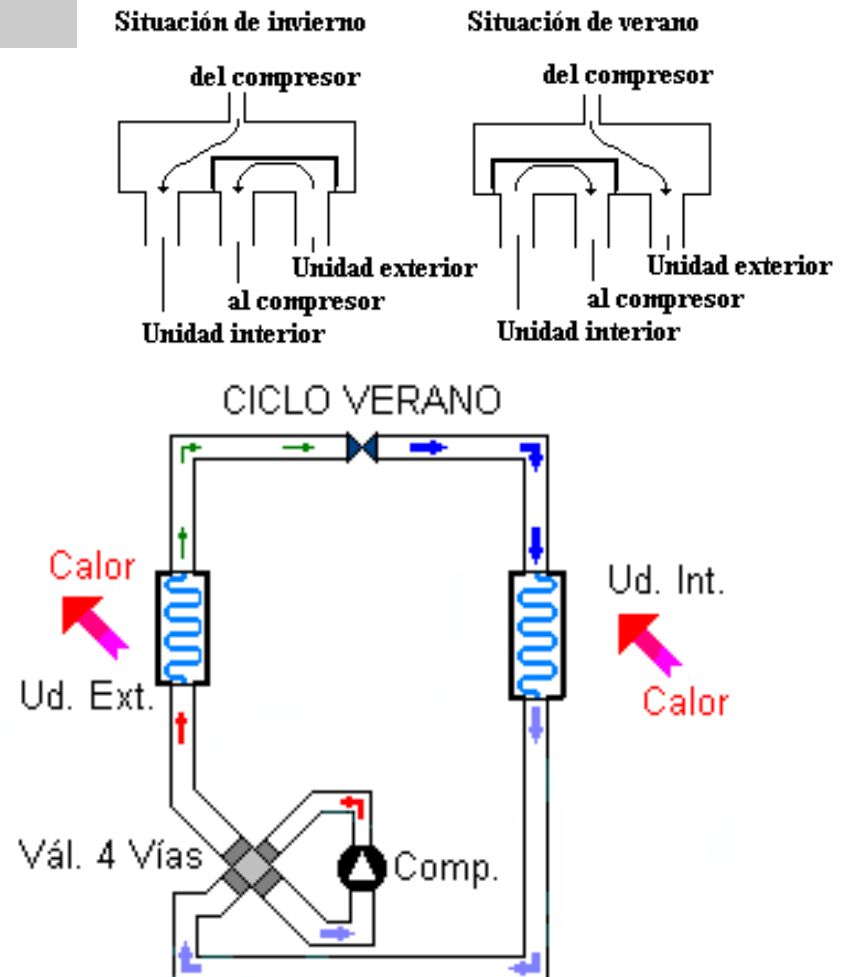
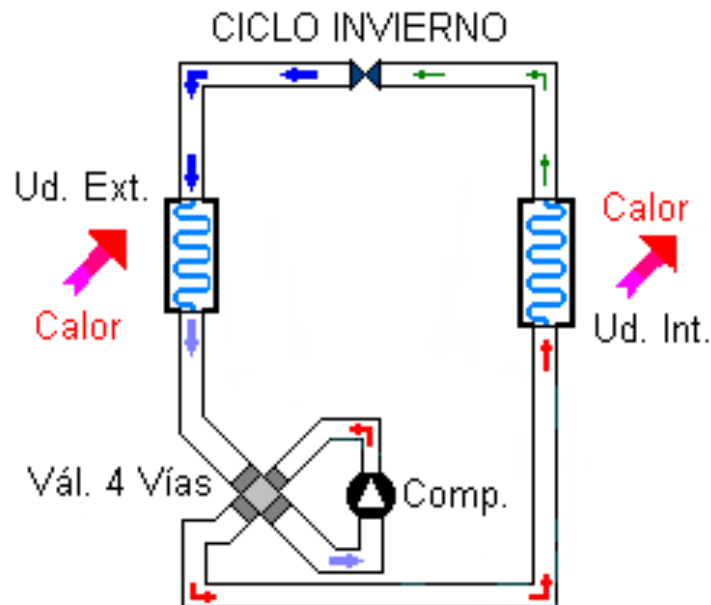
4.- La Bomba de Calor (II)

Para aprovechar en verano el frío del evaporador y en invierno el calor del condensador se pueden pensar en varias situaciones:



4.- La Bomba de Calor (III)

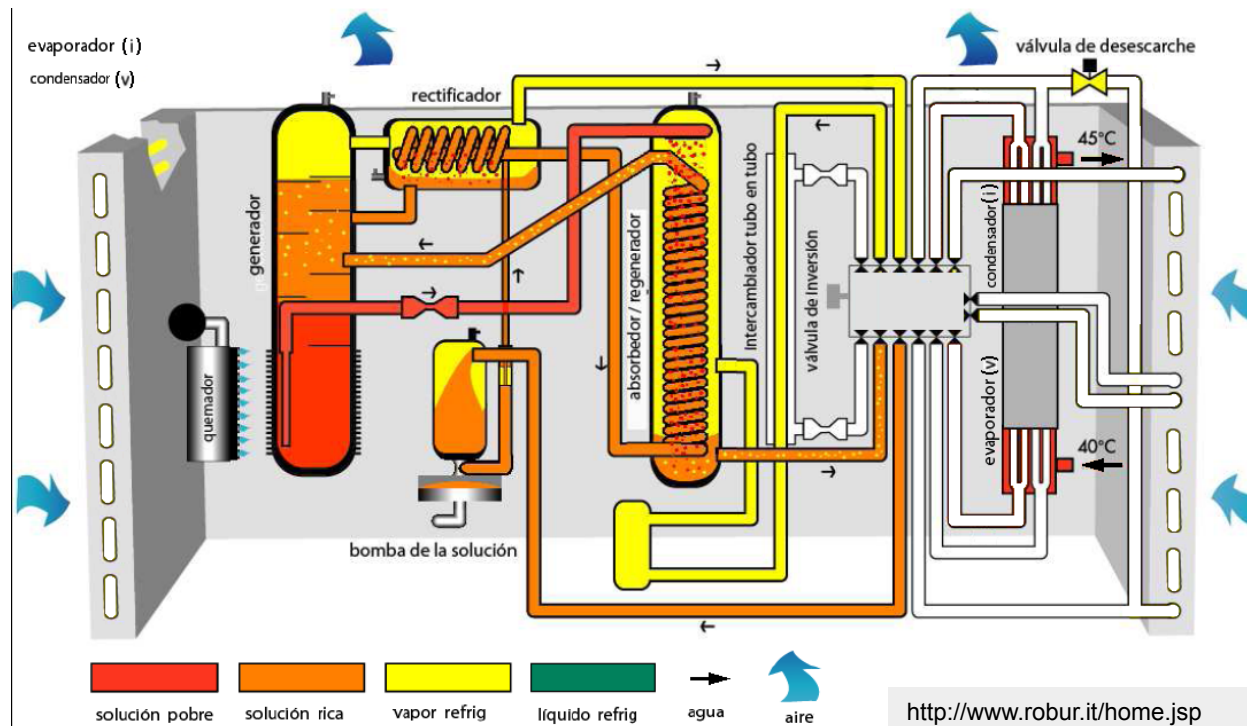
a) B.C. de compresión mecánica
“Invierte el sentido del refrigerante por las tuberías” con una válvula de 4 vías



4.- La Bomba de Calor (IV)

b) Bomba de Calor de absorción

Se aporta calor a alta T en el generador, y se obtiene una cantidad mayor, pero a media T , en el absorbedor y en el condensador.



4.- La Bomba de Calor (V)

El rendimiento de la B.C.

$$\text{COP}_{\text{VERANO}} = \frac{Q_{\text{EVAPORADOR}}}{W_{\text{COMPRESOR}}}$$

$$\text{COP}_{\text{INVIERNO}} = \frac{Q_{\text{CONDENSADOR}}}{W_{\text{COMPRESOR}}}$$

Si se aprovechan a la vez el Q_{CON} y el Q_{EVAP}

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{CONDENSADOR}} + Q_{\text{EVAPORADOR}}}{W_{\text{COMPRESOR}}}$$

Los **focos** son los medios de los que extrae o cede calor

