

### T4.- Métodos de Producción de Frío en A.A.

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

**Departamento:** Ingeniería Eléctrica y Energética  
**Area:** Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO [renedoc@unican.es](mailto:renedoc@unican.es)  
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28  
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>  
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

- 1.- Introducción
- 2.- Refrigeración por Compresión
- 3.- Refrigeración por Absorción
- 4.- Refrigeración Evaporativa

### 1.- Introducción

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

Los métodos empleados para la producción de frío aplicado en el aire acondicionado se basan en tres sistemas:

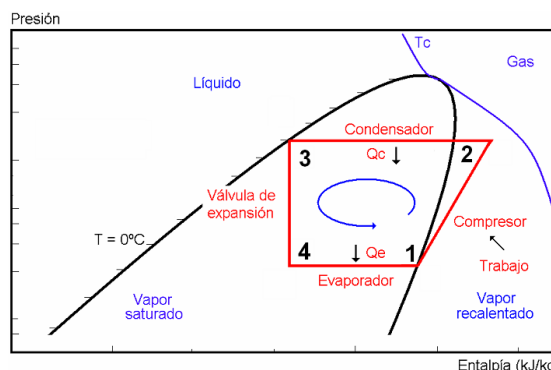
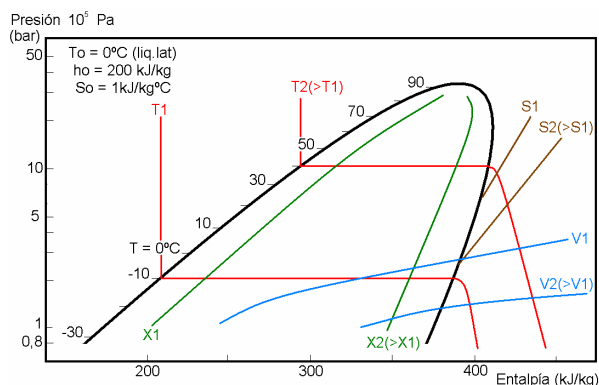
- el ciclo de compresión del vapor
- el ciclo de absorción
- la refrigeración evaporativa

2

2.- Refrigeración por Compresión (I)

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

- Compresión
- Condensación
- Expansión
- Evaporación

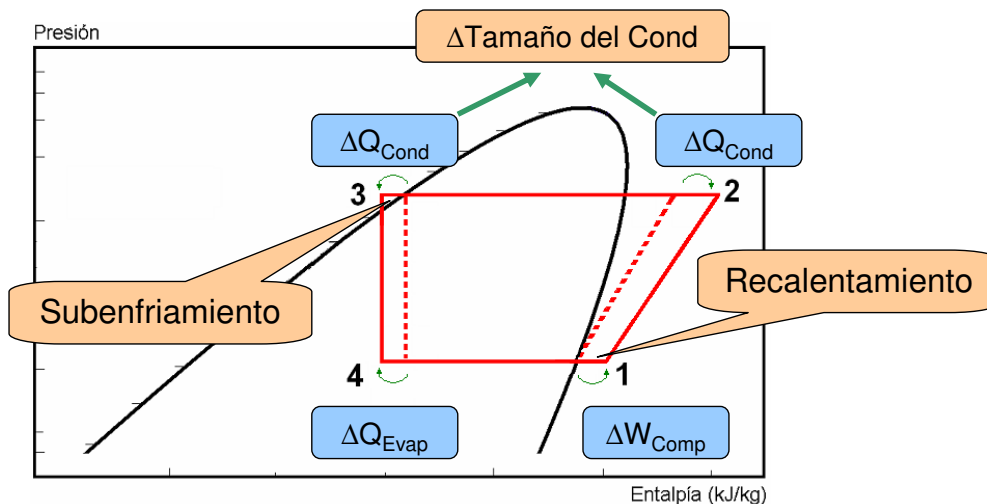


Líneas características del diagrama de un refrigerante

2.- Refrigeración por Compresión (II)

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

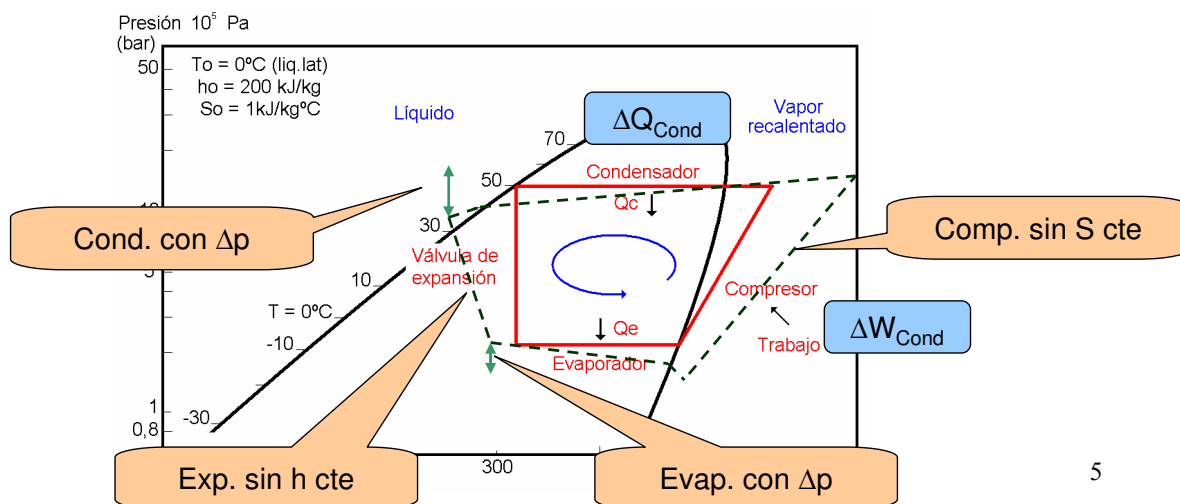
**Recalentamiento:** salida del evaporador, asegura vapor en el Comp.



2.- Refrigeración por Compresión (III)

**Ciclo real:**

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



5

2.- Refrigeración por Compresión (IV)

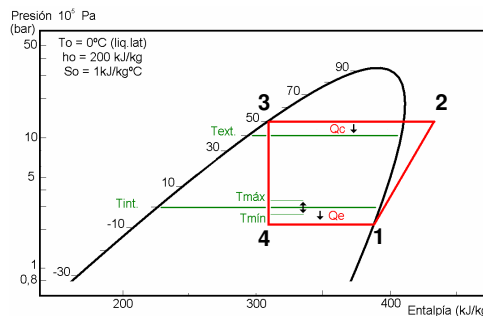


6

2.- Refrigeración por compresión (V)

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

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

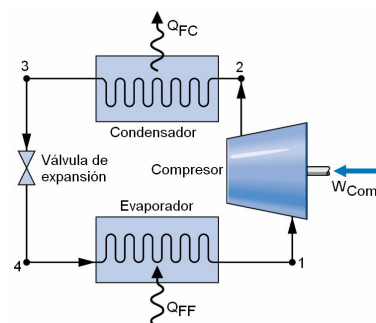


Para calcular el **rendimiento del ciclo de compresión**

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)

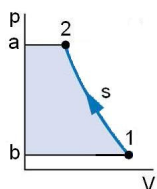
*estos valores se obtienen del diagrama, ó de las tablas*



2.- Refrigeración por compresión (VI)

Análisis Termodinámico (I):

• **Etapa de compresión (1-2)**



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

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

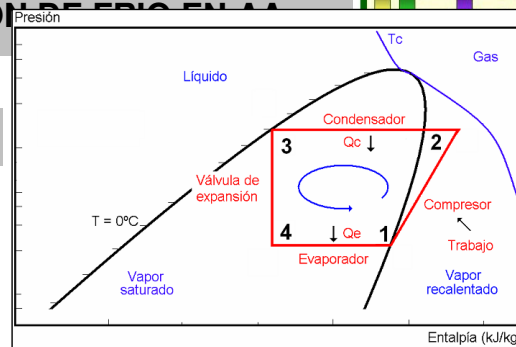
$$W_{(a-b)} = \left. \vphantom{W_{(a-b)}} \right|_{v = \text{cte}} = 0$$

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

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

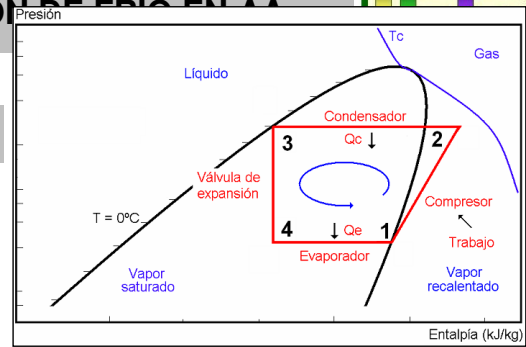
• **Etapa de condensación (2-3)**

$$\text{[P.P.T.]} \quad q = \int_2^3 du + \int_2^3 dw = \int_2^3 du + \int_2^3 p dv = \left. \vphantom{q} \right|_{p_2 = p_3} = u_3 - u_2 + p(v_3 - v_2) = h_3 - h_2$$



2.- Refrigeración por compresión (VII)

Análisis Termodinámico (II):



• **Etapa de expansión (3-4)**

[P.P.T.]  $q = u + w$  | sin área no hay posibilidad de intercambio térmico |  $\Rightarrow \Delta u = -\Delta w$   
 $q = 0$

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

• **Etapa 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 (VIII)

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

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

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

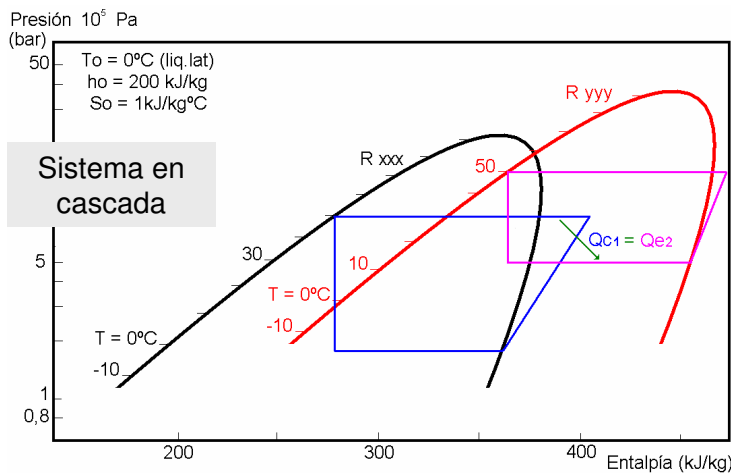
En aire acondicionado puede ser superior a 13

1.000 BTU  $\approx$  293 Wh

**SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)**

El EER durante un periodo de tiempo

**2.- Refrigeración por compresión (IX)**

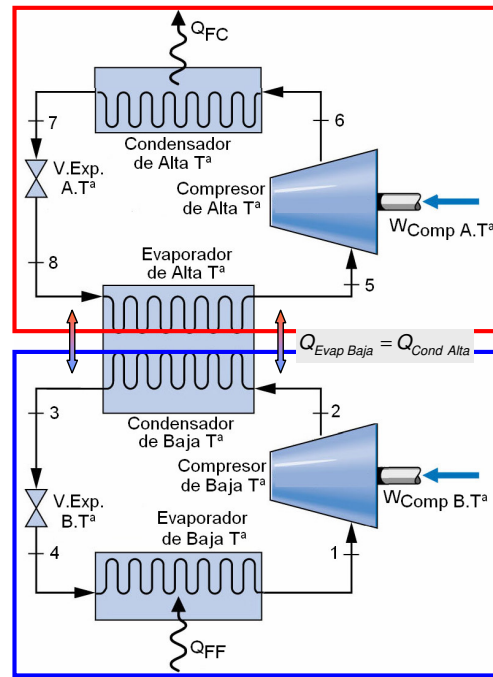


**Sistema en cascada**

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

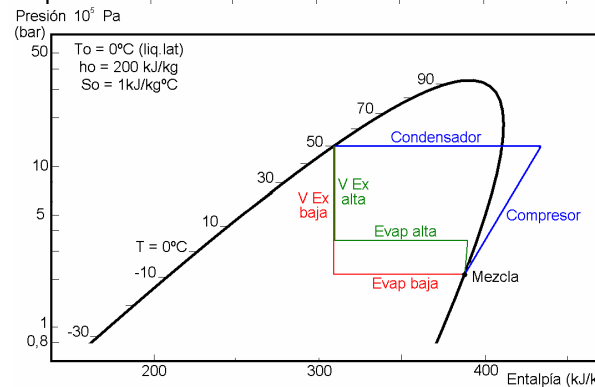
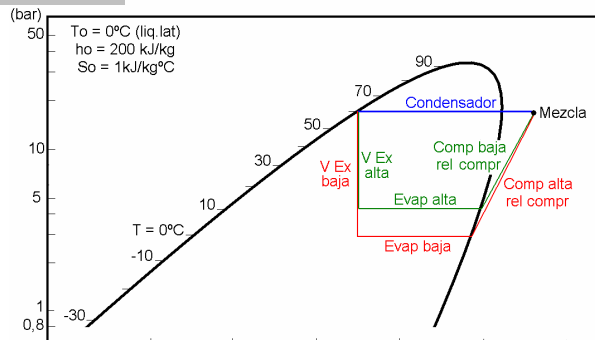
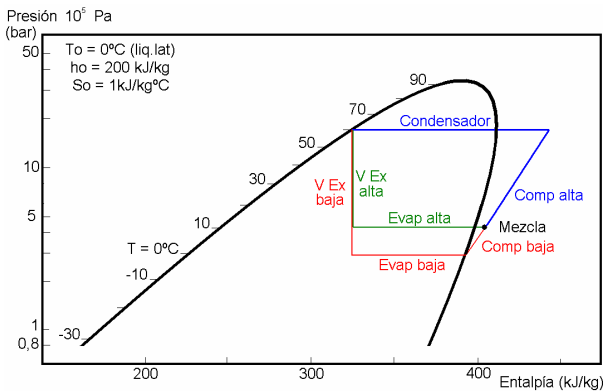
$$m_{\text{Baja}} \Delta h_{\text{Cond Baja}} = m_{\text{Alta}} \Delta h_{\text{Evap Alta}}$$

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

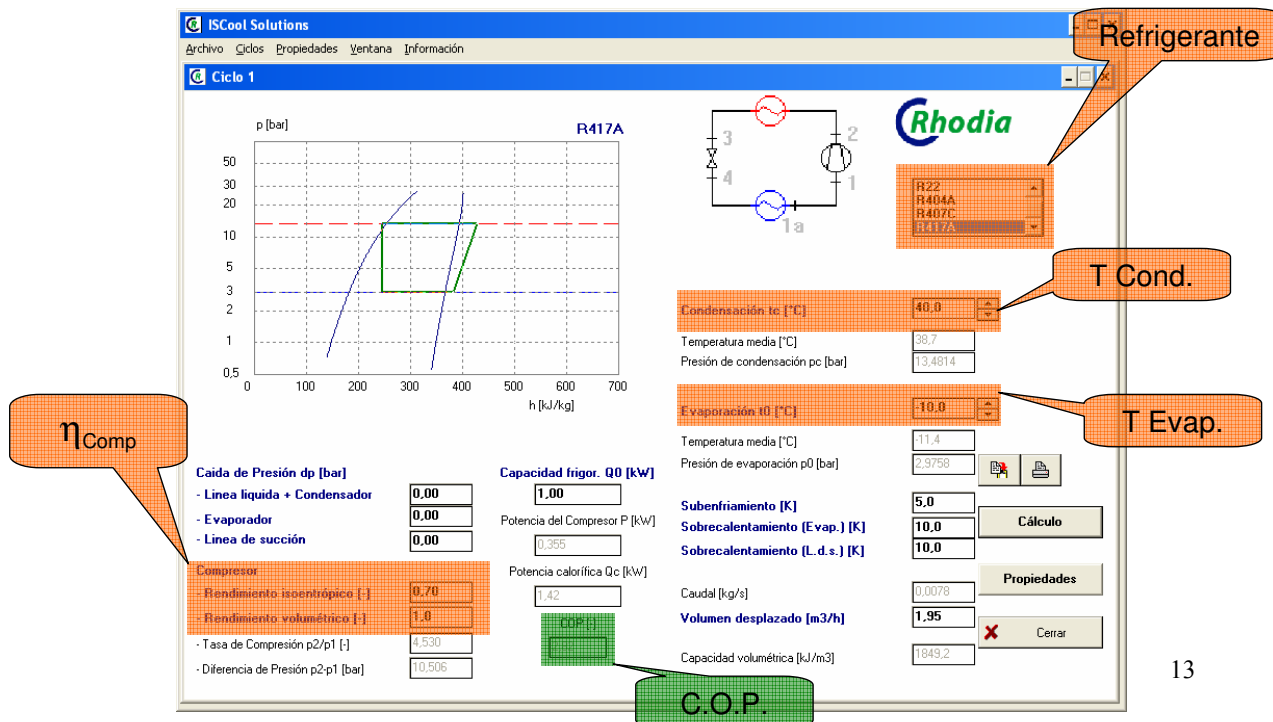


**2.- Refrigeración por Compresión (X)**

**Ciclos de varias etapas**



2.- Refrigeración por Compresión (XI)



13

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  $\text{NH}_3$  es el refrigerante y el  $\text{H}_2\text{O}$  el absorbente
- El  $\text{H}_2\text{O}$  es el refrigerante, y el  $\text{LiBr}$  el absorbente ( $T_{\text{evap}} > 0^\circ\text{C}$ , entre 5 y  $10^\circ\text{C}$ )

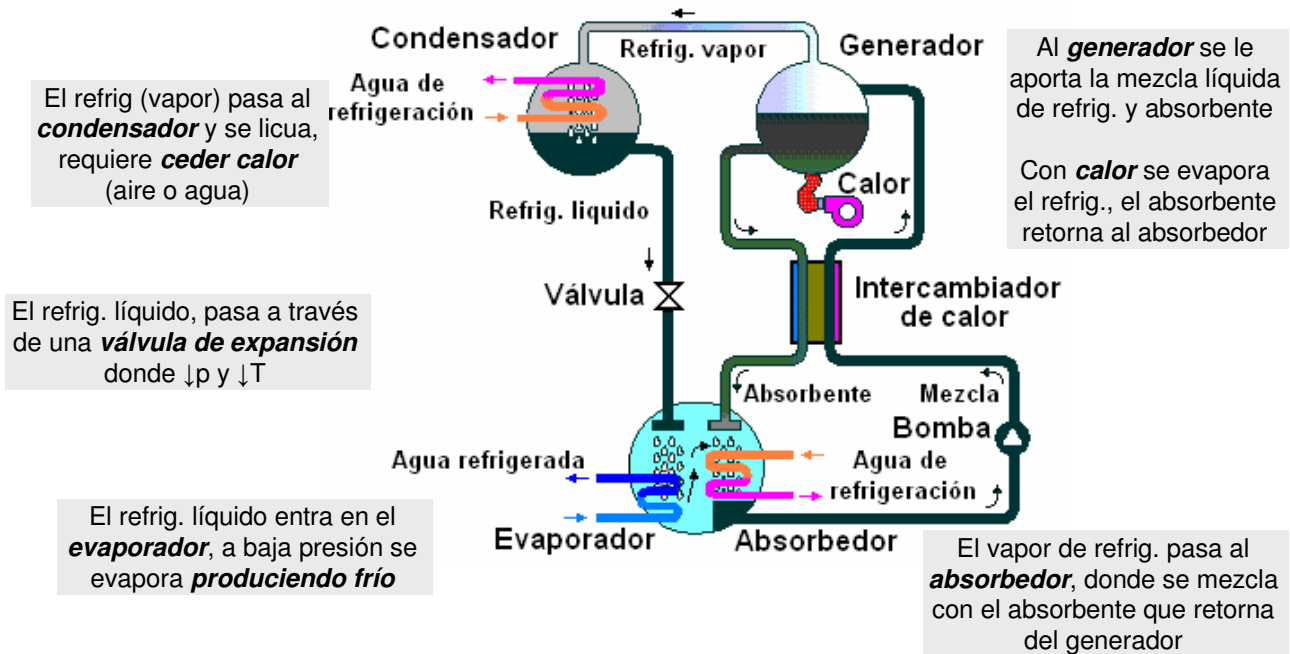
La tensión de vapor del refrigerante se ve alterada por la presencia del absorbente ( $\downarrow$  al  $\uparrow$  la cantidad de absorbente)

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

14

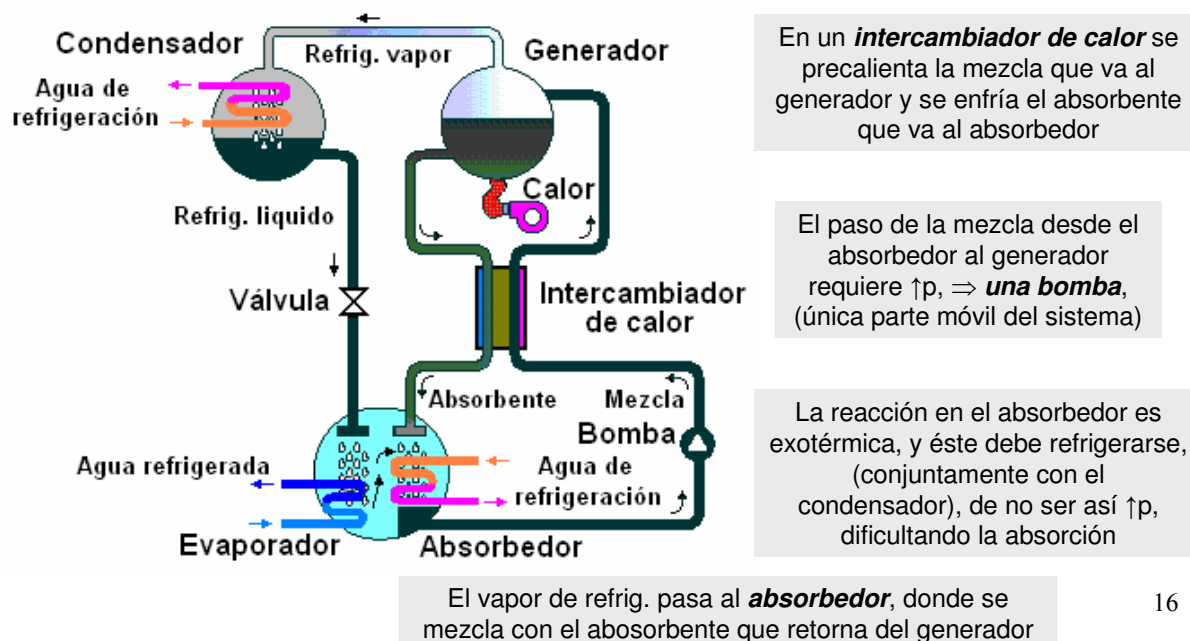
3.- Refrigeración por Absorción (II)

Una máquina de absorción de **efecto simple (I)**



3.- Refrigeración por Absorción (III)

Una máquina de absorción de **efecto simple (II)**





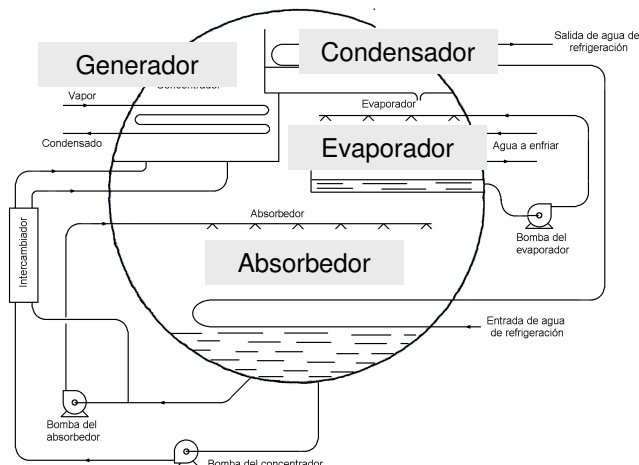
### 3.- Refrigeración por Absorción (IV)

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

En máquinas de absorción: ( $Q_{abs} + Q_{cond}$ )  $\cong$  2,6 Potencia maquina

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

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



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

17

### 3.- Refrigeración por Absorción (V)

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** ( $\text{BrLi-H}_2\text{O}$ ), en el generador  $T^a$  de  $100^\circ\text{C}$

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

El  $\text{NH}_3$  es tóxico y además ataca el cobre

18

3.- Refrigeración por Absorción (VI)

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

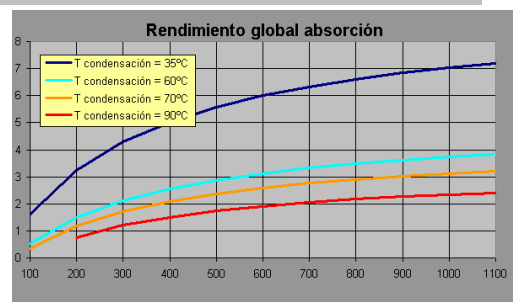
$$COP_{Ciclo\ Abs} = \frac{T_{evaporador}}{T_{condensador} - T_{evaporador}} = \frac{\text{Efecto Refrigerante}}{\text{Entrada Calor}}$$

El *COP* típico de las máquinas comerciales de LiBr-H<sub>2</sub>O, es de 0,7  
El rendimiento total es el de la producción del frío por el de la de calor

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

η↑ al ↑T en el generador

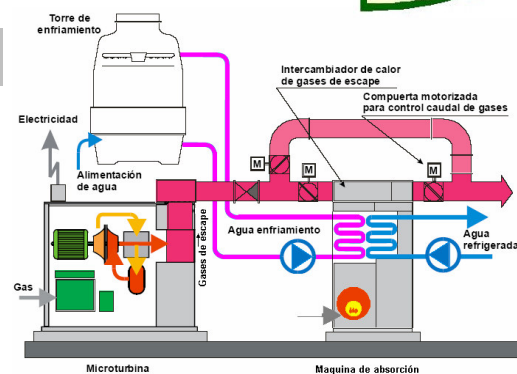
η↓ al ↑T en el condensador/absorbedor



3.- Refrigeración por Absorción (VII)

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



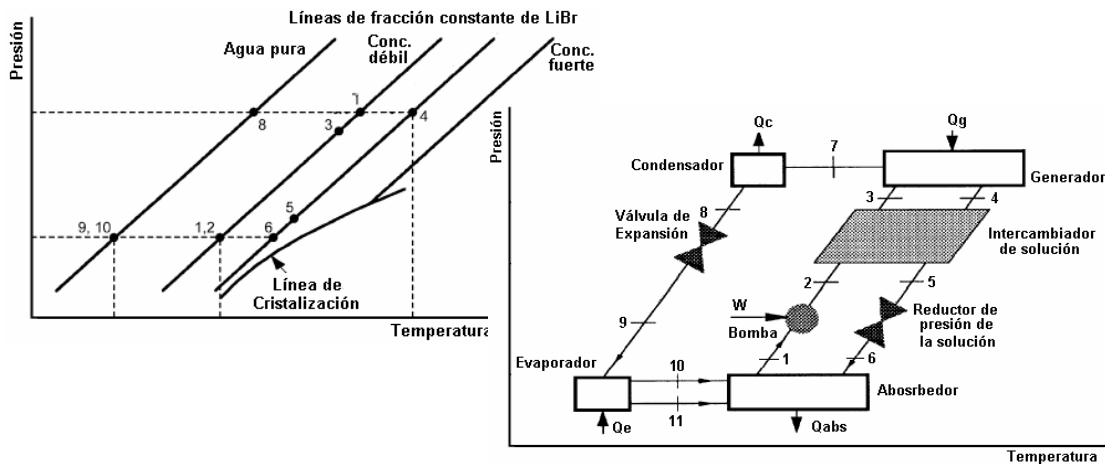
**En los sistemas solares** la disponibilidad de calor con la necesidad de refrigeración

La intermitencia del Sol hace necesario un sistema de almacenamiento térmico

No son rentables

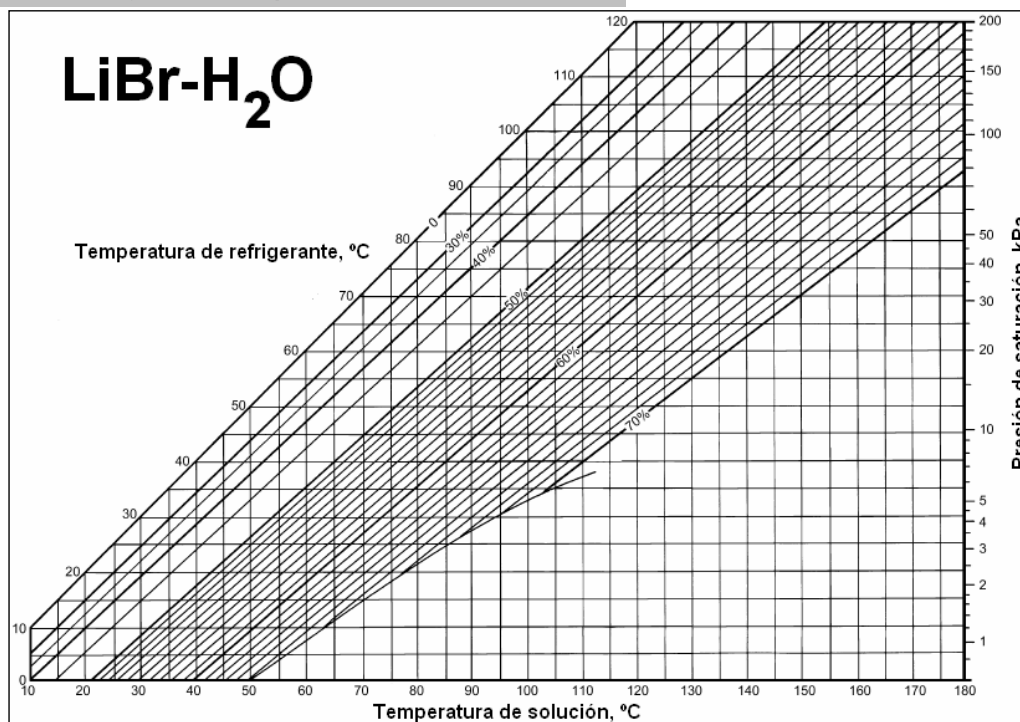
3.- Refrigeración por Absorción (VIII)

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



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

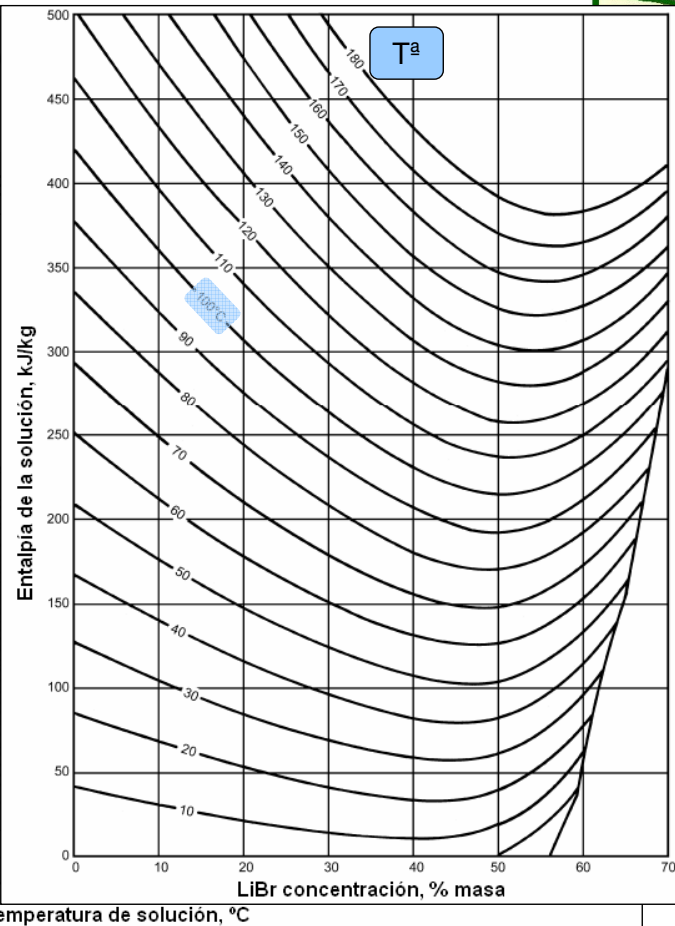
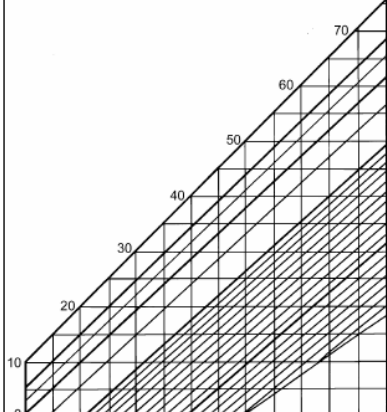
3.- Refrigeración por Absorción (IX)



3.- Refrigeración por Abs

**LiBr-H<sub>2</sub>O**

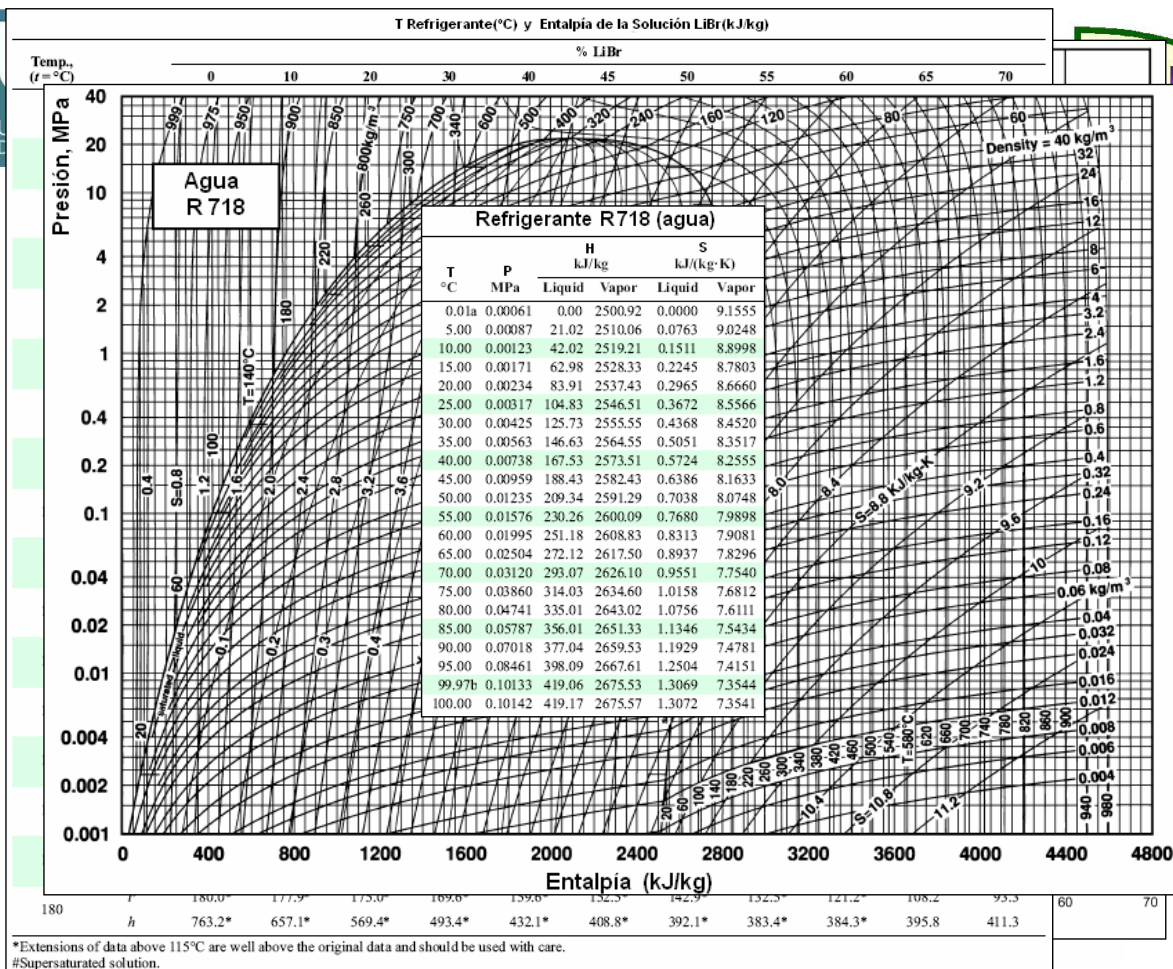
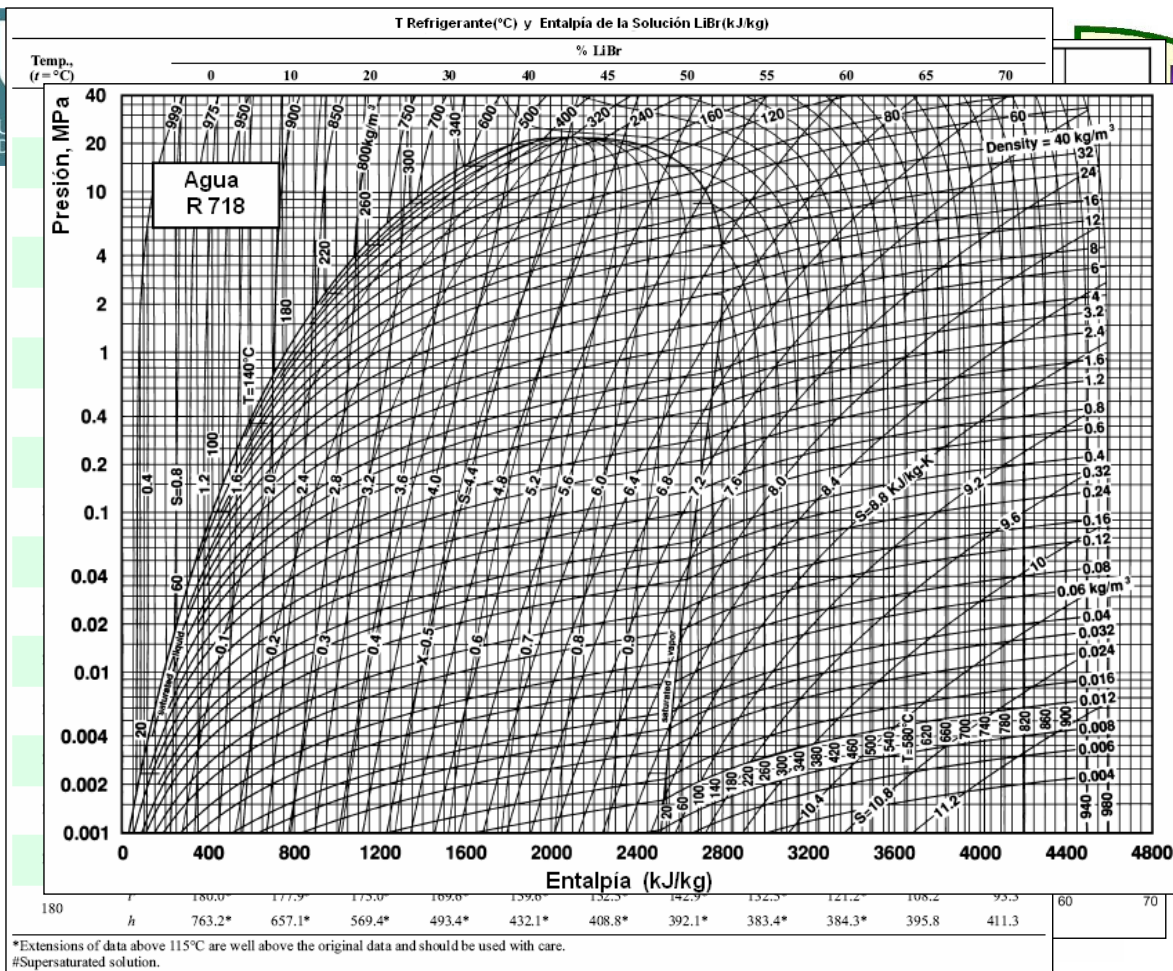
Temperatura de refrigerante, °C



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

Temp., (r = °C)	% LiBr											
	0	10	20	30	40	45	50	55	60	65	70	
20	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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	r'	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

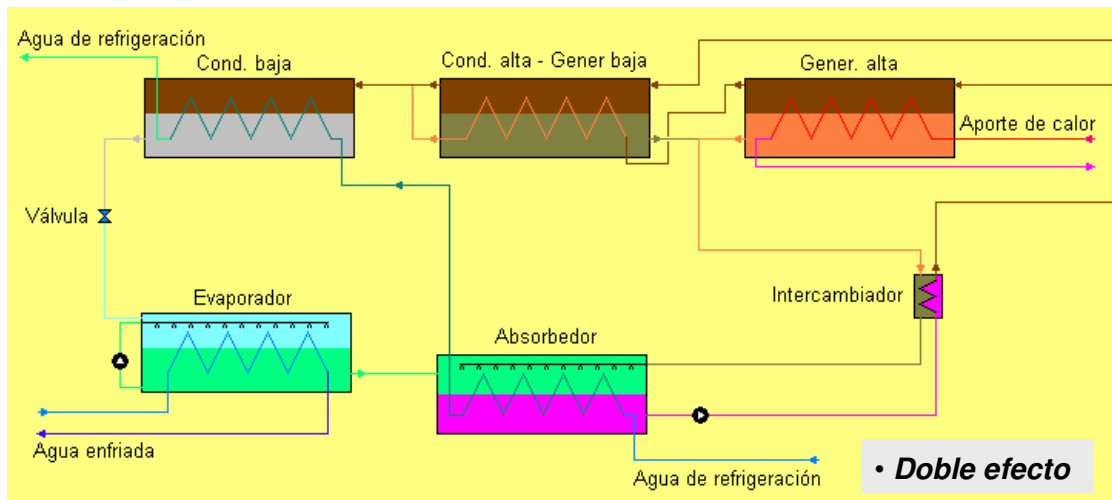
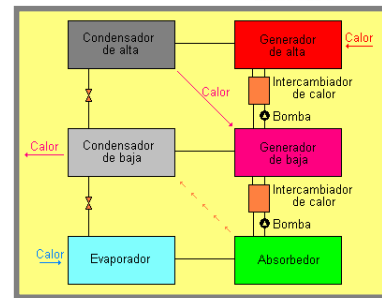
\*Extensions of data above 115°C are well above the original data and should be used with care.  
#Supersaturated solution.



3.- Refrigeración por Absorción (IX)

Otros ciclos de absorción (I)

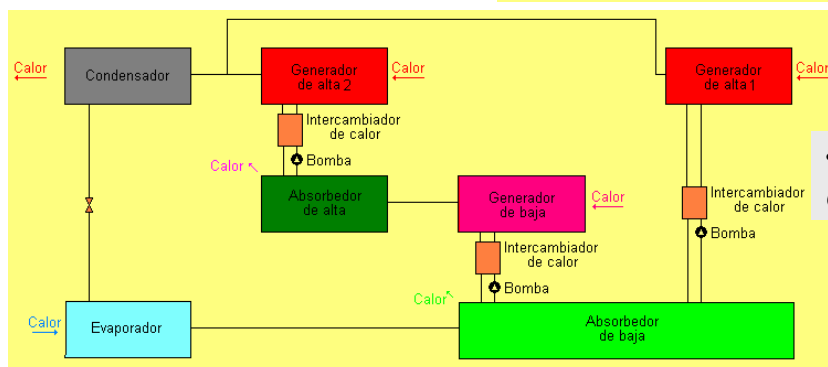
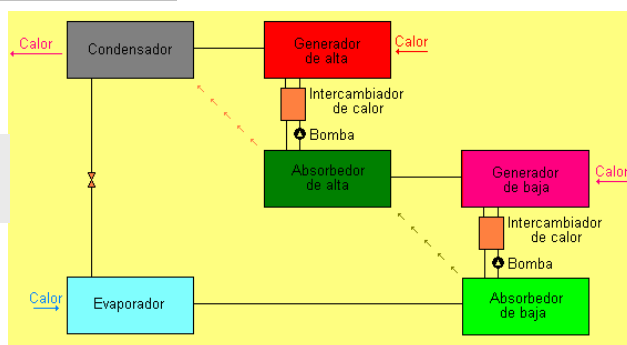
Buscan aumentar la capacidad frigorífica, el rendimiento, o poder realizar el suministro térmico a temperaturas reducidas



3.- Refrigeración por Absorción (X)

Otros ciclos de absorción (II)

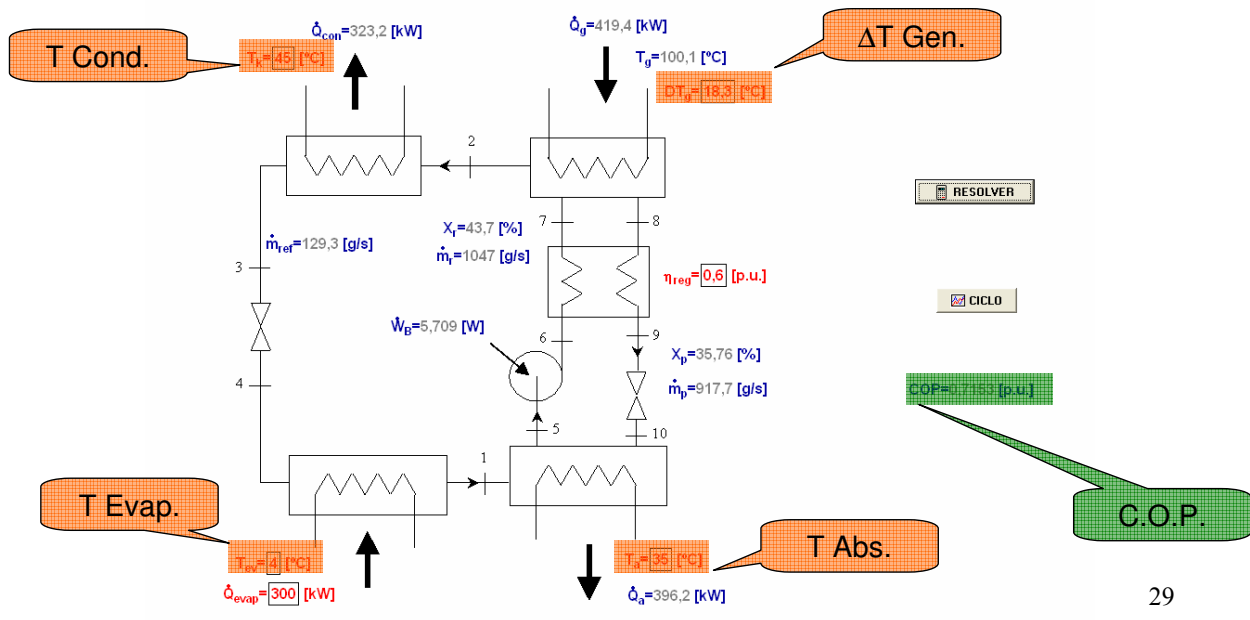
• Medio efecto con dos escalones



• Efecto simple en dos escalones

3.- Refrigeración por Absorción (XI)

EES Distributable C:\Documents and Settings\reuedoc.UNICAN\wis documentos\MANUALES Y PROGRAMAS\Prog-Manuales\Absorcion\H2O-LiBr.EXE ...



29

4.- Refrigeración Evaporativa (I)

Es un proceso de **transferencia de calor y masa** basado en la conversión del calor sensible en latente; el aire no saturado es enfriado por la exposición al agua más fría en condiciones de aislamiento térmico, a entalpía cte, llegando a la saturación adiabática

La **clasificación de los sistemas evaporativos** :

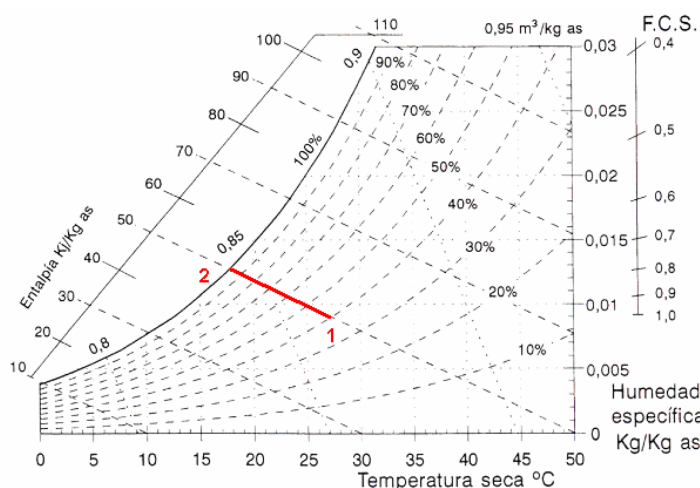
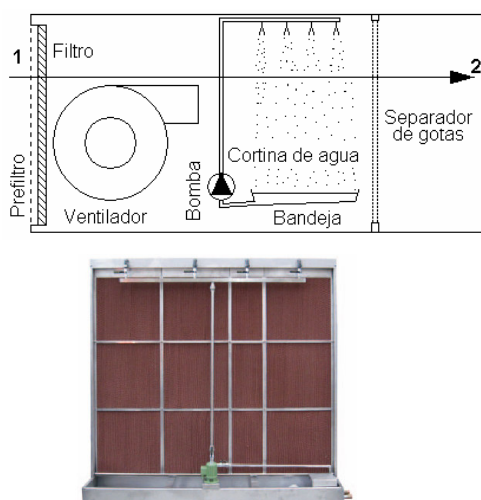
- **Directos**: el agua se evapora en la corriente de aire que se desea enfriar, aumentando la humedad
- **Indirectos**: la evaporación se efectúa en una corriente secundaria de aire, la cual intercambia calor sensible con la corriente primaria, que de este modo no recibe ninguna humedad
- **Mixtos**: mezcla de los dos anteriores

30

4.- Refrigeración Evaporativa (II)

- **Directos:** humectación, un ventilador, filtros, un depósito inferior y una carcasa

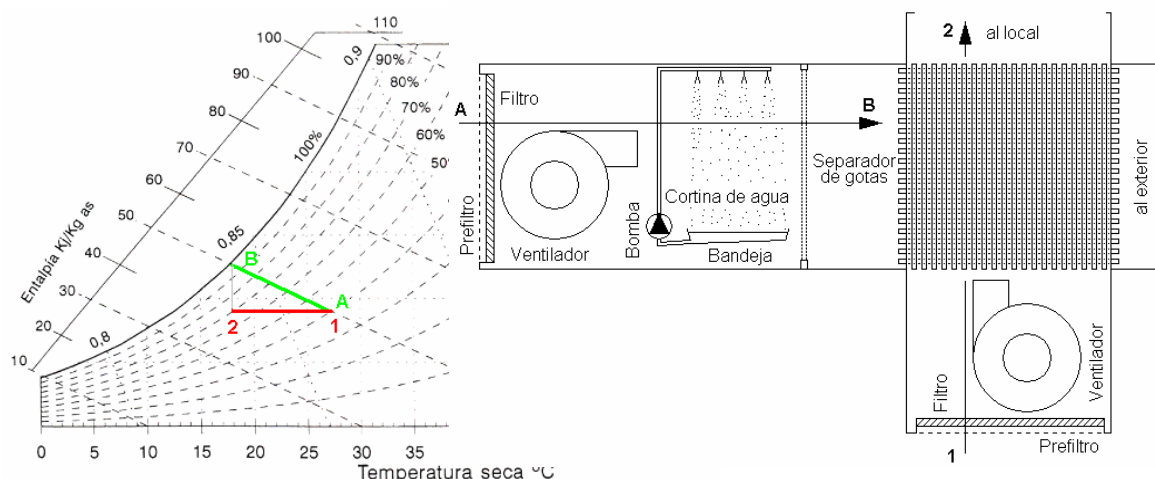
El agua se recircula y su temperatura se aproxima a la de bulbo húmedo del aire enfriado. Son económicos y eficaces ( $\epsilon_s \approx 80\%$ , un aumento de la velocidad aumenta el efecto refrigerador). Presenta riesgo de la legionela



4.- Refrigeración Evaporativa (III)

• **Indirectos:** intercambiador de calor, elementos de atomización y recirculación de agua, toma de aire exterior con sus filtros, ventilador y una carcasa

Puede utilizar como aire primario el de retorno o el exterior. No aumentan la humedad ambiente y además evita la legionela en el edificio

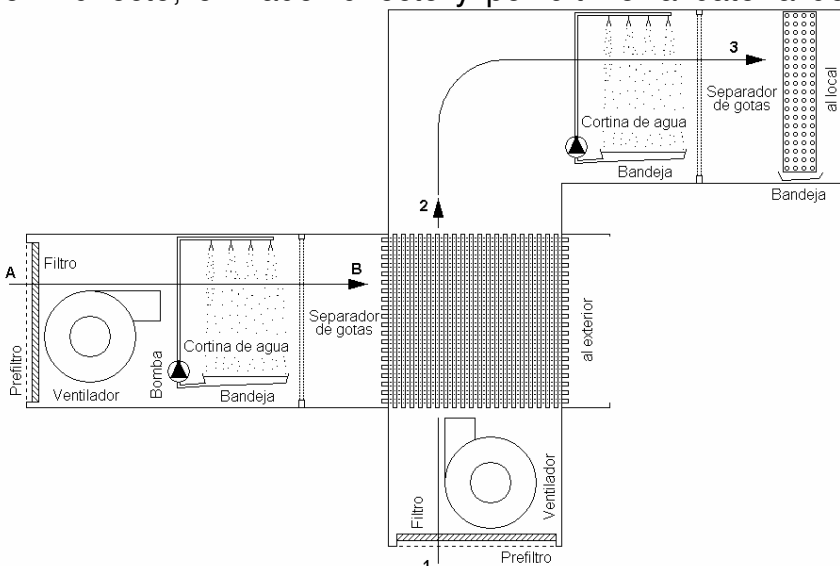
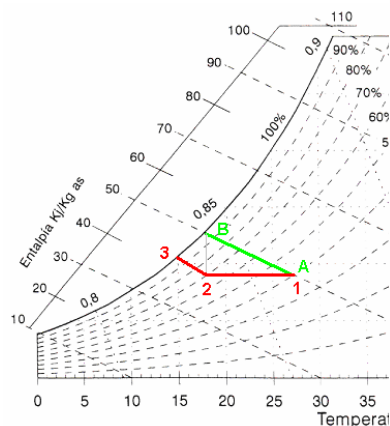




**4.- Refrigeración Evaporativa (IV)**

- **Mixtos:** conectan en serie un evaporador indirecto y otro directo; puede disponerse de una batería de expansión directa de apoyo a las dos etapas

La instalación es: enfriador indirecto, enfriador directo y por último la batería de expansión directa



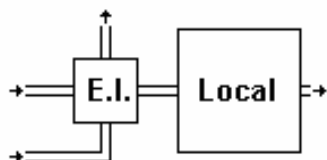
**4.- Refrigeración Evaporativa (V)**

**Recuperan energía** si utilizan como **aire secundario** el de retorno de los locales

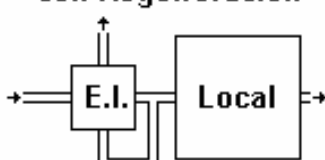
Los sistemas evaporativos pueden operar según en cuatro **ciclos**:

- **Evaporativo directo**, recupera calor si se emplea aire de recirculación
- **Evap. indirecto convencional**, aire exterior para primario y secundario
- **Evap. indirecto Regenerativo**; parte del aire primario es utilizado como secundario, lo que aumenta el efecto de refrigeración
- **Eva. indirecto con Recuperación**; toma aire de retorno de la instalación como aire secundario

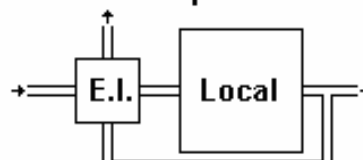
**Evaporación Indirecta**



**Evaporación Indirecta con Regeneración**



**Evaporación Indirecta con Recuperación**



**4.- Refrigeración Evaporativa (VI)**

La **instalación de los equipos** ha de ser en el exterior de los edificios, el aire debe ser filtrado para posteriormente ser enfriado e impulsado al local

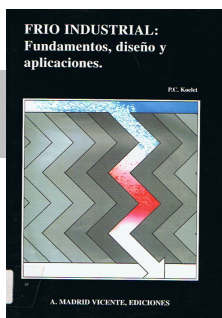
Para la mayor eficacia de la ventilación, en la pared opuesta al equipo deben practicarse amplias bocas de salida. Si se requieren conductos para la aspiración, su boca también debe ser amplia

Estos equipos trabajan con aire primario de renovación (20 y 40 renov/hora), lo que mejora la calidad del aire interior (no suelen trabajar nunca con aire de recirculación, excepto para como aire secundario)

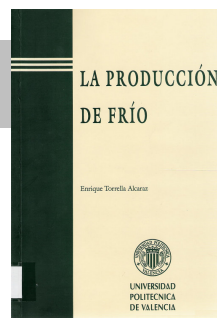
Para el **cálculo** hay que tener en cuenta la altura de instalación de los aparatos, ya que se climatiza únicamente desde estos hasta el suelo (envían aire frío y denso)

Estos sistemas, tienen un coste menor que los de compresión, presentan un consumo energético mucho menor y un mantenimiento más fácil

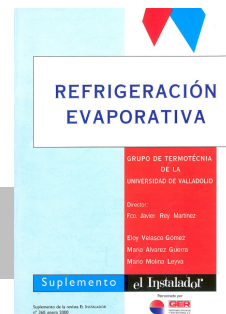
**Bibliografía del Tema**



**Frío Industrial**  
*P. C. Koelet*



**La Producción de Frío**  
*E. Torrella*



**Refrigeración Evaporativa**  
*G. Termotecnia, U. Valladolid*



**Climatización con Gas Natural**  
**Sistemas de Absorción y Compresión**  
*Gas Natural*

**Revistas nacionales:**

- El Instalador
- Montajes e Instalaciones

