

T1.- Producción de Frío

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
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

T1.- Producción de Frío

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

1.- Introducción (I)

Para transportar calor desde un foco a baja temperatura a otro a alta temperatura es necesario aportar energía

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

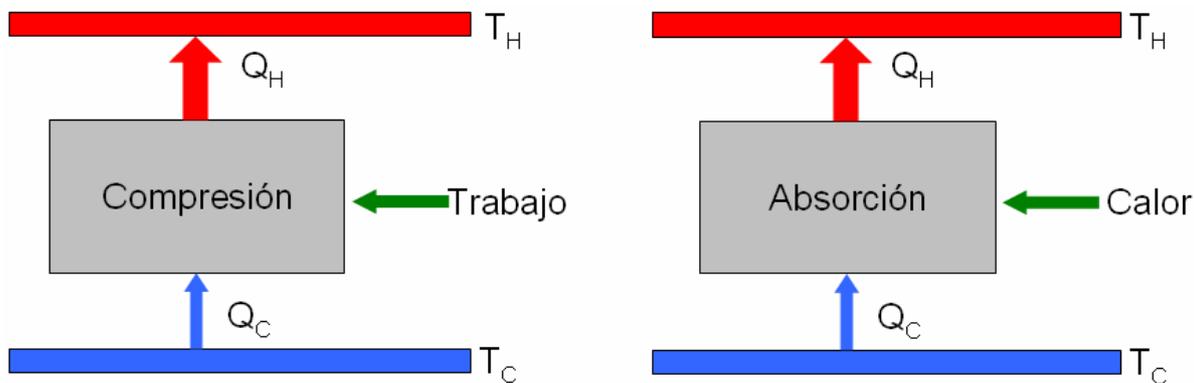
Los ciclos evitan la reposición continua del refrigerante

Los métodos empleados para la producción de frío con aplicaciones industriales se basan en dos sistemas:

- el ciclo de compresión del vapor
- el ciclo de absorción

2

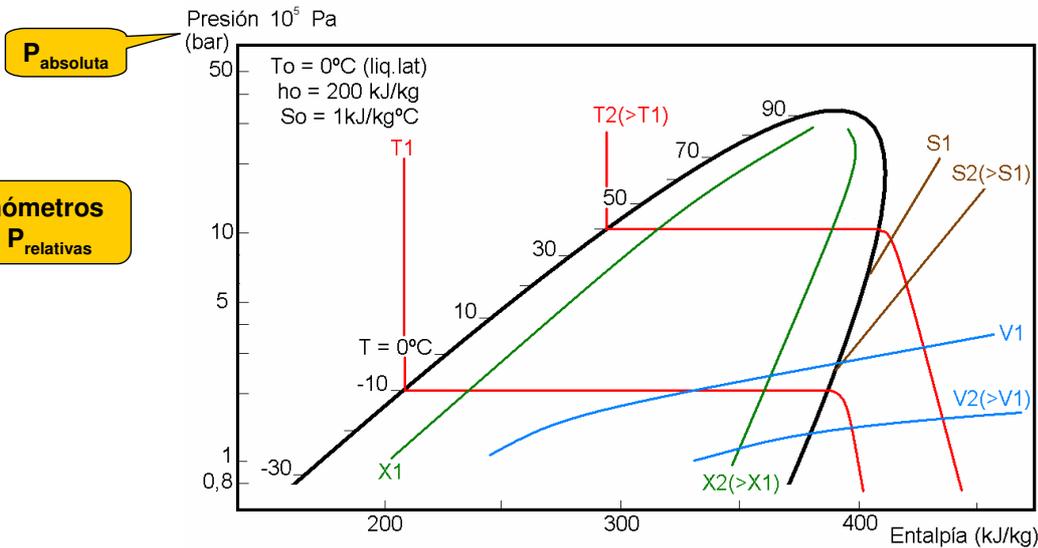
1.- Introducción (II)



**No se hace frío,
se retira calor**

2.- Refrigeración por Compresión (I)

Diagrama característico de un refrigerante

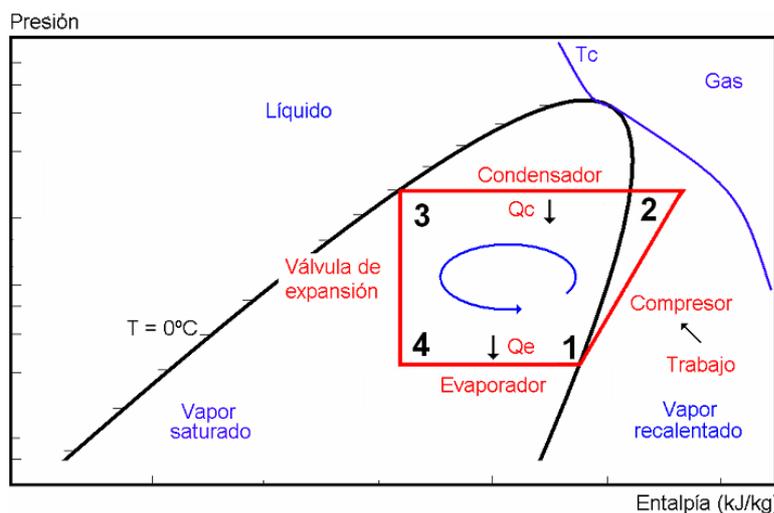


**Los manómetros
marcan P
relativas**

2.- Refrigeración por Compresión (II)

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

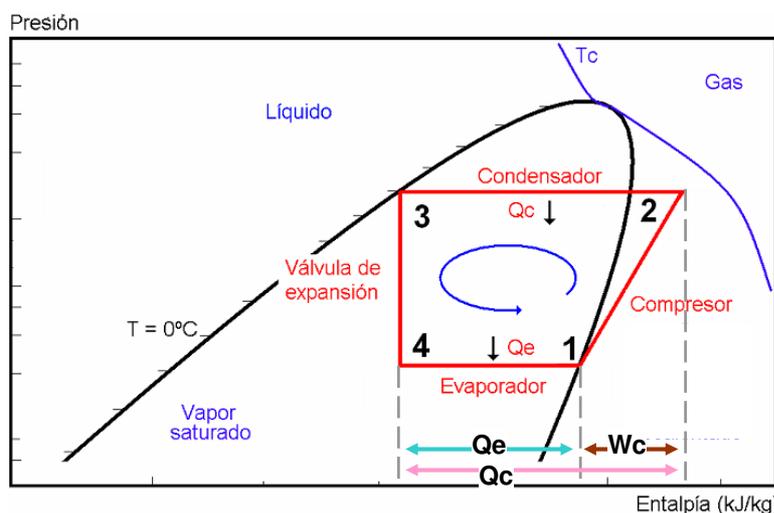
- Compresión
- Condensación
- Expansión
- Evaporación



2.- Refrigeración por Compresión (II)

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

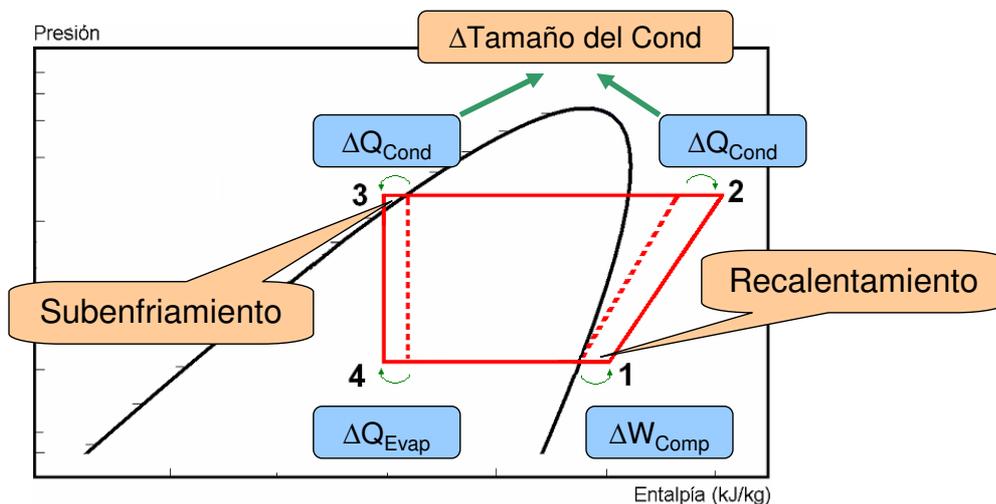
- Compresión
- Condensación
- Expansión
- Evaporación



2.- Refrigeración por Compresión (III)

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

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

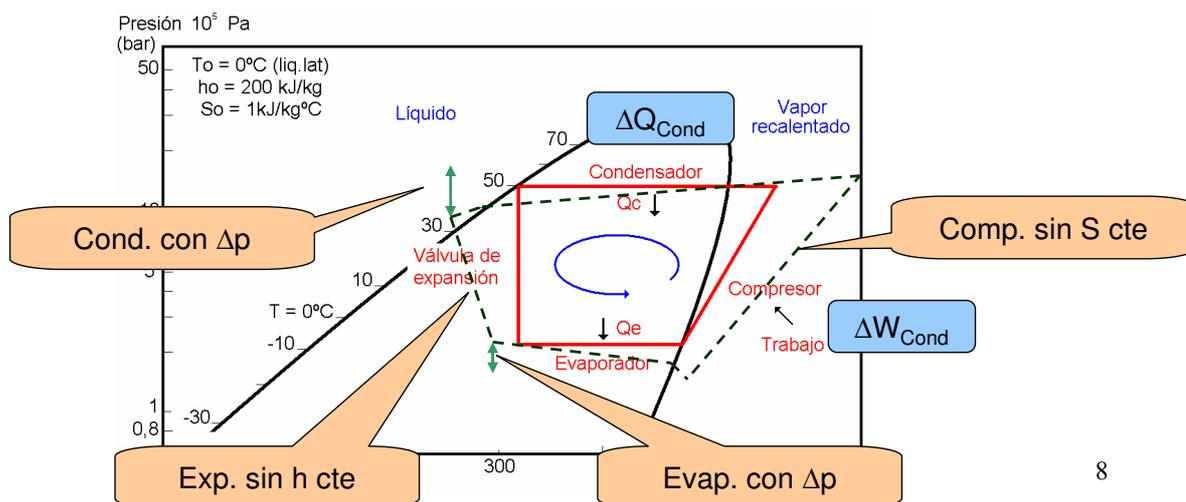


7

2.- Refrigeración por Compresión (IV)

Ciclo real:

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



8

2.- Refrigeración por Compresión (V)

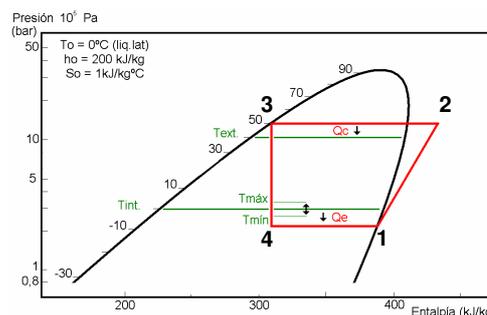


9

2.- Refrigeración por compresión (VI)

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

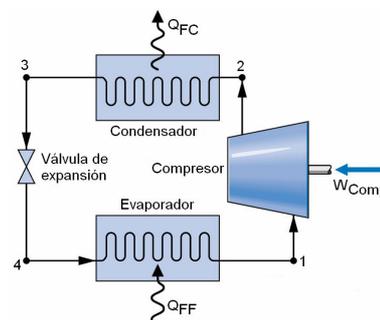
- En el evaporador: la T de la cámara > T del refrigerante
- En el condensador: la T ambiente < T del refrigerante



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

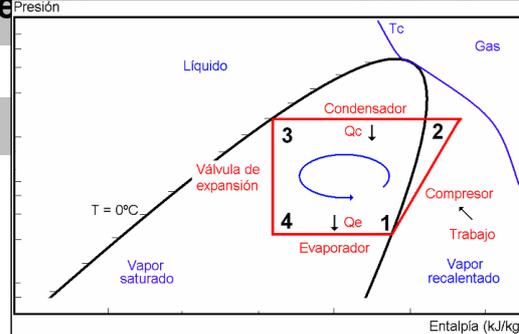
- El calor extraído de la cámara es: $(h_1 - h_4)$ (kJ/kg)
- El calor cedido al exterior es: $(h_2 - h_3)$ (kJ/kg)
- El trabajo útil del compresor es: $(h_2 - h_1)$ (kJ/kg)

estos valores se obtienen del diagrama, ó de las tablas

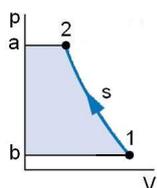


2.- Refrigeración por compresión (VII)

Análisis Termodinámico (I):



• **Etapa de compresión (1-2)**



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

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

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

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

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

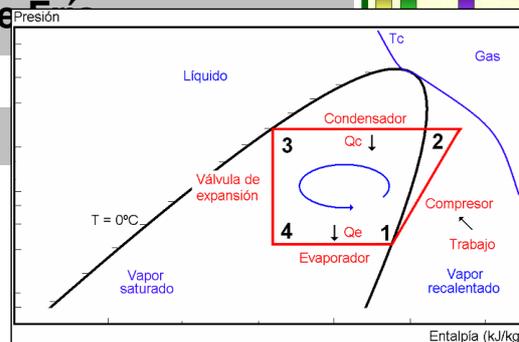
• **Etapa de condensación (2-3)**

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

Valores por kg de masa

2.- Refrigeración por compresión (VIII)

Análisis Termodinámico (II):



• **Etapa de expansión (3-4)**

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

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

• **Etapa de evaporación (4-1)**

$$\text{[P.P.T.]} \quad q = \int_4^1 du + \int_4^1 dw = \int_4^1 du + \int_4^1 p dv = \left. p_4 = p_1 \right| = u_1 - u_4 + p(v_1 - v_4) = h_1 - h_4$$

2.- Refrigeración por compresión (IX)

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

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

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

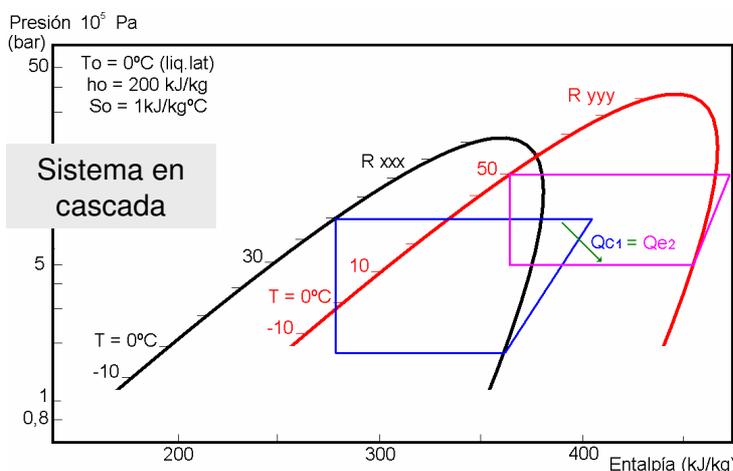
En aire acondicionado puede ser superior a 13

$1.000 \text{ BTU} \approx 293 \text{ Wh}$

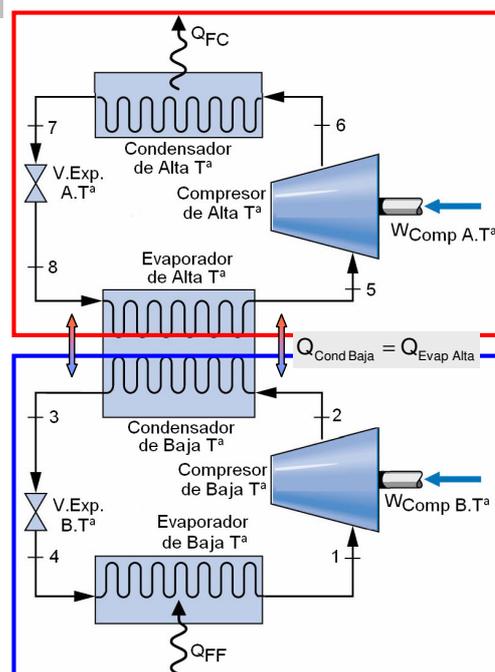
SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)

El EER durante un periodo de tiempo

2.- Refrigeración por compresión (X)

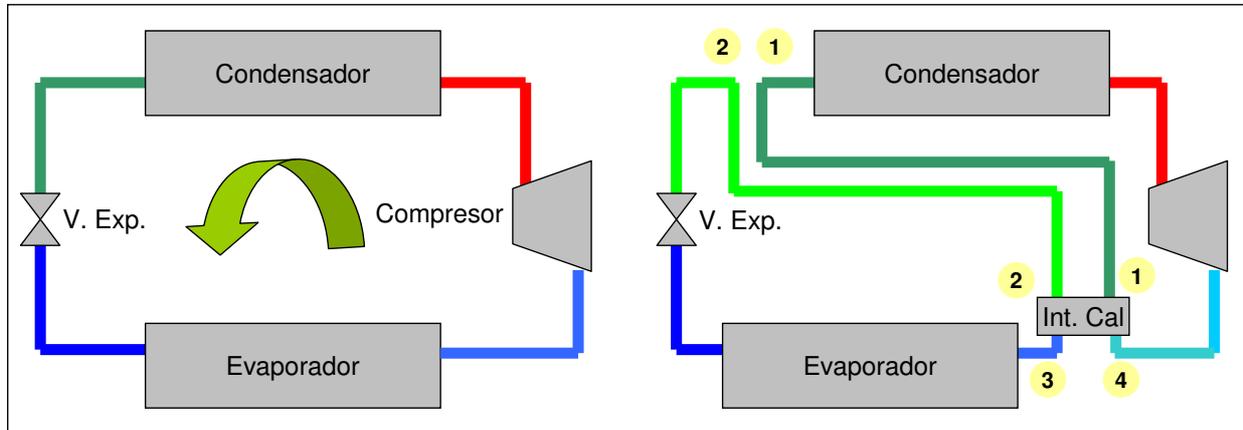


$Q_{\text{Cond Baja}} = Q_{\text{Evap Alta}}$
 $m_{\text{Baja}} \Delta h_{\text{Cond Baja}} = m_{\text{Alta}} \Delta h_{\text{Evap Alta}}$
 $m_{\text{Baja}} (h_2 - h_3) = m_{\text{Alta}} (h_5 - h_8)$



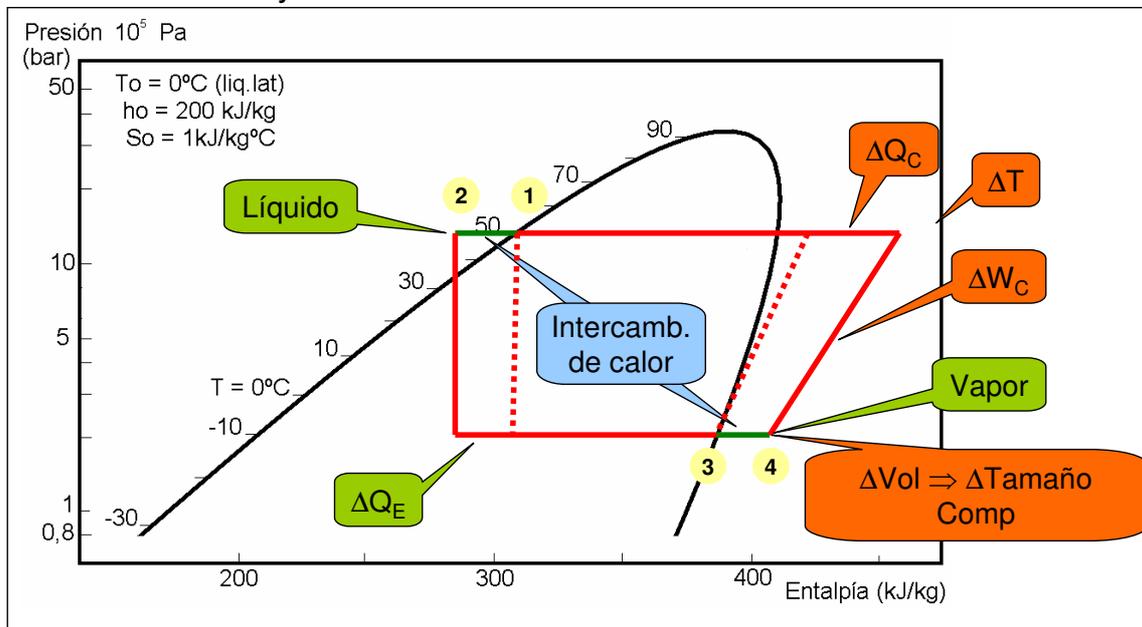
2.- Refrigeración por Compresión (XI)

Un **intercambiador de calor auxiliar** puede realizar simultáneamente el subenfriamiento y el recalentamiento



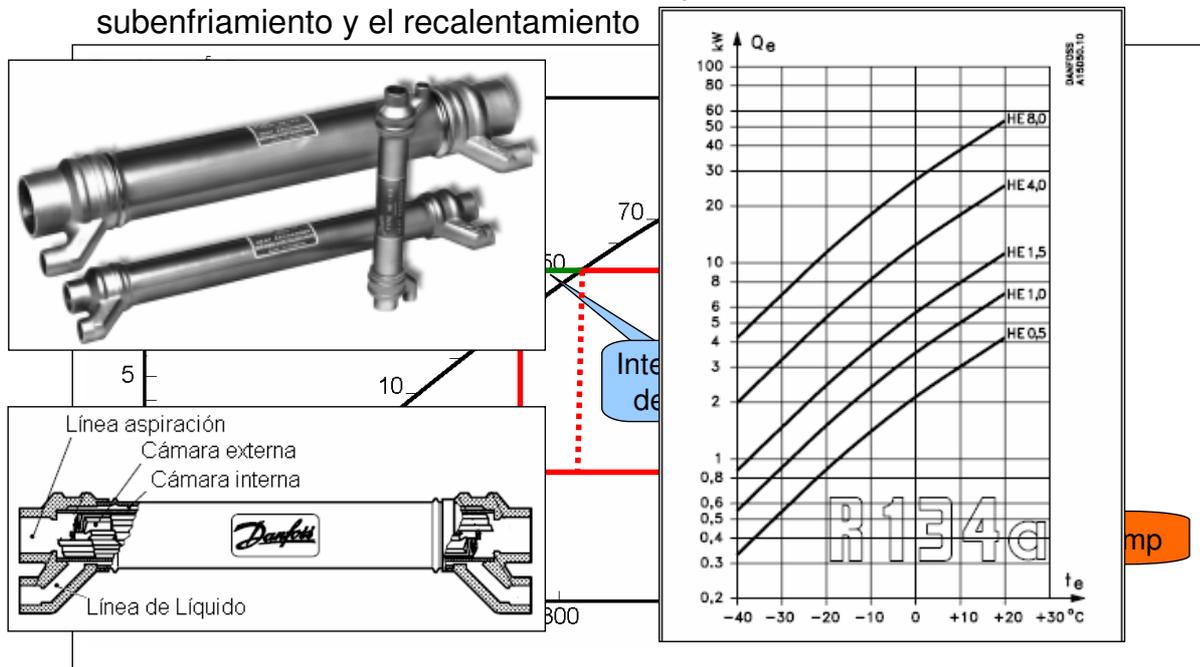
2.- Refrigeración por Compresión (XII)

Un **intercambiador de calor auxiliar** puede realizar simultáneamente el subenfriamiento y el recalentamiento



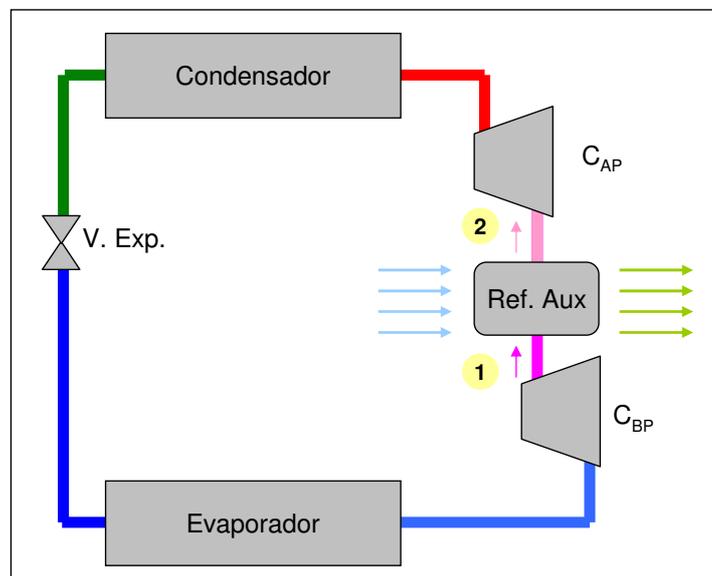
2.- Refrigeración por Compresión (XII)

Un **intercambiador de calor auxiliar** puede realizar simultáneamente el subenfriamiento y el recalentamiento



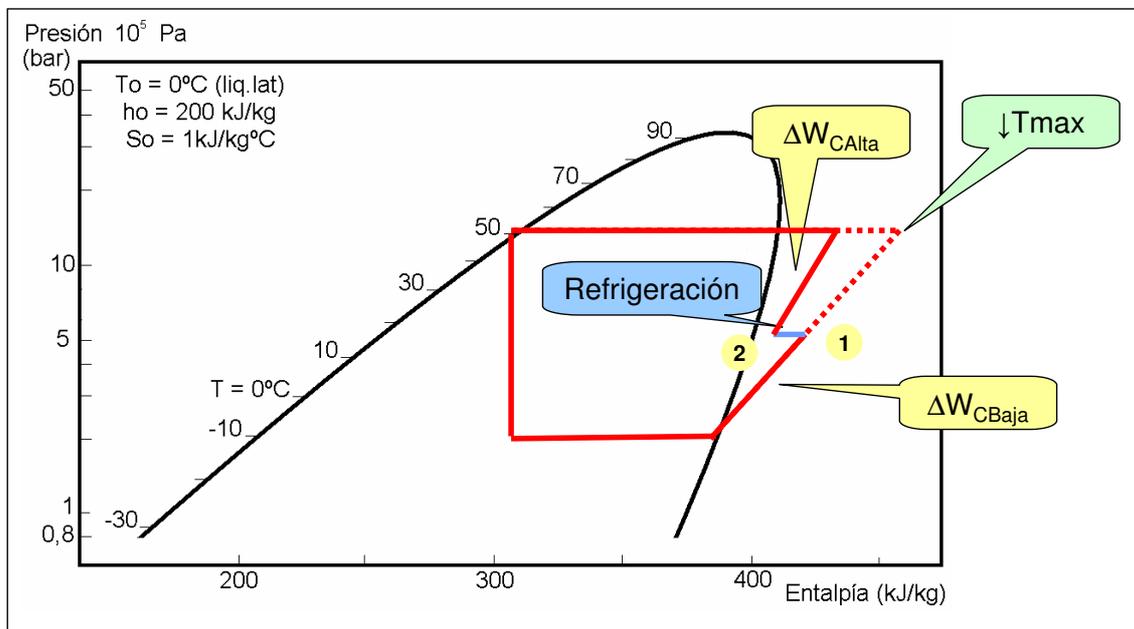
2.- Refrigeración por Compresión (XIII)

Dos etapas de compresión con refrigeración intermedia



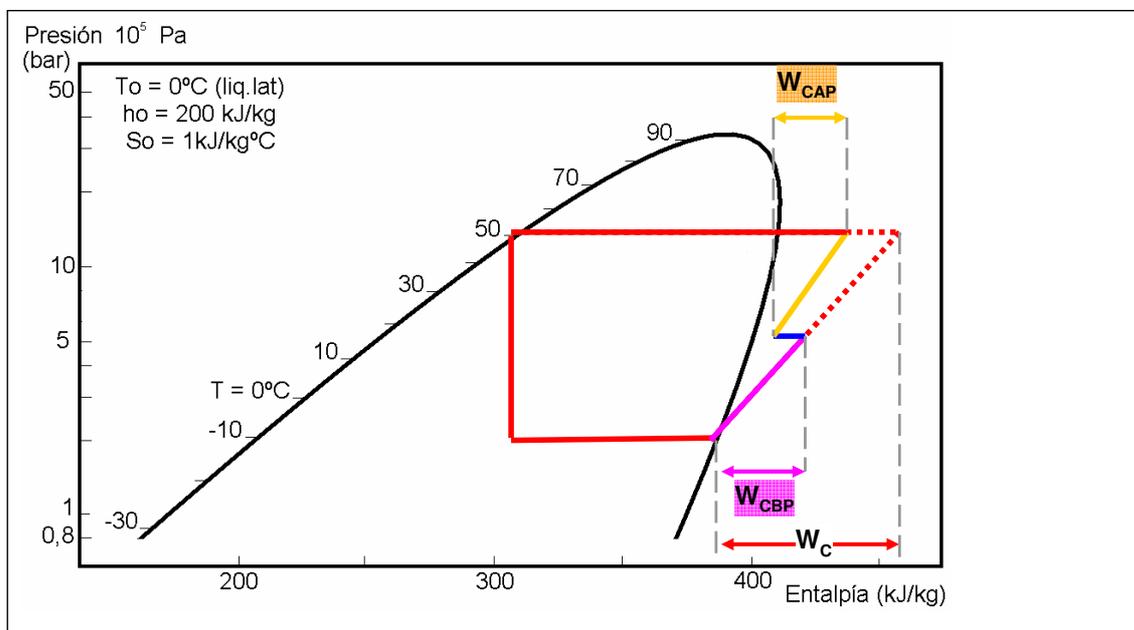
2.- Refrigeración por Compresión (XIII)

Dos etapas de compresión con refrigeración intermedia



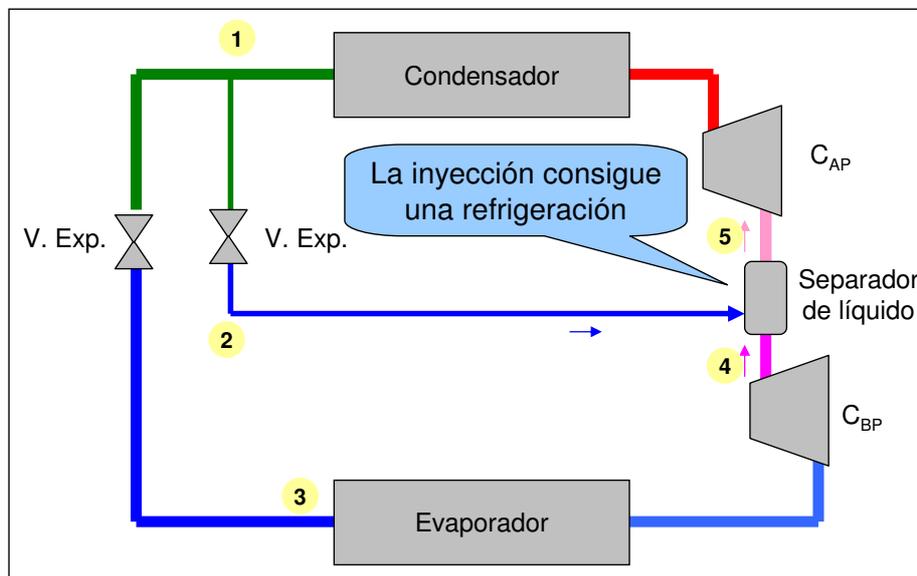
2.- Refrigeración por Compresión (XIII)

Dos etapas de compresión con refrigeración intermedia



2.- Refrigeración por Compresión (XIV)

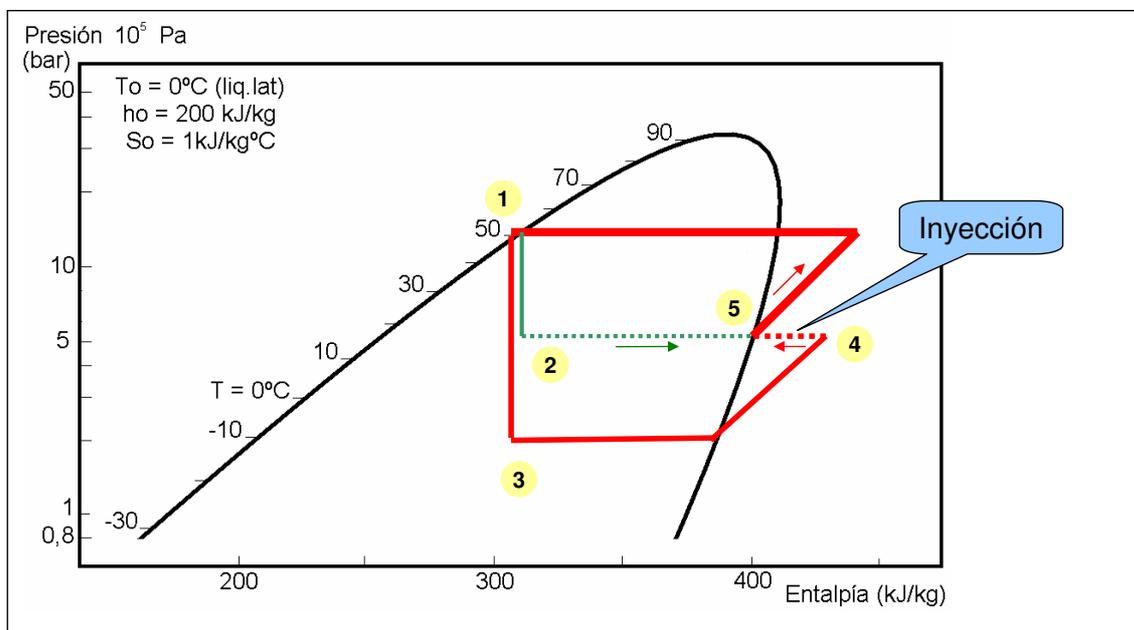
Dos etapas de compresión con inyección de refrigeración de líquido



21

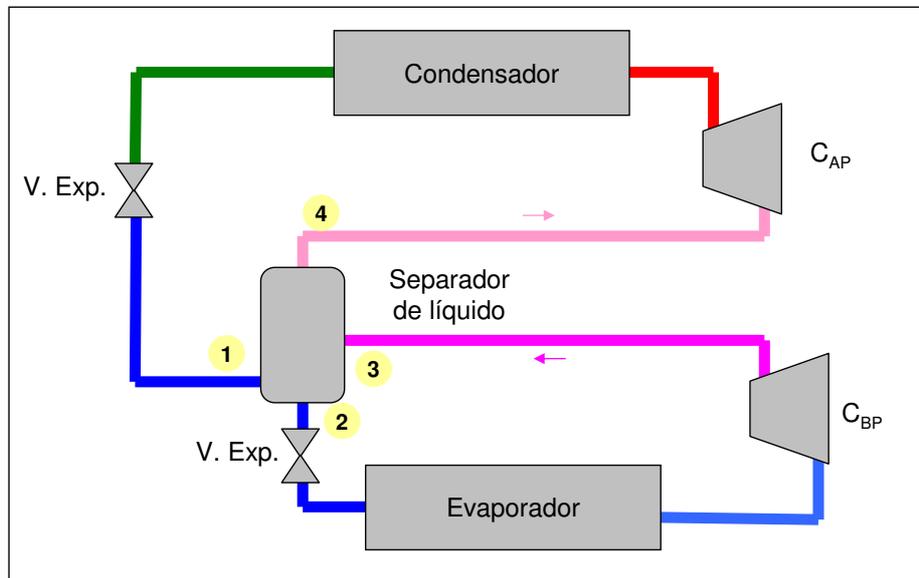
2.- Refrigeración por Compresión (XIV)

Dos etapas de compresión con inyección de refrigeración de líquido



2.- Refrigeración por Compresión (XV)

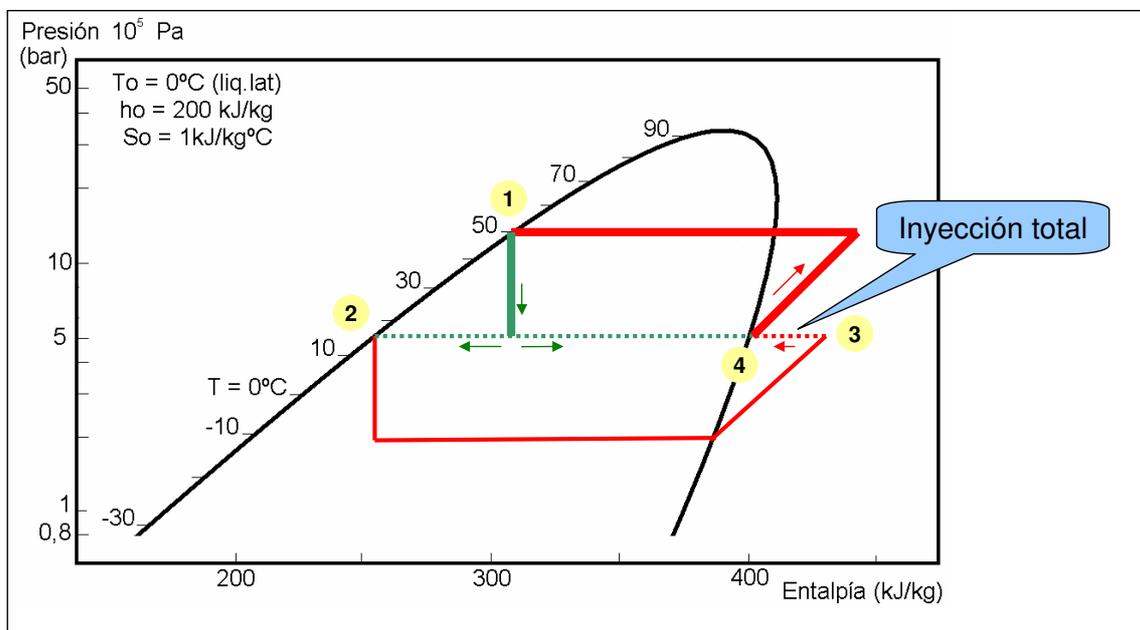
Dos etapas de compresión con inyección total de refrigerante líquido



23

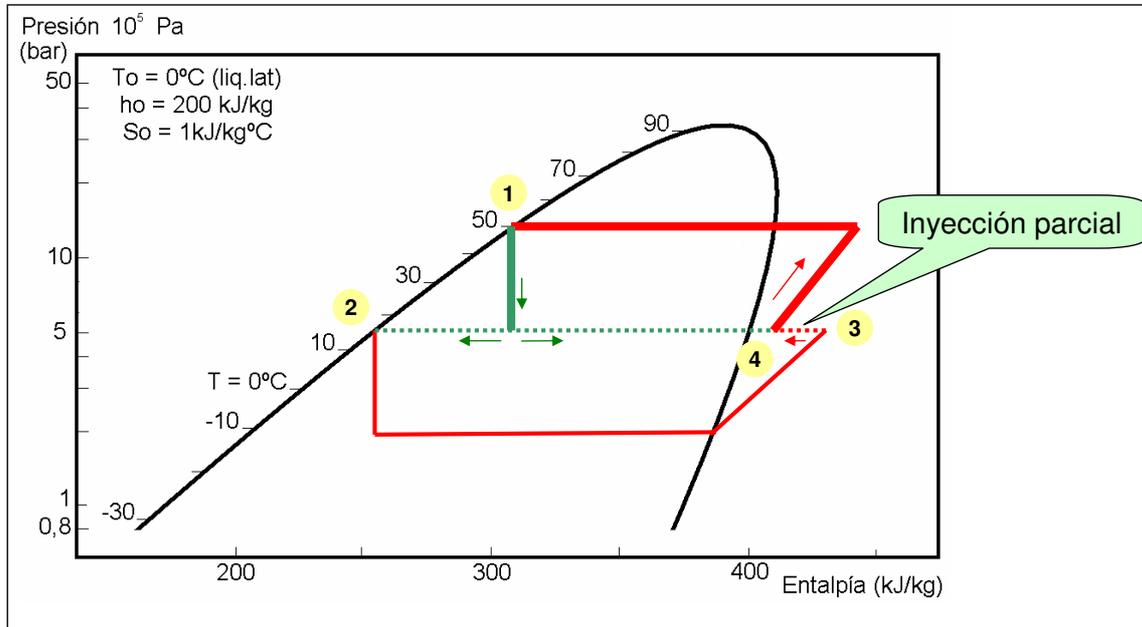
2.- Refrigeración por Compresión (XV)

Dos etapas de compresión con inyección de refrigeración de líquido



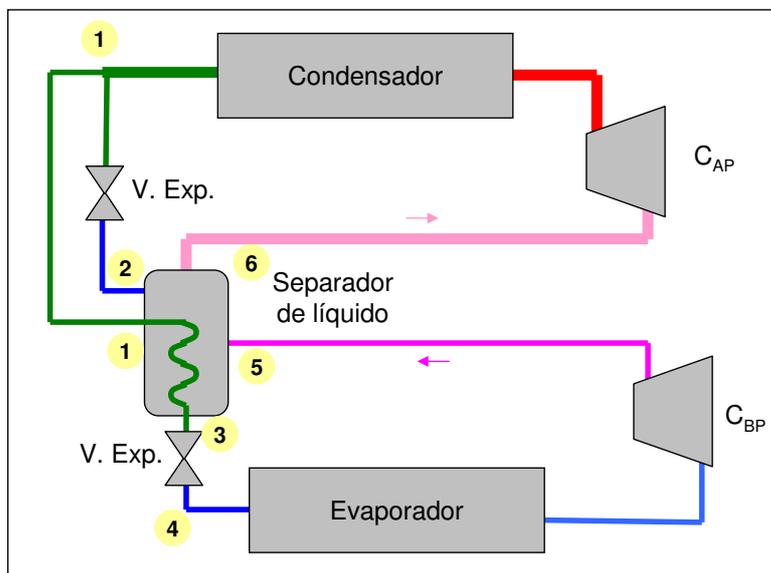
2.- Refrigeración por Compresión (XV)

Dos etapas de compresión con inyección de refrigeración de líquido



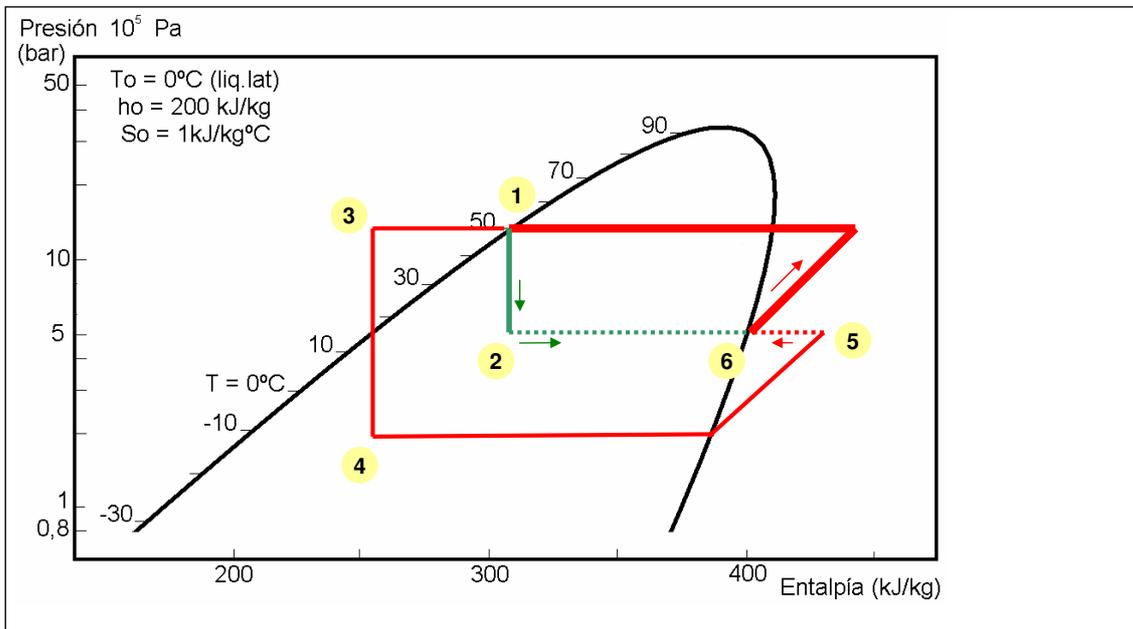
2.- Refrigeración por Compresión (XVI)

Doble compresión con subenfriamiento



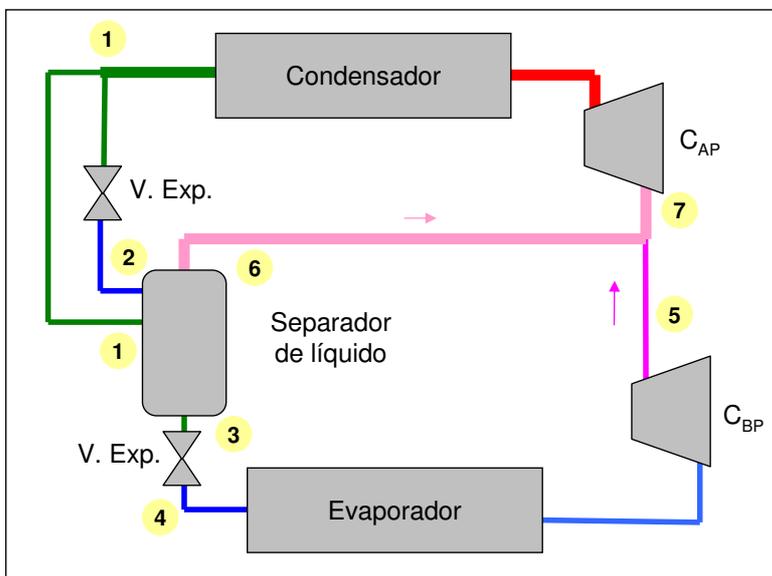
2.- Refrigeración por Compresión (XVI)

Doble compresión con subenfriamiento



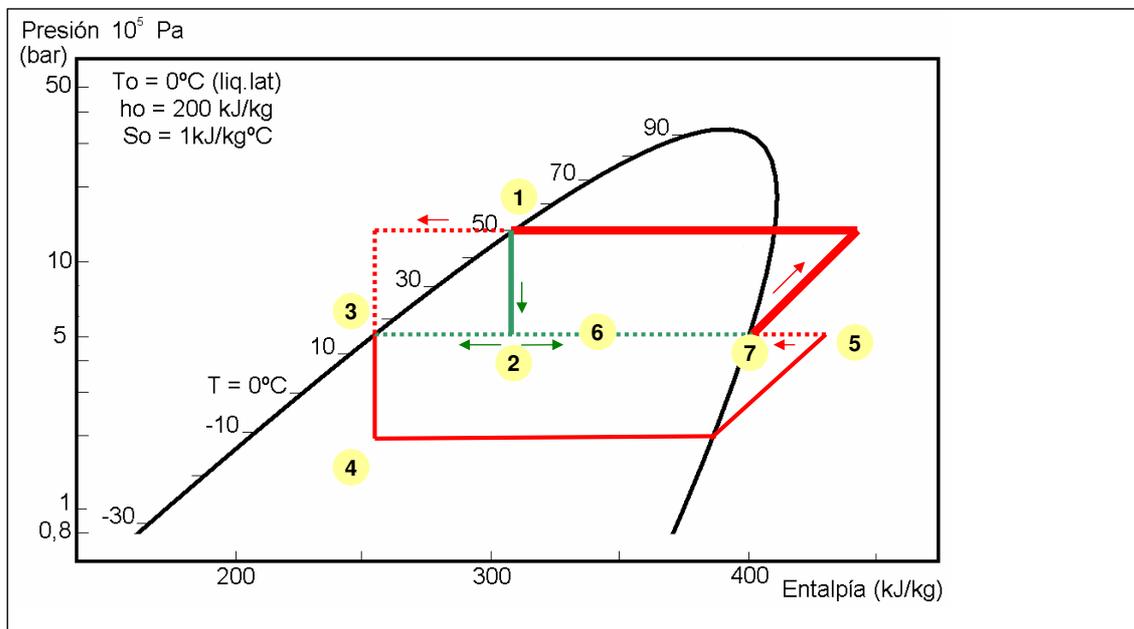
2.- Refrigeración por Compresión (XVII)

Doble compresión con subenfriamiento



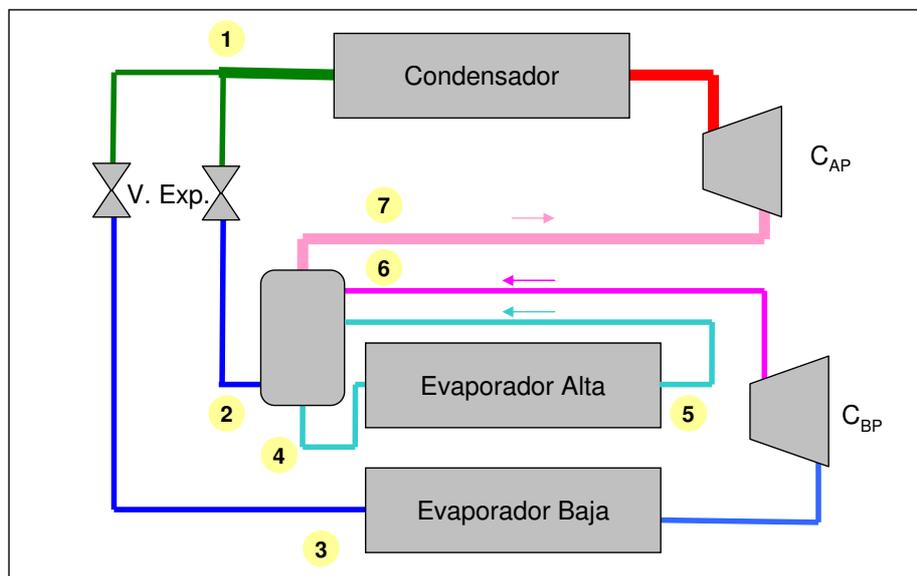
2.- Refrigeración por Compresión (XVII)

Doble compresión con subenfriamiento



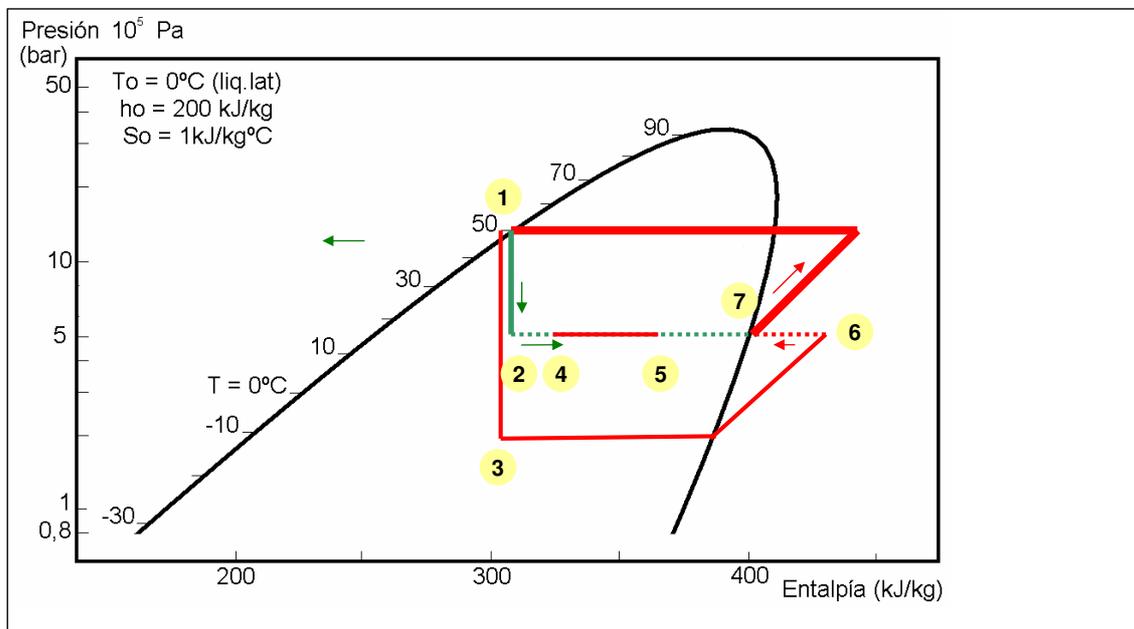
2.- Refrigeración por Compresión (XVIII)

Doble evaporación



2.- Refrigeración por Compresión (XVIII)

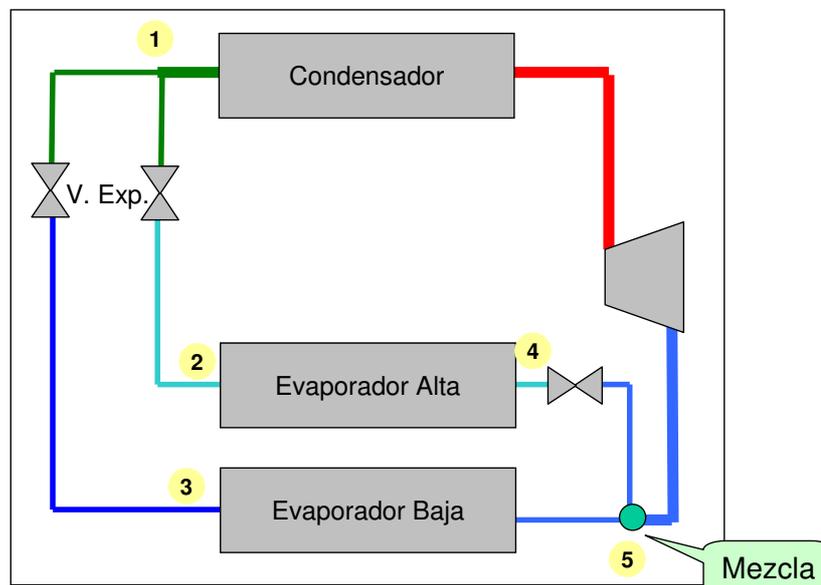
Doble evaporación



2.- Refrigeración por Compresión (XIX)

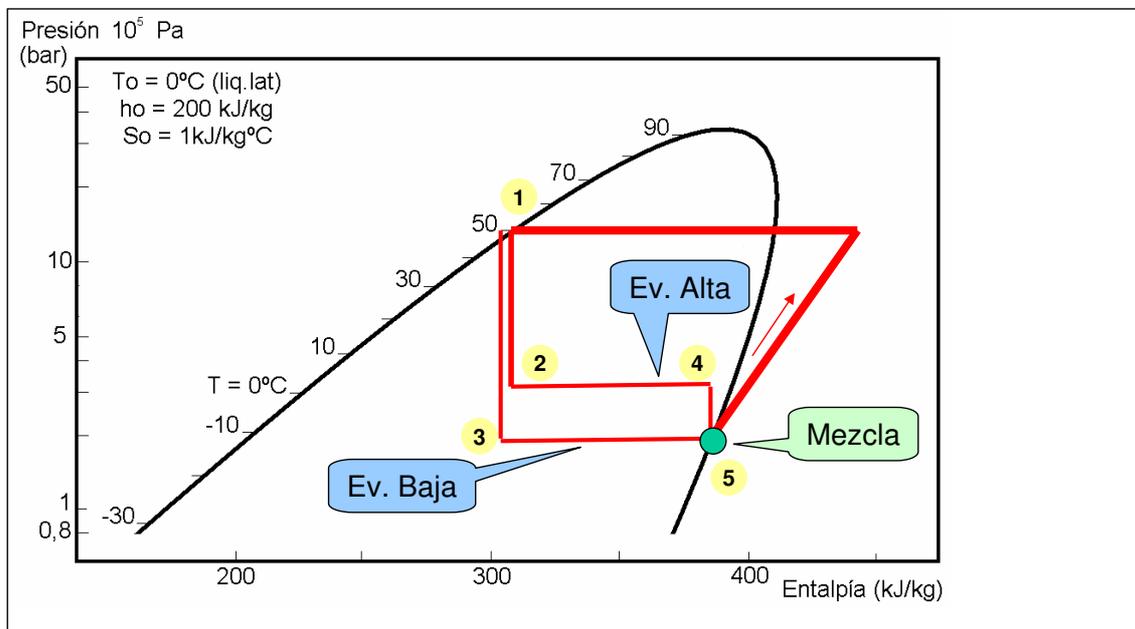
Ciclo Simple con Dos Evaporadores (I)

Toda la superficie del condensador disipa calor siempre
 $\uparrow \eta$ cuando una sola cámara ON



2.- Refrigeración por Compresión (XIX)

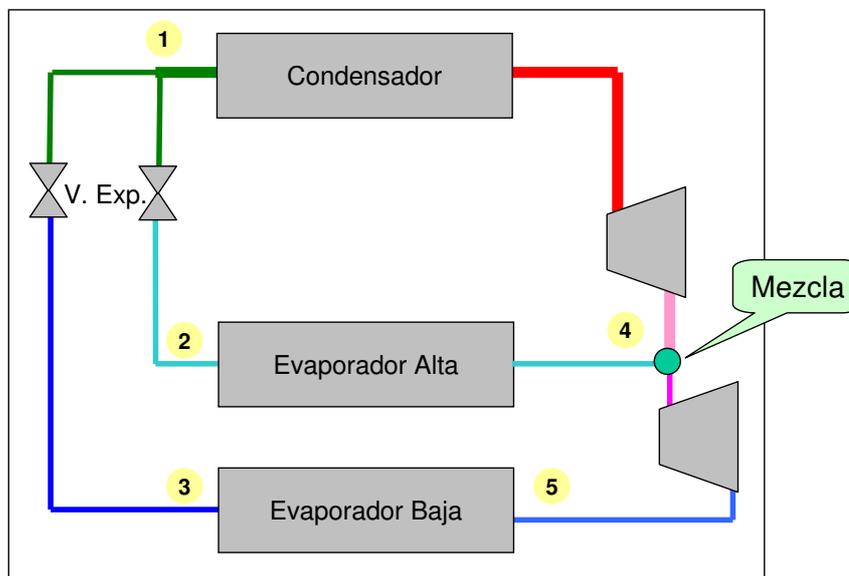
Ciclo Simple con Dos Evaporadores (I)



2.- Refrigeración por Compresión (XX)

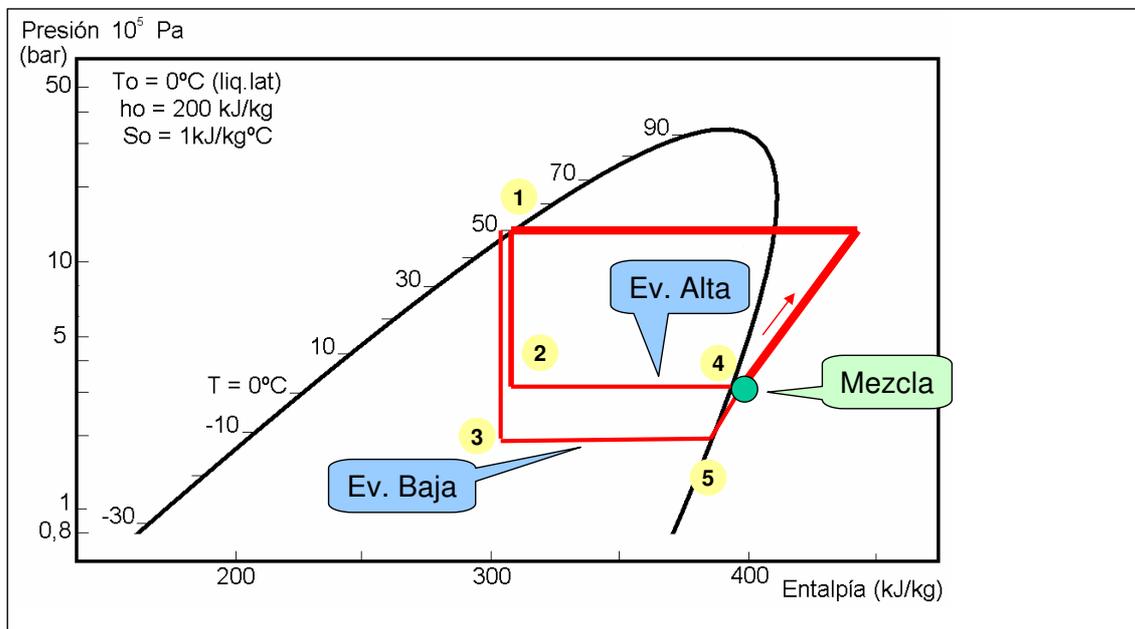
Ciclo Simple con Dos Evaporadores (II)

Toda la superficie del condensador disipa calor siempre
 $\uparrow \eta$ cuando una sola cámara ON



2.- Refrigeración por Compresión (XX)

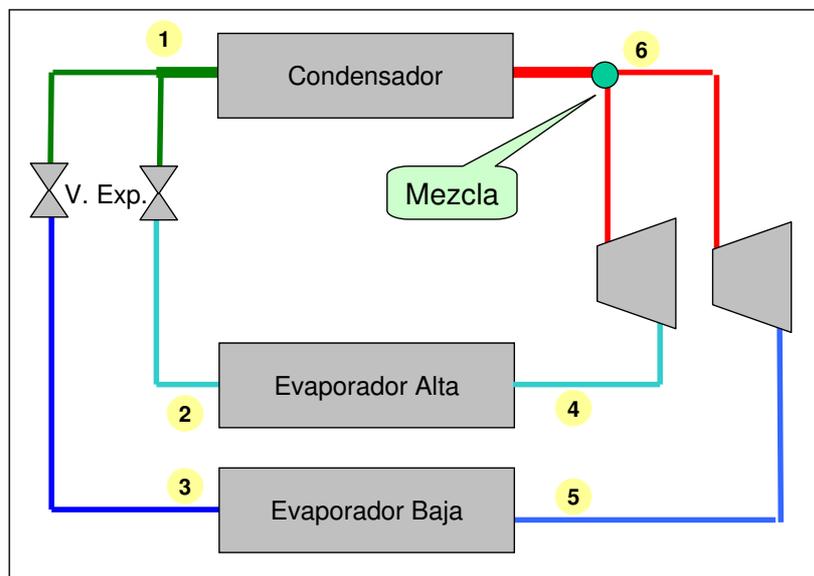
Ciclo Simple con Dos Evaporadores (II)



2.- Refrigeración por Compresión (XXI)

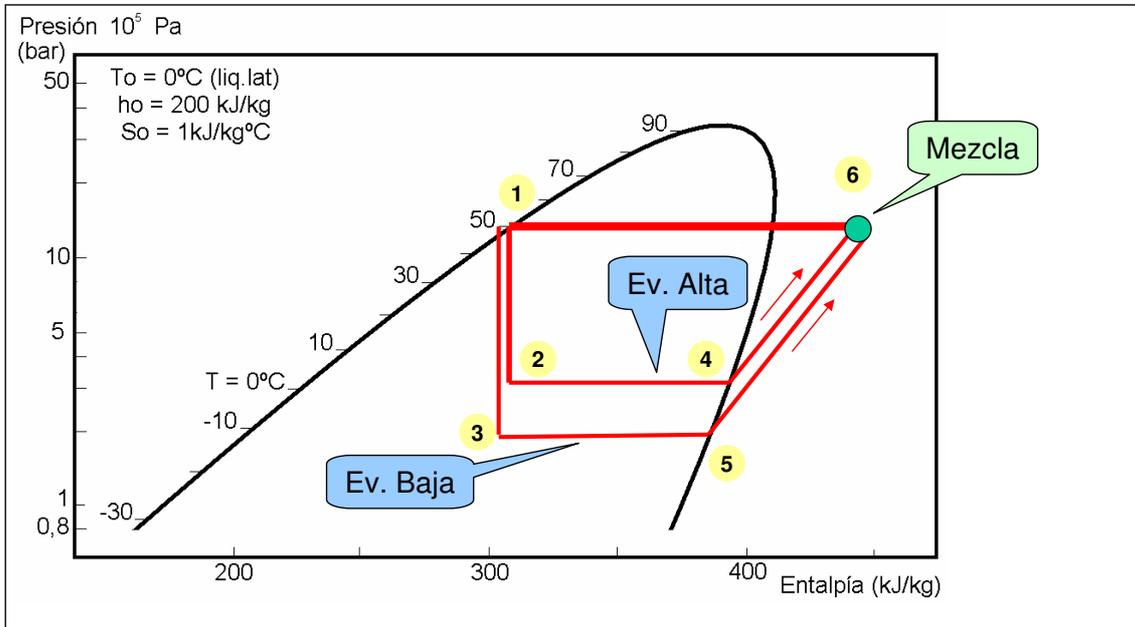
Ciclo Simple con Dos Evaporadores (III)

Toda la superficie del condensador
disipa calor siempre
↑ η cuando una sola cámara ON



2.- Refrigeración por Compresión (XXI)

Ciclo Simple con Dos Evaporadores (III)



2.- Refrigeración por Compresión (XXII)

2.- Refrigeración por Compresión (XXIII)

Refrigerante

T Cond.

T Evap.

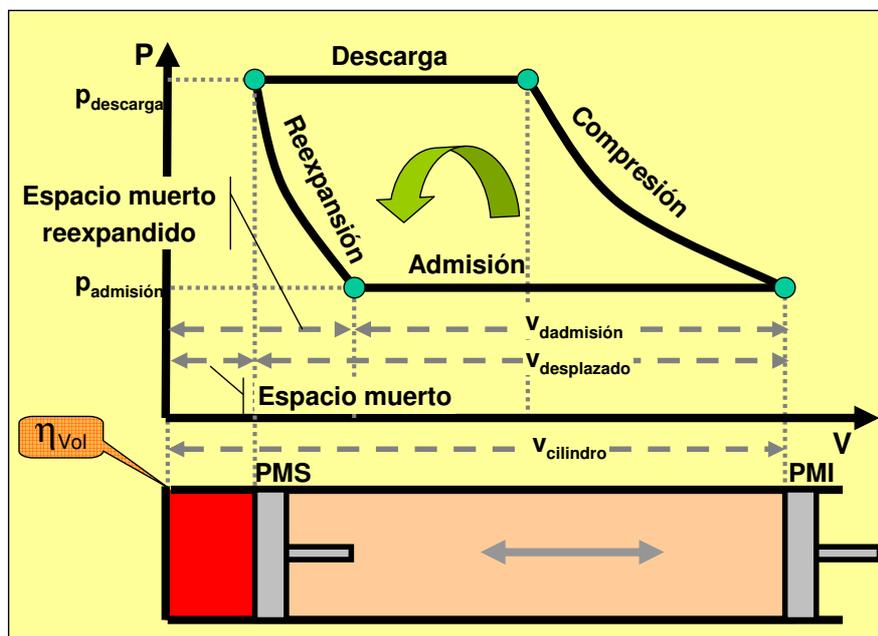
η_{Comp}

C.O.P.

Parámetro	Valor
Refrigerante	R417A
Condensación te [°C]	40.0
Temperatura media [°C]	38.7
Presión de condensación pc [bar]	13.4814
Evaporación te [°C]	-10.0
Temperatura media [°C]	-11.4
Presión de evaporación p0 [bar]	2.9756
Subenfriamiento [K]	5.0
Sobrecalentamiento [Evap.] [K]	10.0
Sobrecalentamiento [L.d.s.] [K]	10.0
Caudal [kg/s]	0.0078
Volumen desplazado [m3/h]	1.95
Capacidad volumétrica [kJ/m3]	1849.2
Capacidad frigor. Q0 [kW]	1.00
Potencia del Compressor P [kW]	0.395
Potencia calorífica Qc [kW]	1.42
C.O.P.	1.42
η _{Comp}	0.70
η _{Vol}	1.0

39

2.- Refrigeración por Compresión (XXIV)



40

2.- Refrigeración por Compresión (XXV)

Tabla

R134a
R22
R404A
R407C
R417A

Estado:
 Saturado
 Sobrecalentado

Parámetro:
 Temperatura [°C]
 Presión [bar]

Parámetro:
Inicio 10,00
Fin 50,00
Incremento 5,00

Tabla de cálculo Cancelar

t [°C]	p' [bar]	p''	h' [kJ/kg]	h''	s' [kJ/kgK]	s''	v' [dm ³ /kg]	v''
10,00	6,489	5,826	213,59	378,59	1,0483	1,6316	0,8255	32,8840
15,00	7,493	6,789	220,59	381,43	1,0726	1,6313	0,8386	28,1966
20,00	8,609	7,866	227,74	384,16	1,0969	1,6311	0,8527	24,2589
25,00	9,847	9,066	235,07	386,78	1,1213	1,6308	0,8680	20,9334
30,00	11,212	10,398	242,59	389,26	1,1459	1,6304	0,8845	18,1102
35,00	12,712	11,867	250,31	391,59	1,1707	1,6299	0,9026	15,7016
40,00	14,356	13,481	258,26	393,75	1,1958	1,6293	0,9226	13,6364
45,00	16,150	15,248	266,49	395,70	1,2213	1,6283	0,9448	11,8573
50,00	18,103	17,172	275,02	397,43	1,2474	1,6271	0,9697	10,3173

41

2.- Refrigeración por Compresión (XXVI)

Energy Engineering - CoolPack - Windows Internet Explorer

http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK/Index.html

MEK Home | News | Staff | Studies | Research | Publications | Links | Contact | Software | Internal pages

Department of Mechanical Engineering A department at The Technical University of Denmark

Section of Energy Engineering CoolPack Dansk

CoolPack

CONTENT:

- Danish
- About CoolPack
- News
- Support
- Download
- Helpfiles
- Tutorials
- Documents
- Contact CoolPack
- CoolPack Home
- Energy Engineering
- Other Software

CoolPack is a collection of simulation models for refrigeration systems. The models each have a specific purpose e.g. cycle analysis, dimensioning of main components, energy analysis and -optimization.

CoolPack is developed by the Department of Mechanical Engineering (MEK), Section of Energy Engineering (ET) at the Technical University of Denmark (DTU)

The development of CoolPack has until version 1.33 been financed by the Danish Energy Agency.

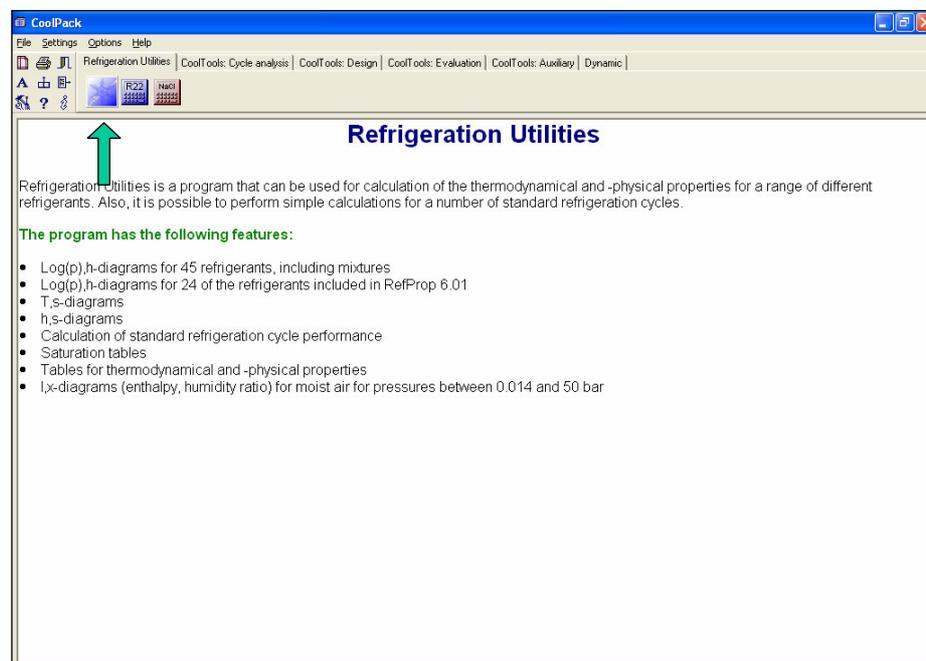
42

2.- Refrigeración por Compresión (XXVII)



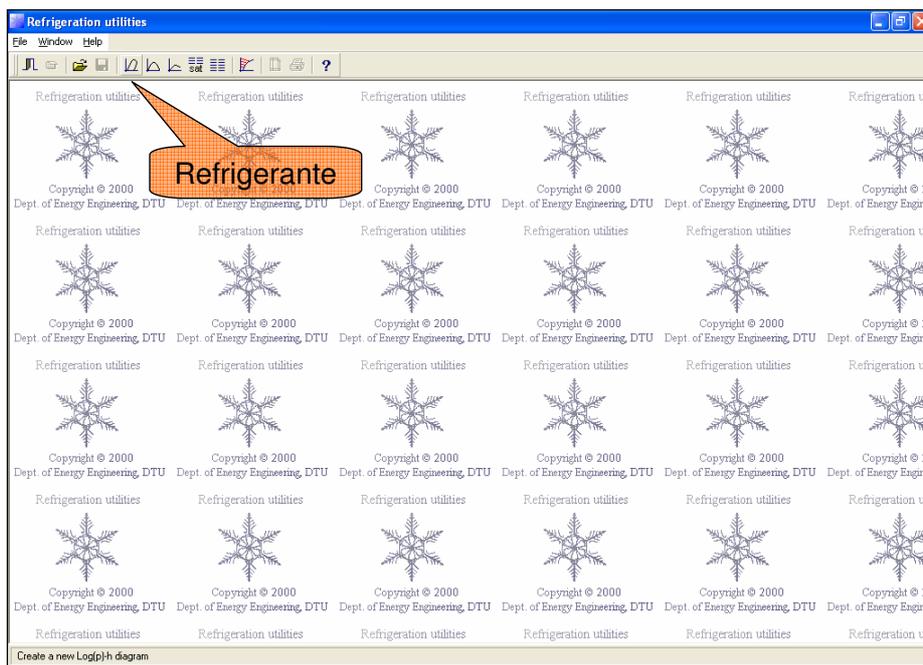
43

2.- Refrigeración por Compresión (XXVIII)



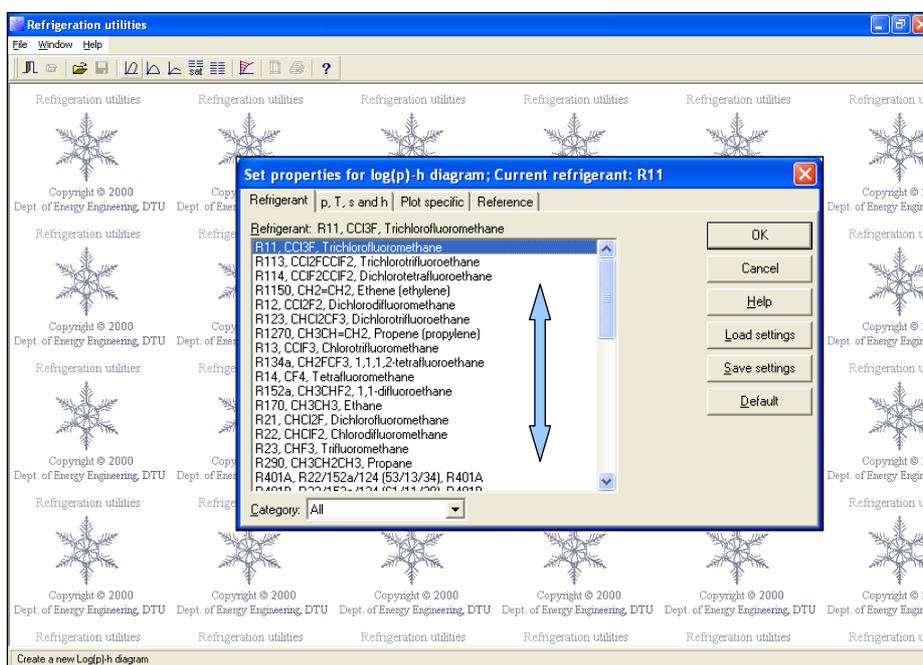
44

2.- Refrigeración por Compresión (XXIX)



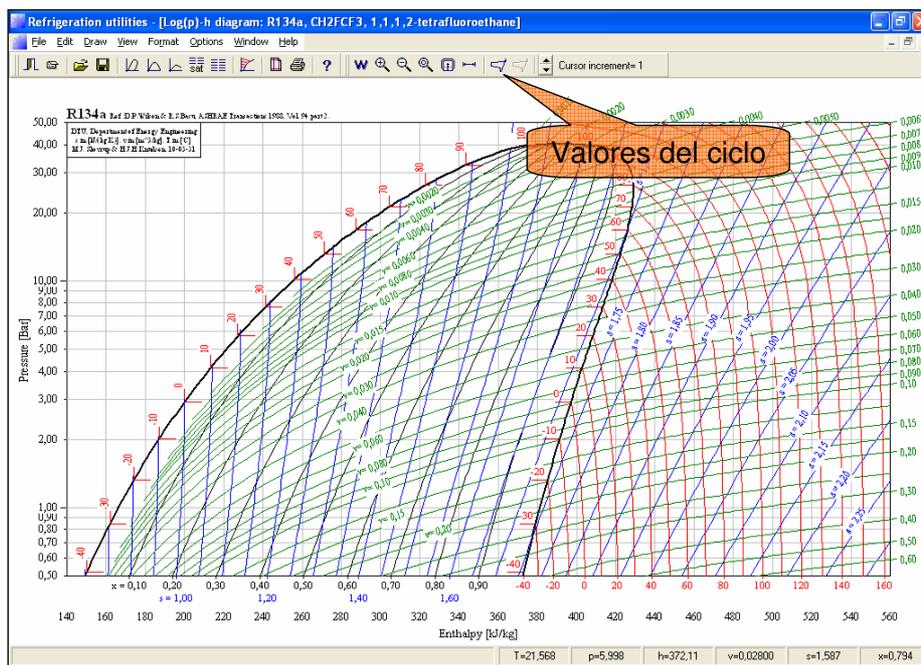
45

2.- Refrigeración por Compresión (XXIX)



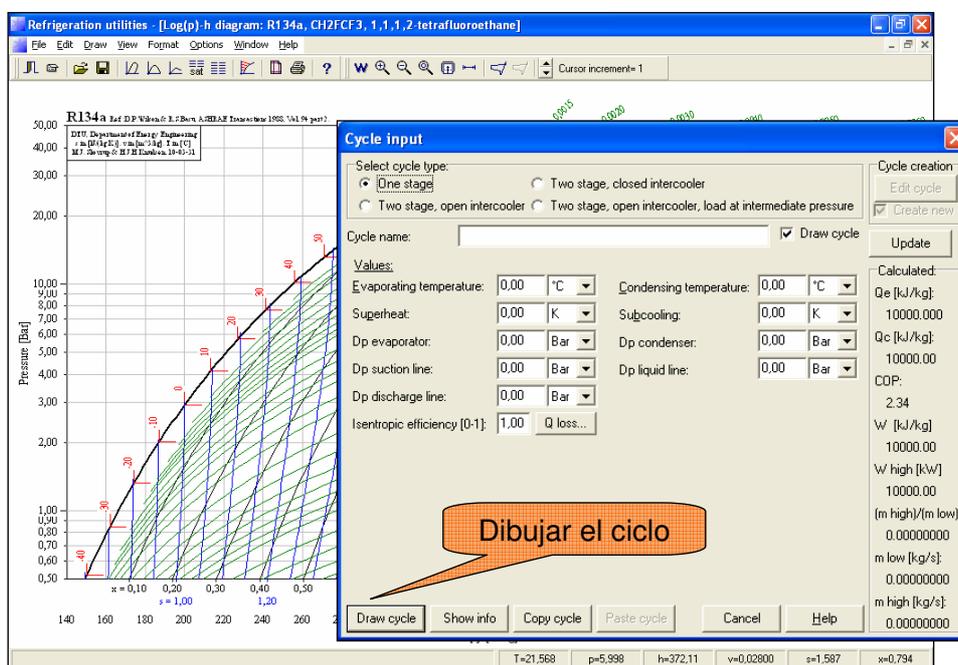
46

2.- Refrigeración por Compresión (XXX)



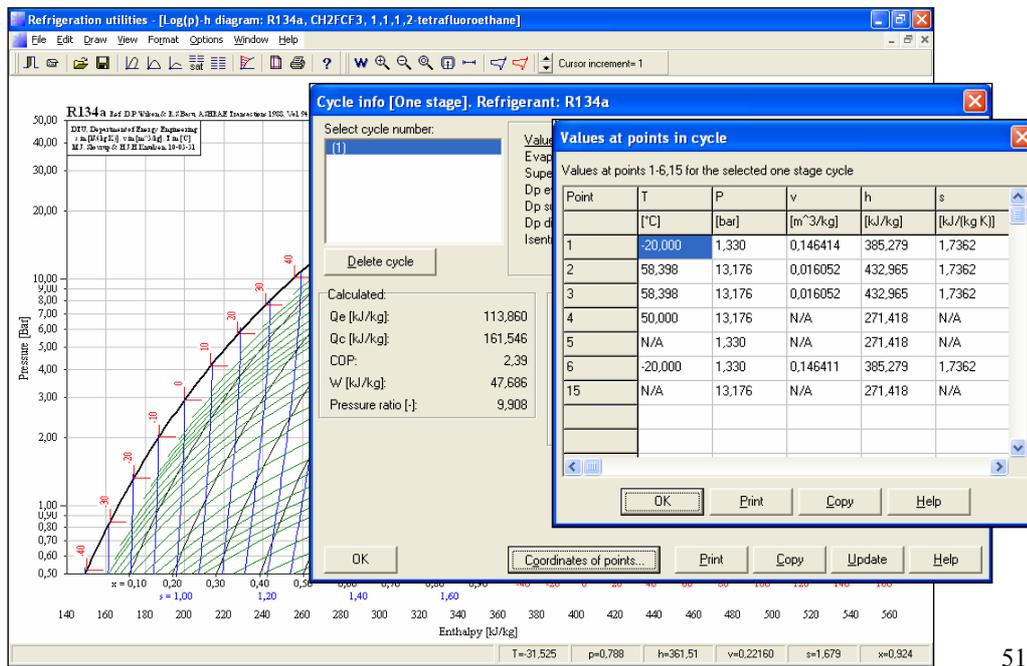
47

2.- Refrigeración por Compresión (XXX)



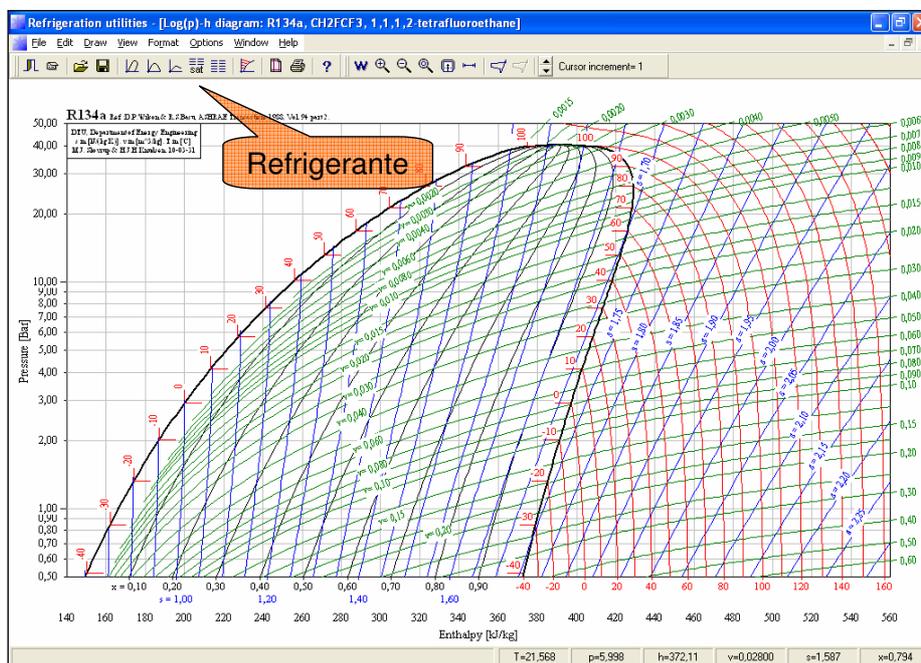
48

2.- Refrigeración por Compresión (XXXI)



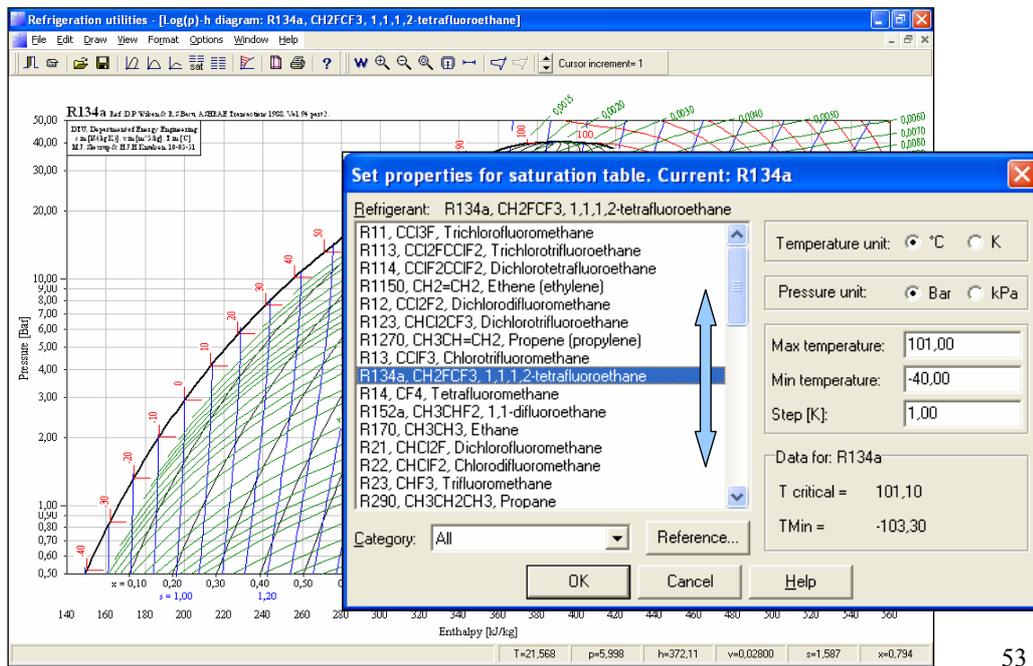
51

2.- Refrigeración por Compresión (XXXII)

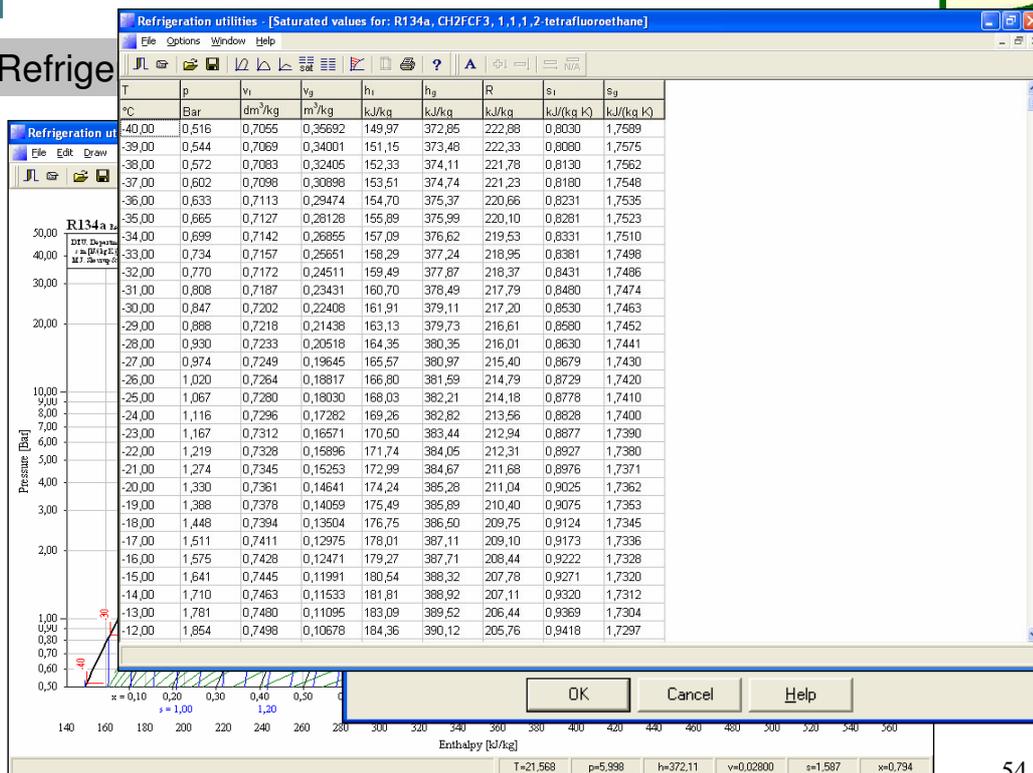


52

2.- Refrigeración por Compresión (XXXII)



2.- Refrige



2.- Refrigeración por Compresión (XXXIII)

CoolPack

File Settings Options Help

Refrigeration Utilities CoolTools: Cycle analysis CoolTools: Design CoolTools: Evaluation CoolTools: Auxiliary Dynamic

Cycle analysis

Análisis de Ciclos

- 1) ONE-STAGE cycle - Dry expansion evaporators
- 2) ONE-STAGE cycle - Liquid overfeed evaporators
- 3) ONE-STAGE cycle - Two cycles with common condenser
- 4) ONE-STAGE cycle - Two separate cycles
- Subcooling of liquid for low temperature system
- 5) TWO-STAGE cycle - Cooling of high stage suction gas by liquid injection
- 6) TWO-STAGE cycle - Open intercooler (flash gas removal)
- 7) TWO-STAGE cycle - Closed intercooler (with subcooling coil)
- 8) ONE-STAGE Transcritical cycle with CO₂
- 9) Two ONE-STAGE cycles in cascade

55

2.- Refrigeración por Compresión (XXXIV)

EES Distributable c:\archivos de programa\coolpack\eescooltools\pack_1.exe 3. Tool_C3 - [Diagram Window]

2000 Department of Energy Engineering DTU

CYCLE ANALYSIS : TWO ONE-STAGE CYCLES
- DX EVAPORATORS AND COMMON CONDENSER

Valores del Ciclo

$T_{11} = 11,6 [^{\circ}\text{C}]$ $T_6 = 33,6 [^{\circ}\text{C}]$ $\dot{m}_{\text{TOT}} = 1,112 [\text{kg/s}]$ $T_3 = 54,2 [^{\circ}\text{C}]$ $T_{15} = 63,0 [^{\circ}\text{C}]$
 $\dot{Q}_{\text{LG}} = 0,0 [\text{kW}]$ $\dot{Q}_{\text{E,11}} = 6,2 [\text{kW}]$ $\dot{Q}_{\text{C}} = 170,4 [\text{kW}]$ $T_{\text{C}} = 35,0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_2 = 52,5 [^{\circ}\text{C}]$ $T_5 = 33,6 [^{\circ}\text{C}]$
 $\dot{m}_{\text{HS}} = 0,924 [\text{kg/s}]$ $\dot{Q}_{\text{E,HS}} = 100,0 [\text{kW}]$ $T_{\text{E,HS}} = -10,0 [^{\circ}\text{C}]$ $\dot{W}_{\text{HS}} = 36,1 [\text{kW}]$ $\dot{W}_{\text{LS}} = 12,9 [\text{kW}]$
 $X_7 = 0,37 [-]$ $\dot{m}_{\text{LS}} = 0,188 [\text{kg/s}]$ $T_{\text{E,LS}} = -35,0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_2 = -4,0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_1 = -4,0 [^{\circ}\text{C}]$
 $X_{12} = 0,33 [-]$ $\dot{Q}_{\text{E,LS}} = 25,0 [\text{kW}]$ $T_{\text{E,LS}} = -35,0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_{13} = -30,0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_{14} = -28,5 [^{\circ}\text{C}]$

REFRIGERANT : ??	COP : 2,551	COP ^{HS} : 2,966	$\eta_{\text{CARNOT,HS}} : 0,51$
		COP ^{LS} : 1,477	$\eta_{\text{CARNOT,LS}} : 0,43$

56

2.- Refrigeración por Compresión (XXXIV)

CYCLE SPECIFICATION

TEMPERATURE LEVELS

$T_{E,HS}$ [°C]: -10,0 $\Delta T_{SH,HS}$ [K]: 5,0
 $T_{E,LS}$ [°C]: -35,0 $\Delta T_{SH,LS}$ [K]: 5,0
 T_C [°C]: 35,0 ΔT_{SC} [K]: 1,0

SUCTION GAS HEAT EXCHANGER

No SGHX 0,3

LIQUID SUBCOOLER

Thermal efficiency [-]: 0,5

PRESSURE LOSSES

$AP_{SL,HS}$ [K]: 0,2
 $AP_{SL,LS}$ [K]: 0,2
 AP_{DL} [K]: 0,2

REFRIGERANT

R404A

CYCLE CAPACITY

HS: Ref. Capacity [kW]: 100 $\dot{Q}_{E,HS}$: 100,0 [kW] \dot{m}_{HS} : 0,924 [kg/s] $\dot{V}_{S,HS}$: 157,8 [m³/h]
LS: Ref. Capacity [kW]: 25 $\dot{Q}_{E,LS}$: 25,0 [kW] \dot{m}_{LS} : 0,188 [kg/s] $\dot{V}_{S,LS}$: 81,3 [m³/h]

COMPRESSOR PERFORMANCE

HS: Isentropic efficiency [-]: 0,7 $\eta_{IS,HS}$: 0,700 [-] \dot{W}_{HS} : 36,1 [kW] \dot{W}_{TOT} : 49,0 [kW]
LS: Isentropic efficiency [-]: 0,7 $\eta_{IS,LS}$: 0,700 [-] \dot{W}_{LS} : 12,9 [kW]

COMPRESSOR HEAT LOSS

HS: f_0 [%]: 10 $f_{Q,HS}$: 10,0 [%] T_2 : 52,5 [°C] $\dot{Q}_{LOSS,HS}$: 3,6 [kW]
LS: f_0 [%]: 10 $f_{Q,LS}$: 10,0 [%] T_{16} : 63,0 [°C] $\dot{Q}_{LOSS,LS}$: 1,3 [kW]

SUCTION LINES

HS: Unuseful SH [K]: 1,0 $\dot{Q}_{SL,HS}$: 906 [W] $T_{OUT,HS}$: -4,0 [°C] $\Delta T_{SH,SL,HS}$: 1,0 [K]
LS: Unuseful SH [K]: 1,5 $\dot{Q}_{SL,LS}$: 236 [W] $T_{OUT,LS}$: -28,5 [°C] $\Delta T_{SH,SL,LS}$: 1,5 [K]

State Points Auxiliary - CALC - - HELP - COP: 2,551 COP^{HS}: 2,966 COP^{LS}: 1,477

2.- Refrigeración por Compresión (XXXV)

AUXILIARY

PIPE DIMENSIONS

PIPE SECTION	VELOCITY	PIPE DIAMETER	Condition corresponds to
	[m/s]	[mm]	
HS Suction line	10,0	74,7	State Point #3
LS Suction line	10,0	53,6	State Point #9
Common Discharge line	12,0	39,8	State Point #14
HS Liquid line	0,6	43,8	State Point #6
LS Liquid line	0,6	19,4	State Point #6

VOLUMETRIC EFFICIENCY

HS: Volumetric efficiency [-]: 0,8 $\eta_{VOL,HS}$: 0,800 [-] $\dot{V}_{D,HS}$: 197,2 [m³/h] $\dot{V}_{S,HS}$: 157,8 [m³/h]
LS: Volumetric efficiency [-]: 0,8 $\eta_{VOL,LS}$: 0,800 [-] $\dot{V}_{D,LS}$: 101,6 [m³/h] $\dot{V}_{S,LS}$: 81,3 [m³/h]
 $\dot{V}_{S,HS}$ and $\dot{V}_{S,LS}$ can be selected as inputs in the cycle specification window.

HEAT OF DESUPERHEATING

WATER

Temperature increase [K]: 20,00 ΔT_{WATER} : 20,00 [K] \dot{V}_{WATER} : 0,9227 [m³/h] \dot{Q}_{DSH} : 21,275 [kW]
 $T_{DL,OUT}$: 54,2 [°C] T_C : 35,0 [°C]
Water in the desuperheating heat exchanger can only be heated to discharge temperature $T_{DL,OUT}$.
 \dot{Q}_C in the main diagram window includes both the heat load for desuperheating and condensing of the refrigerant.

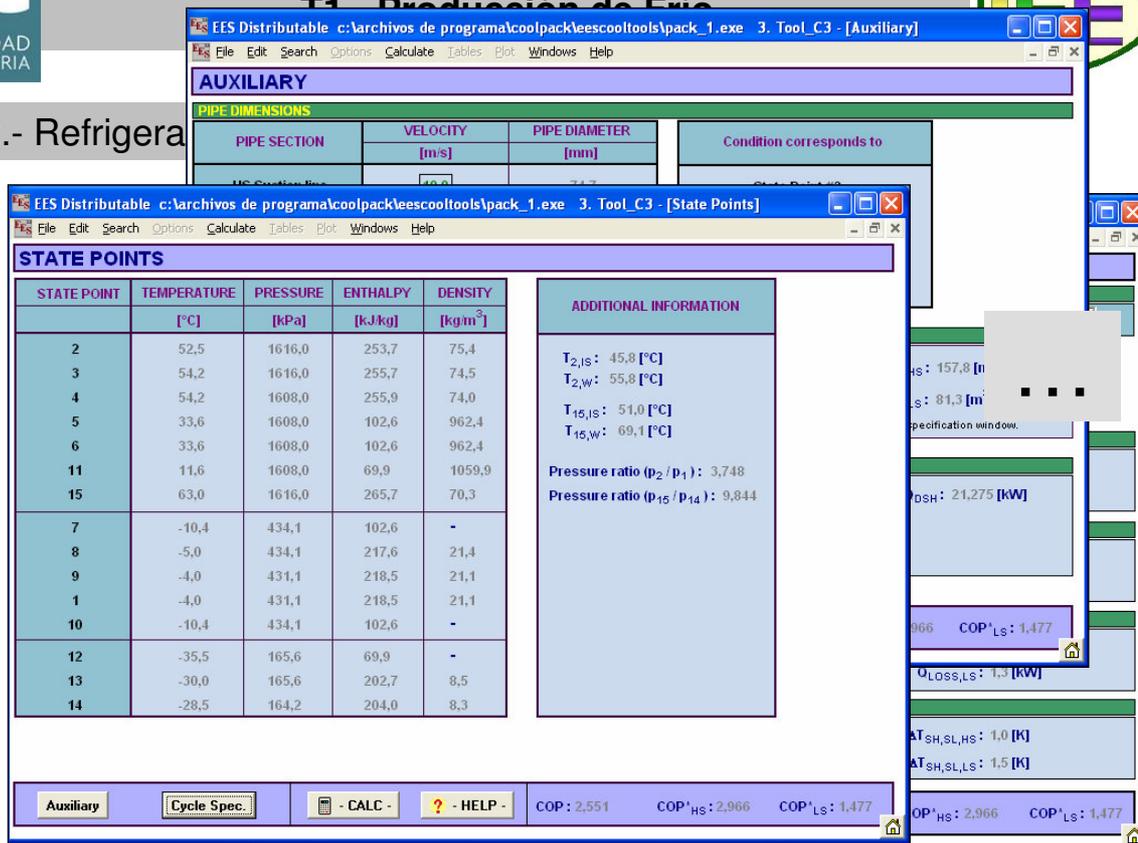
State Points Cycle Spec. - CALC - - HELP - COP: 2,551 COP^{HS}: 2,966 COP^{LS}: 1,477

SUCTION LINES

HS: Unuseful SH [K]: 1,0 $\dot{Q}_{SL,HS}$: 906 [W] $T_{OUT,HS}$: -4,0 [°C] $\Delta T_{SH,SL,HS}$: 1,0 [K]
LS: Unuseful SH [K]: 1,5 $\dot{Q}_{SL,LS}$: 236 [W] $T_{OUT,LS}$: -28,5 [°C] $\Delta T_{SH,SL,LS}$: 1,5 [K]

State Points Auxiliary - CALC - - HELP - COP: 2,551 COP^{HS}: 2,966 COP^{LS}: 1,477

2.- Refrigeración



STATE POINTS

STATE POINT	TEMPERATURE [°C]	PRESSURE [kPa]	ENTHALPY [kJ/kg]	DENSITY [kg/m ³]
2	52,5	1616,0	253,7	75,4
3	54,2	1616,0	255,7	74,5
4	54,2	1608,0	255,9	74,0
5	33,6	1608,0	102,6	962,4
6	33,6	1608,0	102,6	962,4
11	11,6	1608,0	69,9	1059,9
15	63,0	1616,0	265,7	70,3
7	-10,4	434,1	102,6	-
8	-5,0	434,1	217,6	21,4
9	-4,0	431,1	218,5	21,1
1	-4,0	431,1	218,5	21,1
10	-10,4	434,1	102,6	-
12	-35,5	165,6	69,9	-
13	-30,0	165,6	202,7	8,5
14	-28,5	164,2	204,0	8,3

ADDITIONAL INFORMATION

$T_{2,IS} = 45,8 [^{\circ}C]$
 $T_{2,W} = 55,8 [^{\circ}C]$
 $T_{15,IS} = 51,0 [^{\circ}C]$
 $T_{15,W} = 69,1 [^{\circ}C]$
 Pressure ratio (p_2 / p_1): 3,748
 Pressure ratio (p_{15} / p_{14}): 9,844

COP^{HS}: 2,966
 COP^{LS}: 1,477

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: NH_3-H_2O y $LiBr-H_2O$

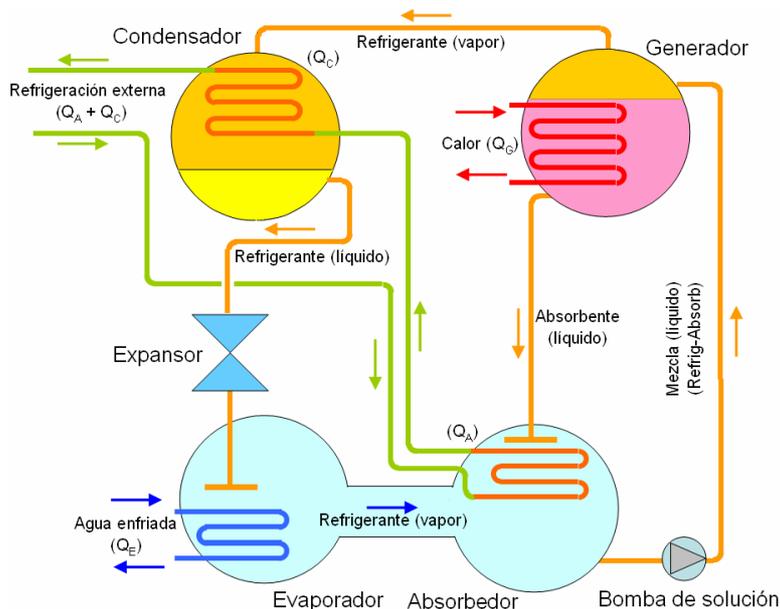
- El NH_3 es el refrigerante y el H_2O el absorbente
- El H_2O es el refrigerante, y el $LiBr$ el absorbente ($T_{evap} > 0^{\circ}C$, entre 5 y $10^{\circ}C$)

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 (I)**



3.- Refrigeración por Absorción (III)

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

El refrigerante continúa hacia el condensador

3a

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

Refrigerante (vapor) Generador

2

Calor (Q_c)

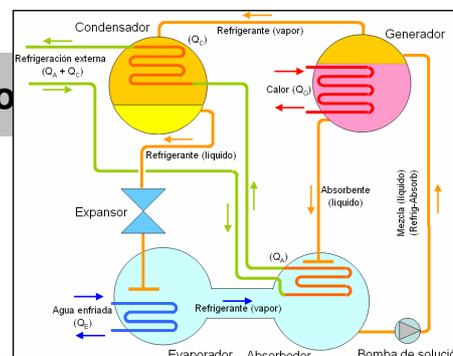
Al absorbente retorna al absorbedor

Refrigeración externa

3b

Refrigerante (vapor)

Absorbedor



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

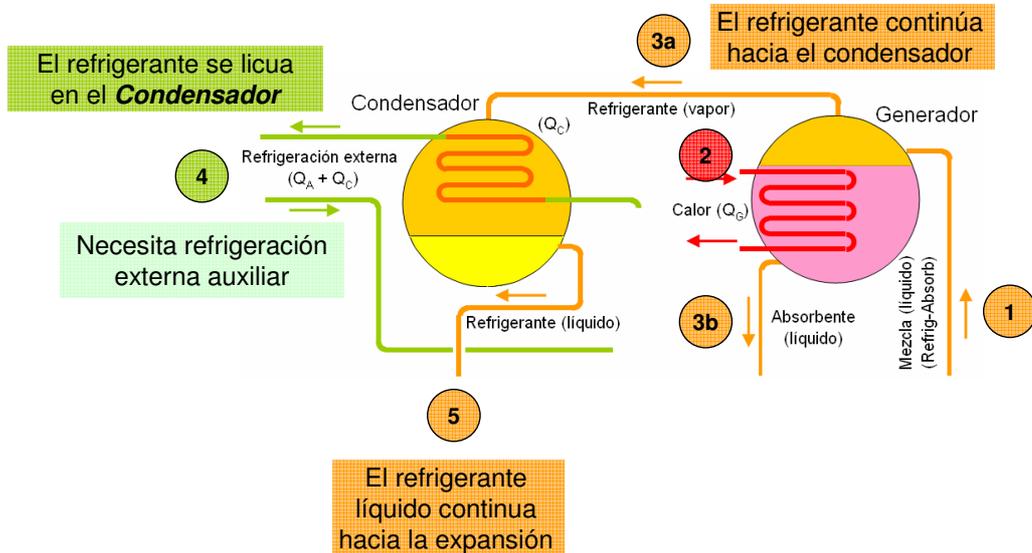
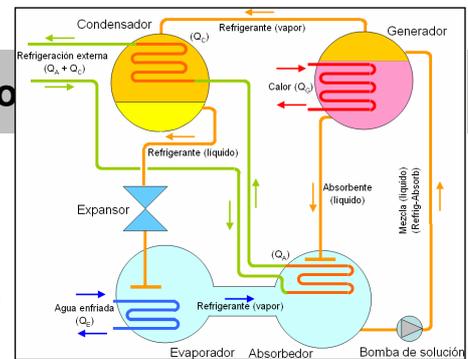
1

Absorbedor Bomba de solución

T1.- Producción de Frío

3.- Refrigeración por Absorción (III)

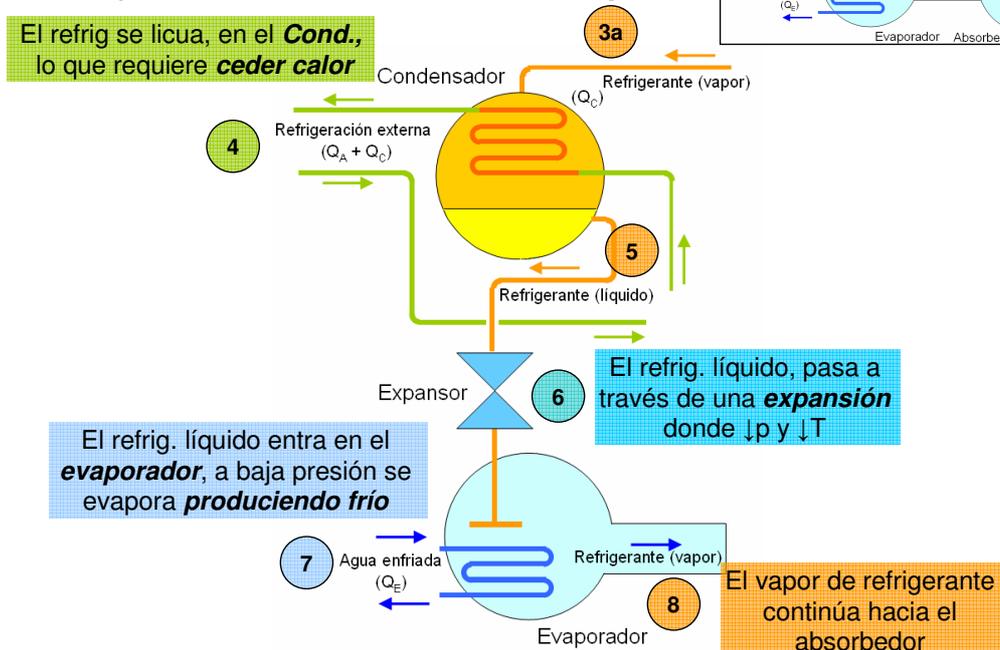
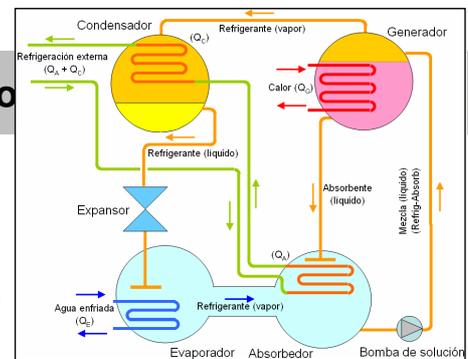
Una máquina de absorción de **efecto simple (II)**



T1.- Producción de Frío

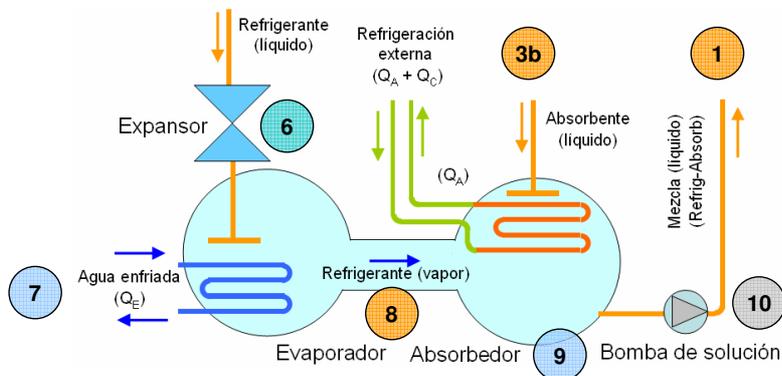
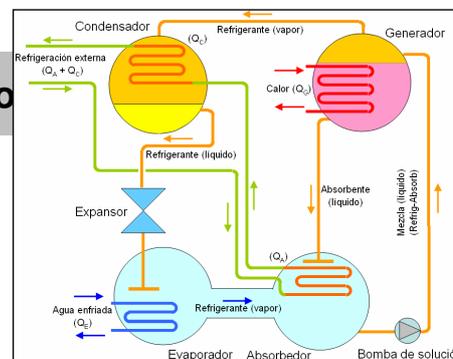
3.- Refrigeración por Absorción (III)

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



3.- Refrigeración por Absorción (III)

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



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

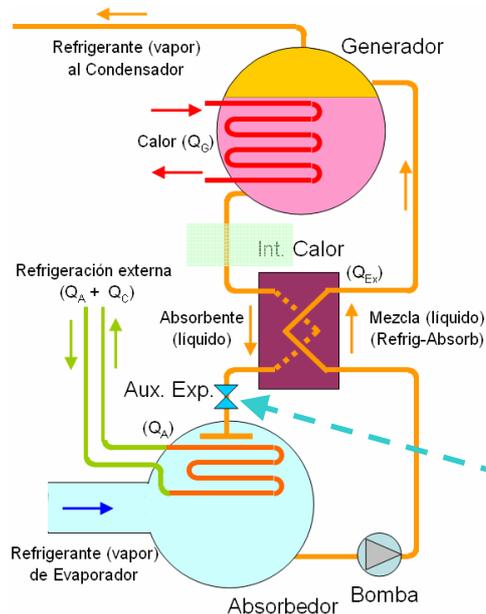
En el **Absorbedor** se mezclan:
- el vapor de refrig. (evap); 8
- la mezcla diluida (gen.); 3b

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



3.- Refrigeración por Absorción (IV)

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



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 (V)

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 2,5 Potencia maquina

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

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

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

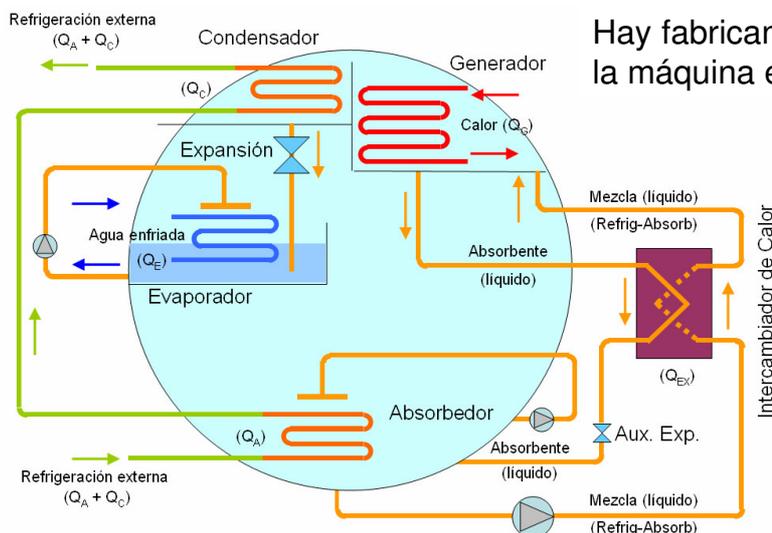
Q eliminado en absorción \cong 2 Q eliminado en compresión

3.- Refrigeración por Absorción (VI)

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 (VII)

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

La capacidad se controla con la concentración el absorbedor:

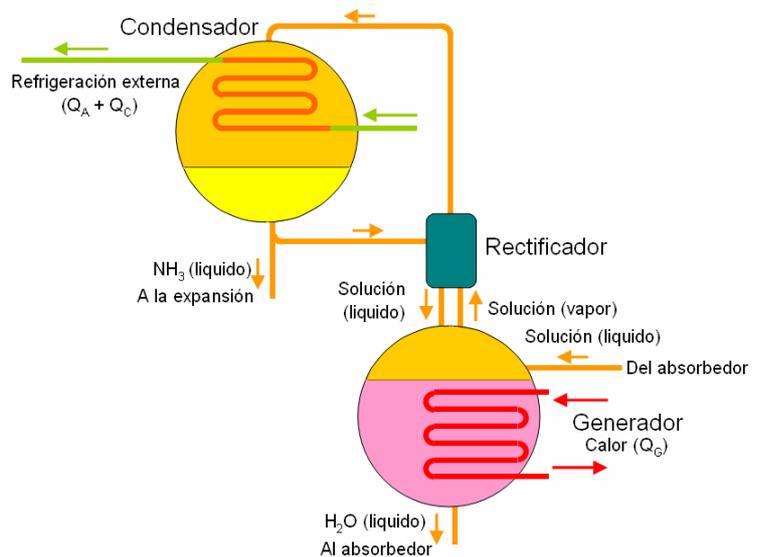
- Estrangulando la alimentación de calor en el generador
- Disminuyendo la refrigeración del condensador
- Regulando el caudal que le llega al hervidor
- Bypassando la solución con una válvula de tres vías en el hervidor (las dos conexiones con el absorbedor)

Sistema bromuro de litio-agua (BrLi-H₂O), requiere en el generador T^a de 100°C

3.- Refrigeración por Absorción (VIII)

Sistema amoniac-agua (NH₃-H₂O), requiere en el generador de 120-150 °C

- El NH₃ 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 amoniac se evapora agua



3.- Refrigeración por Absorción (IX)

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

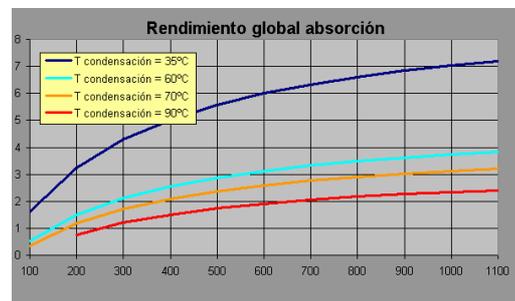
El COP de las de NH₃-H₂O es de 0,5 (trabajan a menores T_{evap})

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

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

η ↑ al ↑ T en el generador

η ↓ al ↑ T en el condensador/absorbedor



3.- Refrigeración por Absorción (X)

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

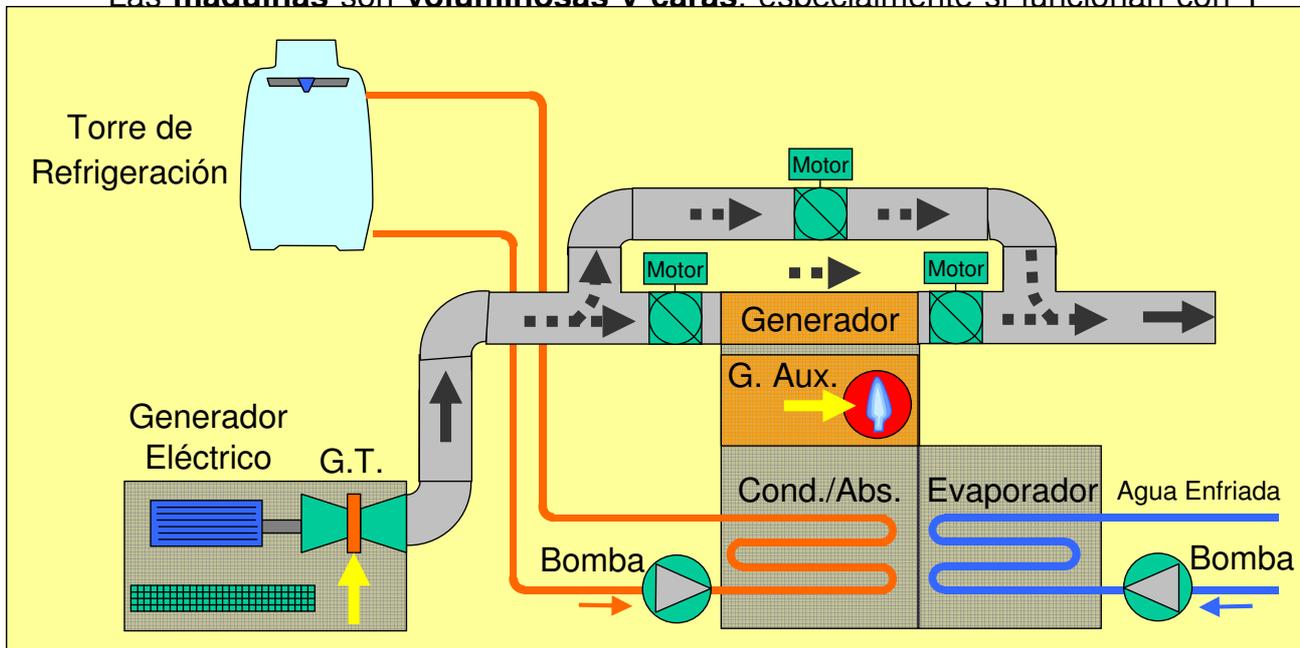
En los sistemas solares la disponibilidad de calor con la necesidad de refrigeración

La intermitencia del Sol hace necesario un sistema de almacenamiento térmico

No son rentables

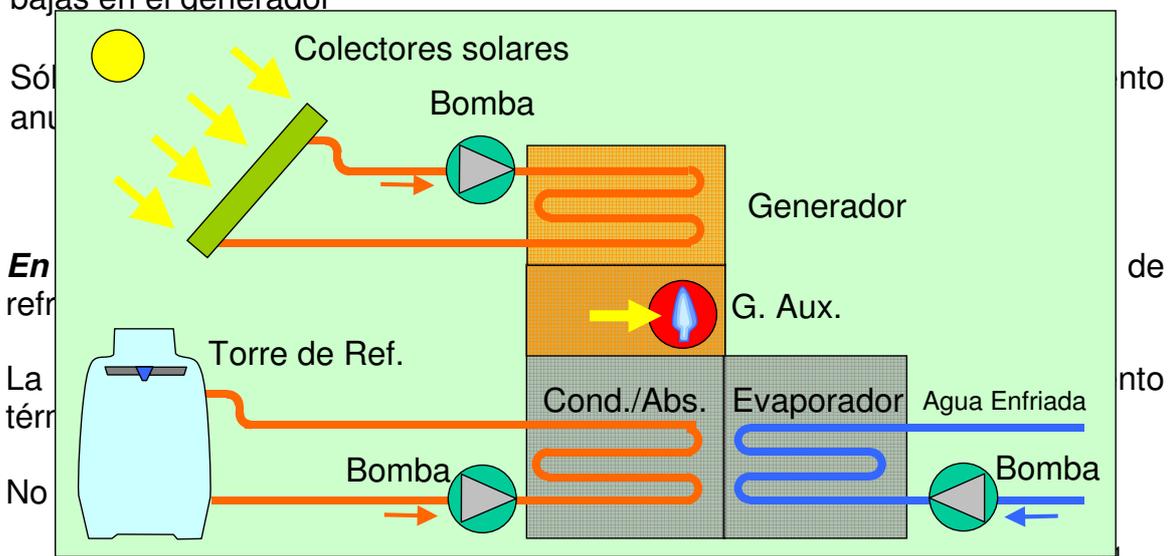
3.- Refrigeración por Absorción (X)

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



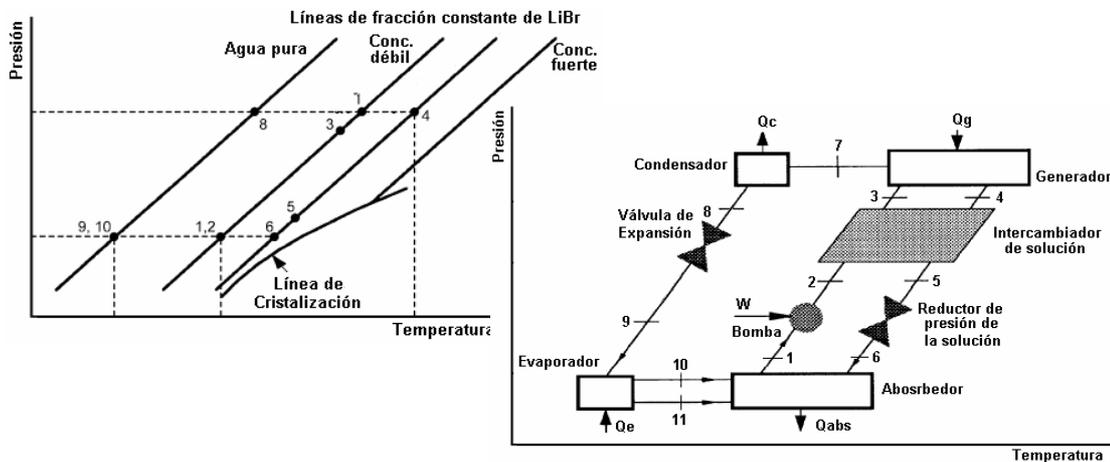
3.- Refrigeración por Absorción (X)

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



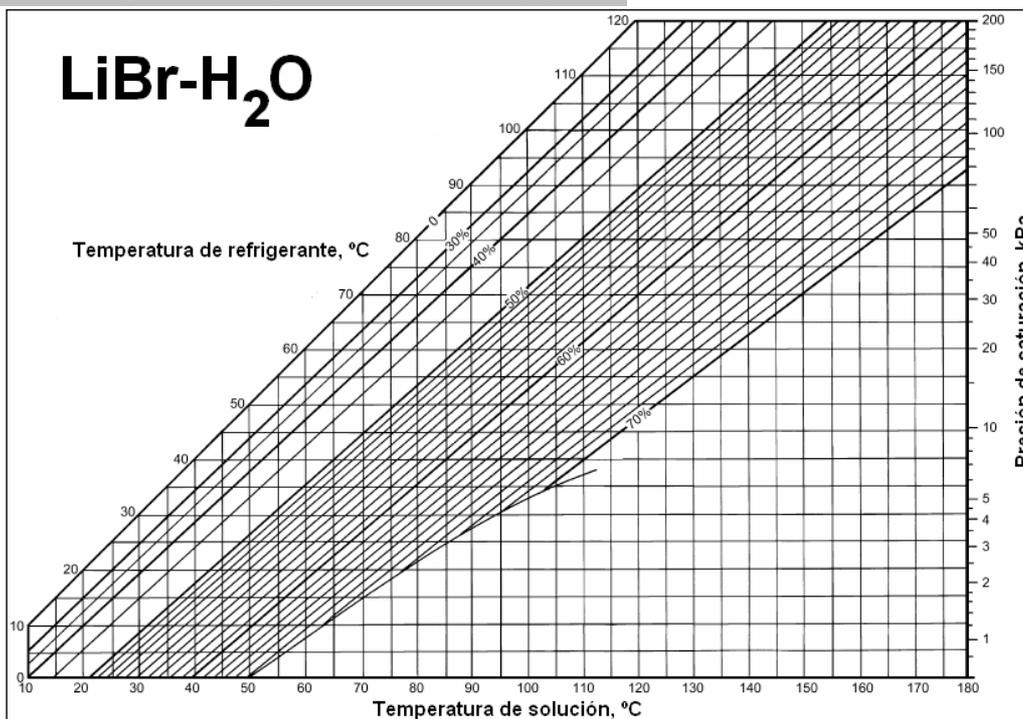
3.- Refrigeración por Absorción (IX)

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

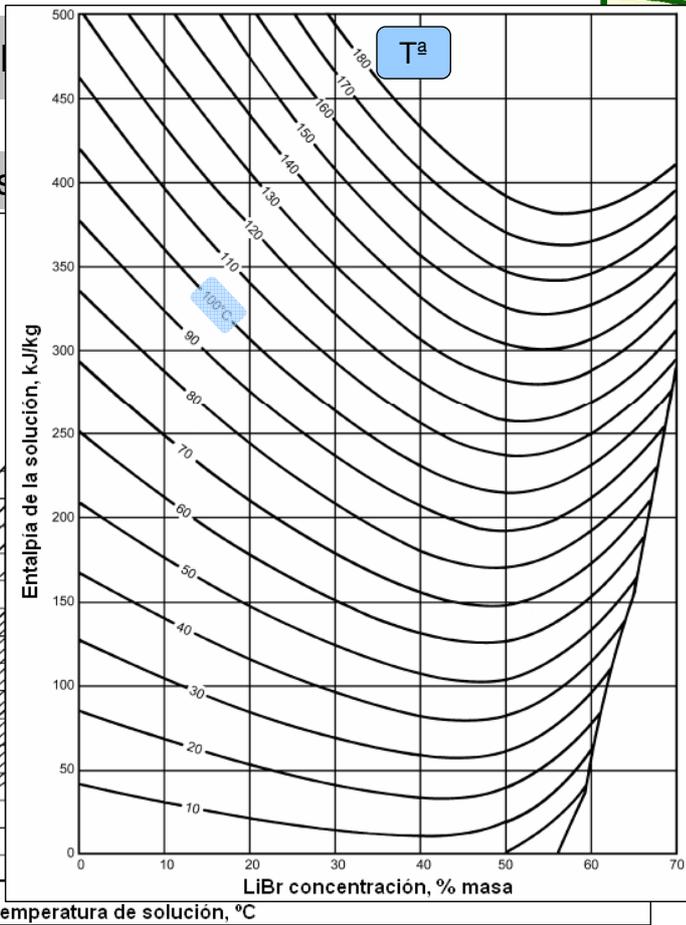
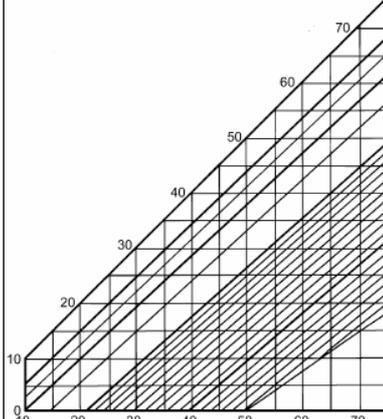
3.- Refrigeración por Absorción (X)



3.- Refrigeración por Absorción

LiBr-H₂O

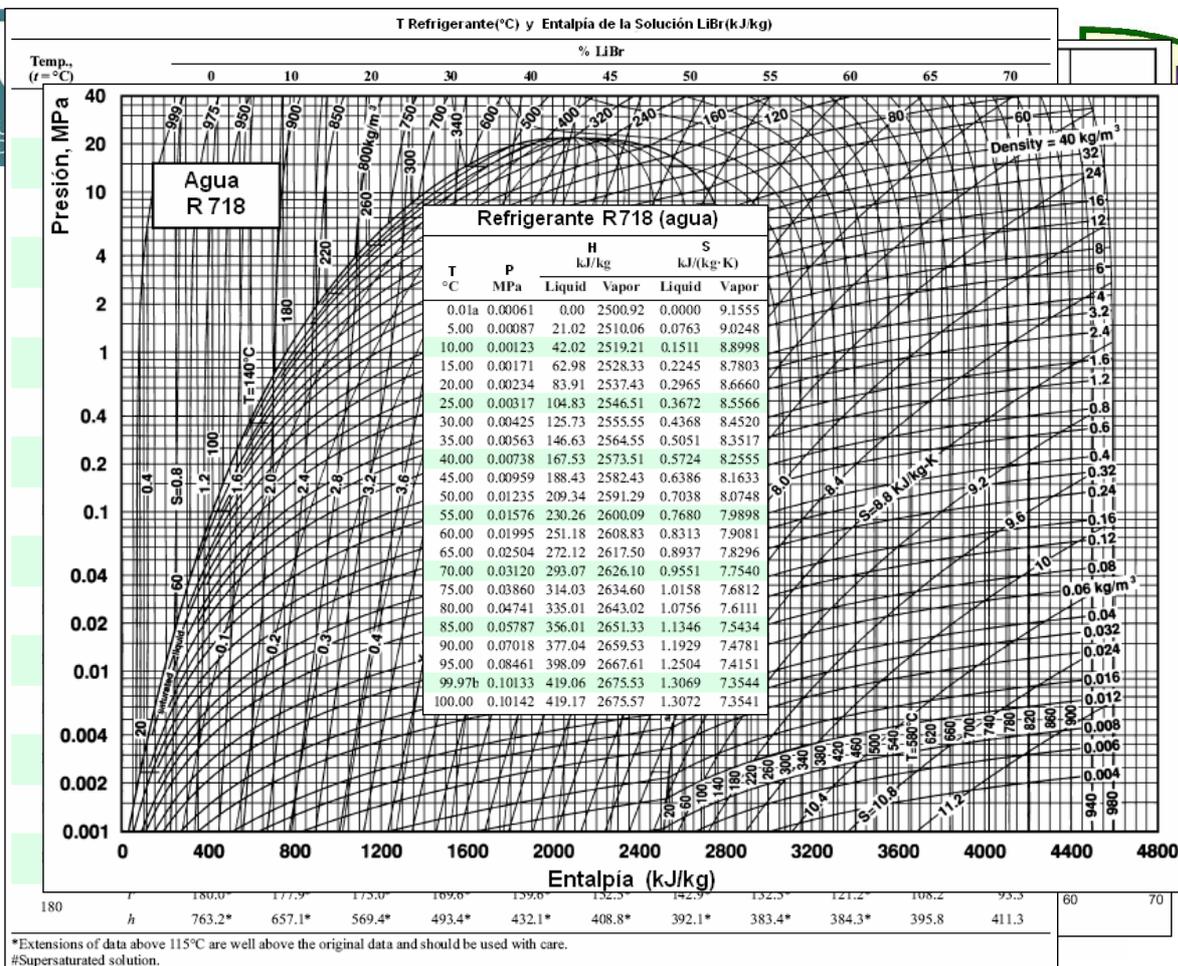
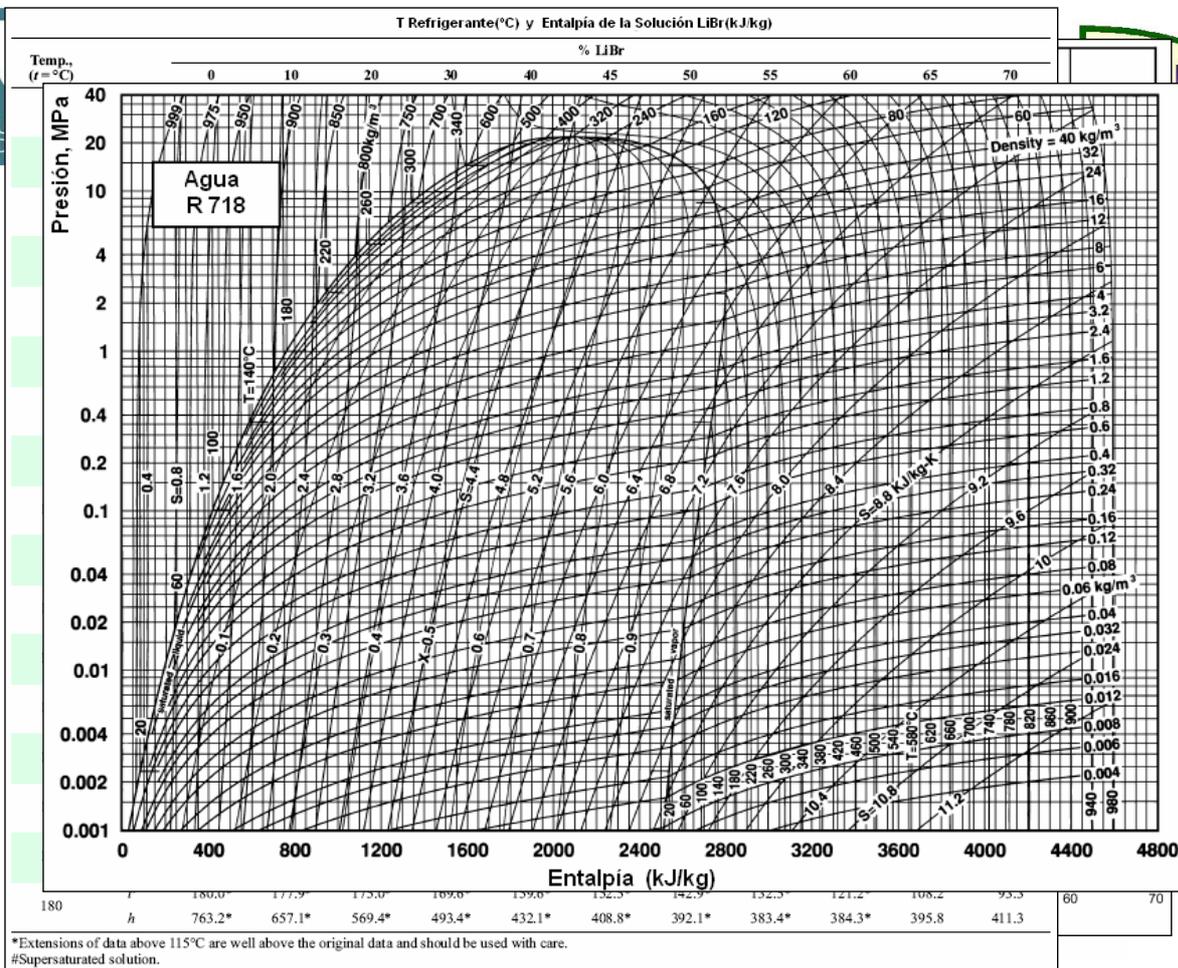
Temperatura de refrigerante, °C



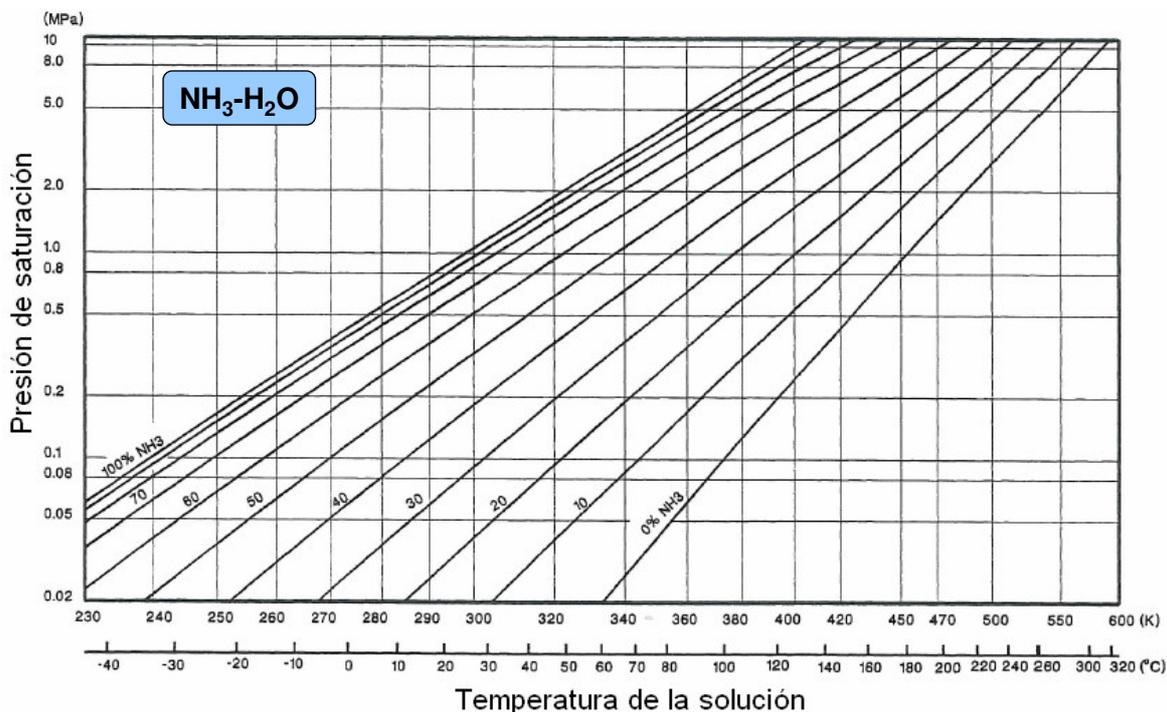
T Refrigerante(°C) y Entalpia de la Solución LiBr(kJ/kg)

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.



2.- Refrigeración por Absorción (XI)

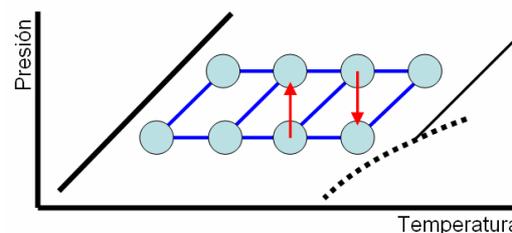
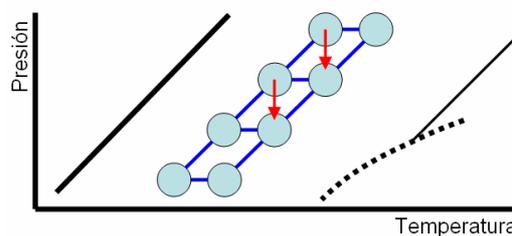


3.- Refrigeración por Absorción (XII)

Otros ciclos de absorción (I)

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

- Ciclos **multiefect** (el calor se aprovecha varias veces)
- Ciclos **multistage** (un elemento más de una vez)



3.- Refrigeración por Absorción (XIII)

Otros ciclos de absorción (II)

• **Double Effect Cycle:**

- Este ciclo aprovecha el calor desprendido en la refrigeración de un condensador de alta en un generador de baja (máquina grande y cara)
- Tiene COP del orden de 1,2
- Necesita un 40% menos de calor que el de simple efecto
- La refrigeración auxiliar libera al exterior 25% menos de calor

$$\frac{|Q_{G,D.E.}|}{|Q_{G,S.E.}|} = \frac{\frac{|Q_E|}{COP_{D.E.}}}{\frac{|Q_E|}{COP_{S.E.}}} = \frac{1,2}{0,7} = \frac{0,83}{1,43} \approx 60\%$$

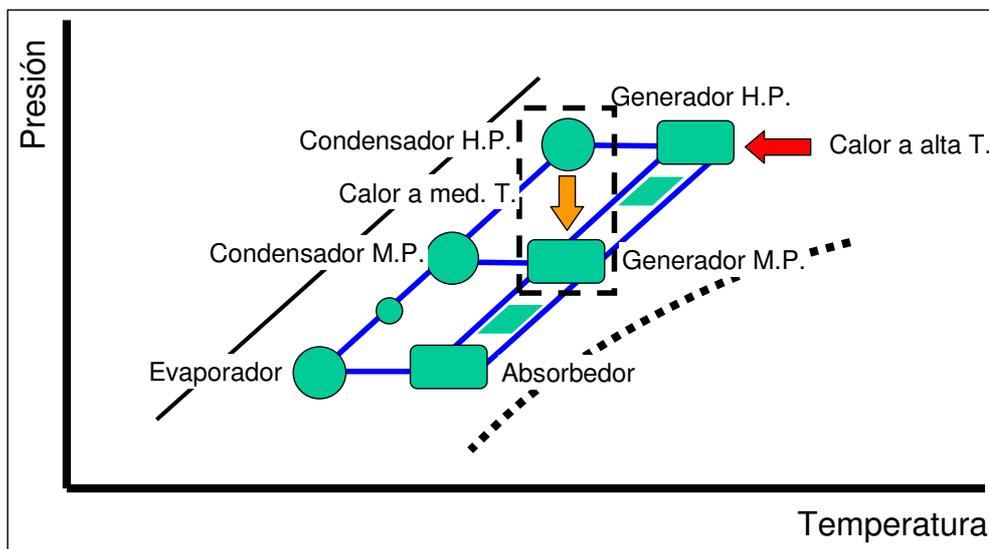
$$\frac{|Q_C| + |Q_{A,D.E.}|}{|Q_C| + |Q_{A,S.E.}|} = \frac{|Q_G| + |Q_E|_{D.E.}}{|Q_G| + |Q_E|_{S.E.}} = \frac{\frac{|Q_E|}{COP_{D.E.}} + |Q_E|}{\frac{|Q_E|}{COP_{S.E.}} + |Q_E|} = \frac{\frac{1,2}{0,7} + |Q_E|}{\frac{1,2}{0,7} + |Q_E|} = 75\%$$

83

3.- Refrigeración por Absorción (XIII)

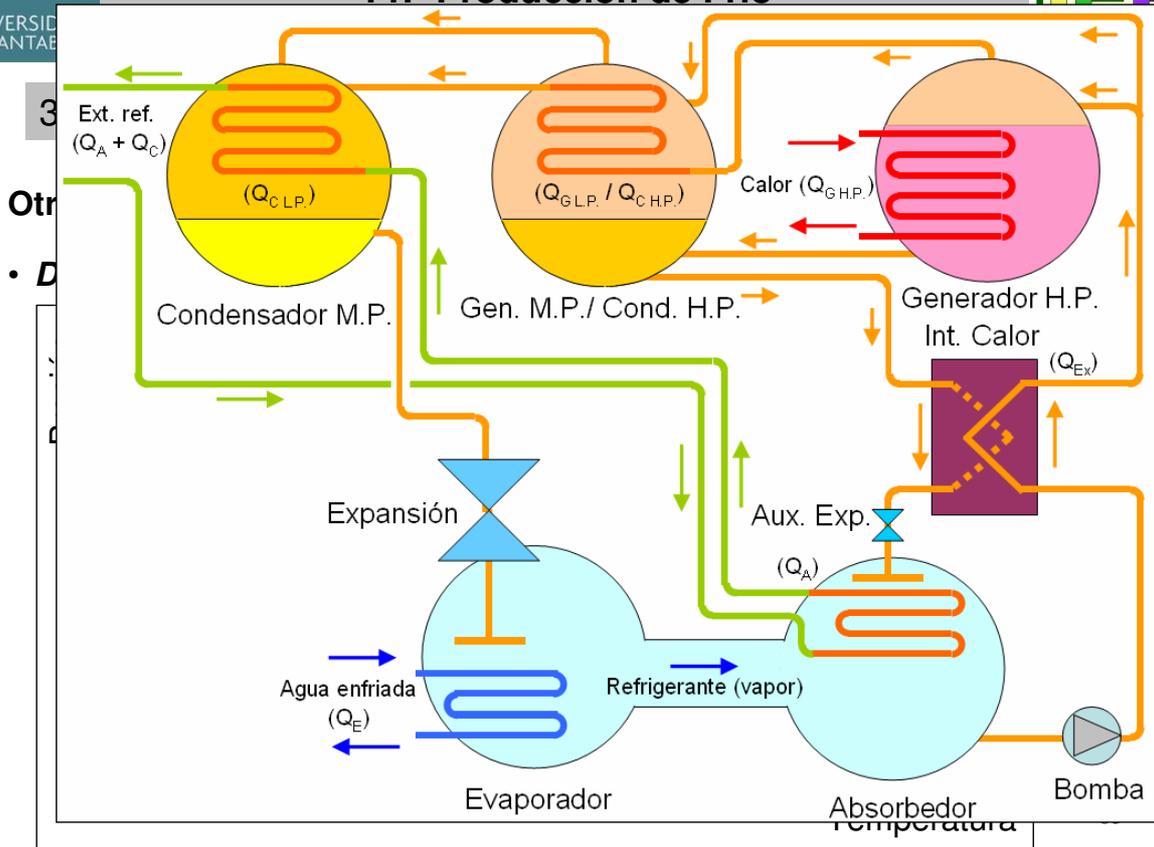
Otros ciclos de absorción (II)

• **Double Effect Cycle**



84

T1.- Producción de Frío



T1.- Producción de Frío

3.- Refrigeración por Absorción (XIV)

Otros ciclos de absorción (III)

• Half Effect Cycle:

- Este ciclo aprovecha el calor a dos focos térmicos distintos (alta y media temperatura)
- Tiene COP del orden de 0,5
- Necesita un 40% más de calor que el de simple efecto
- La refrigeración auxiliar libera al exterior 25% más de calor

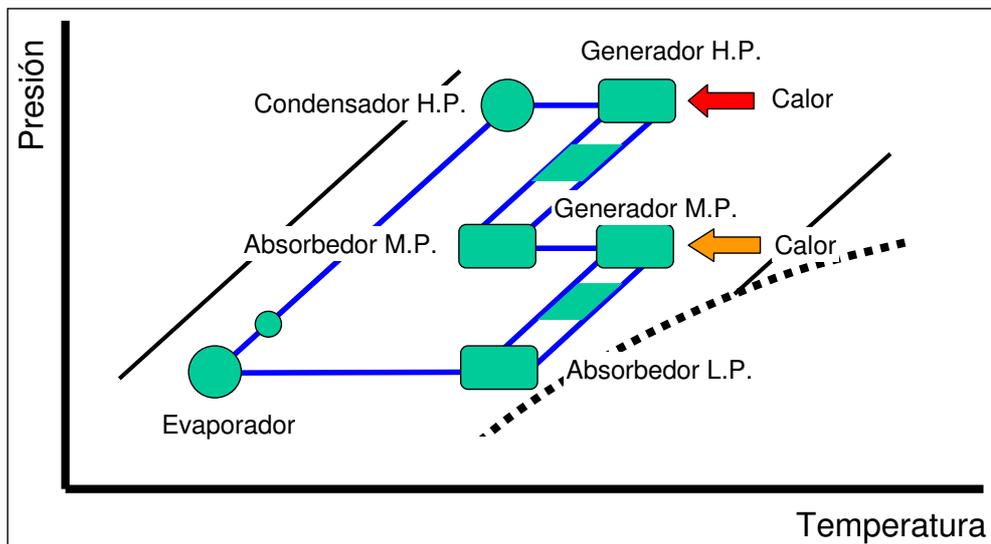
$$\frac{|Q_G|_{H.E.}}{|Q_G|_{S.E.}} = \frac{\frac{|Q_E|}{COP_{H.E.}}}{\frac{|Q_E|}{COP_{S.E.}}} = \frac{0,5}{0,7} = \frac{2}{1,43} = 140\%$$

$$\frac{|Q_C| + |Q_A|_{D.E.}}{|Q_C| + |Q_A|_{S.E.}} = \frac{|Q_G| + |Q_E|_{H.E.}}{|Q_G| + |Q_E|_{S.E.}} = \frac{\frac{|Q_E|}{COP_{H.E.}} + |Q_E|}{\frac{|Q_E|}{COP_{S.E.}} + |Q_E|} = \frac{0,5}{0,7} = \frac{|Q_E| + |Q_E|}{|Q_E| + |Q_E|} \approx 125\%$$

3.- Refrigeración por Absorción (XIV)

Otros ciclos de absorción (III)

• *Half Effect Cycle:*



87

3.- Refrigeración por Absorción (XV)

Otros ciclos de absorción (IV)

• *Single-effect/double-lift:*

- Busca conseguir gran enfriamiento en el agua de alimentación al generador (del orden de 30°C frente a los 10 de un ciclo convencional)
- Puede funcionar como uno de Double Effect, o como Half Effect
- El COP varía en función de como trabaja

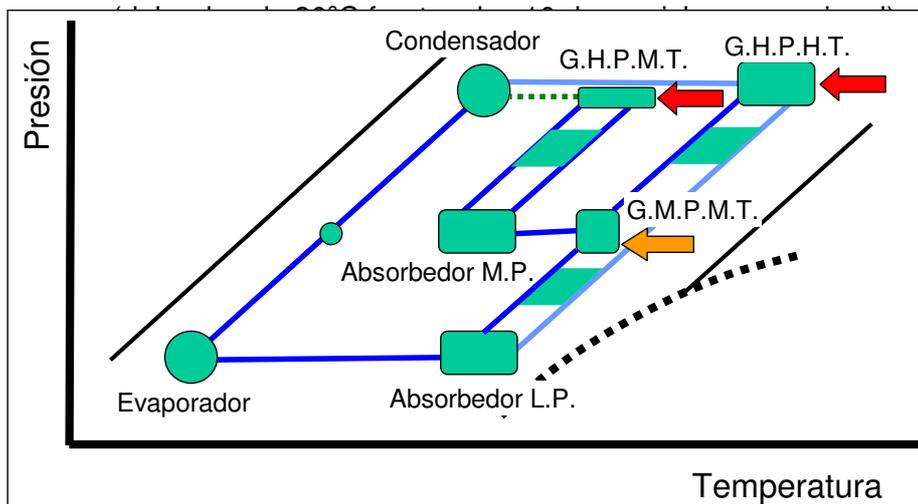
88

3.- Refrigeración por Absorción (XV)

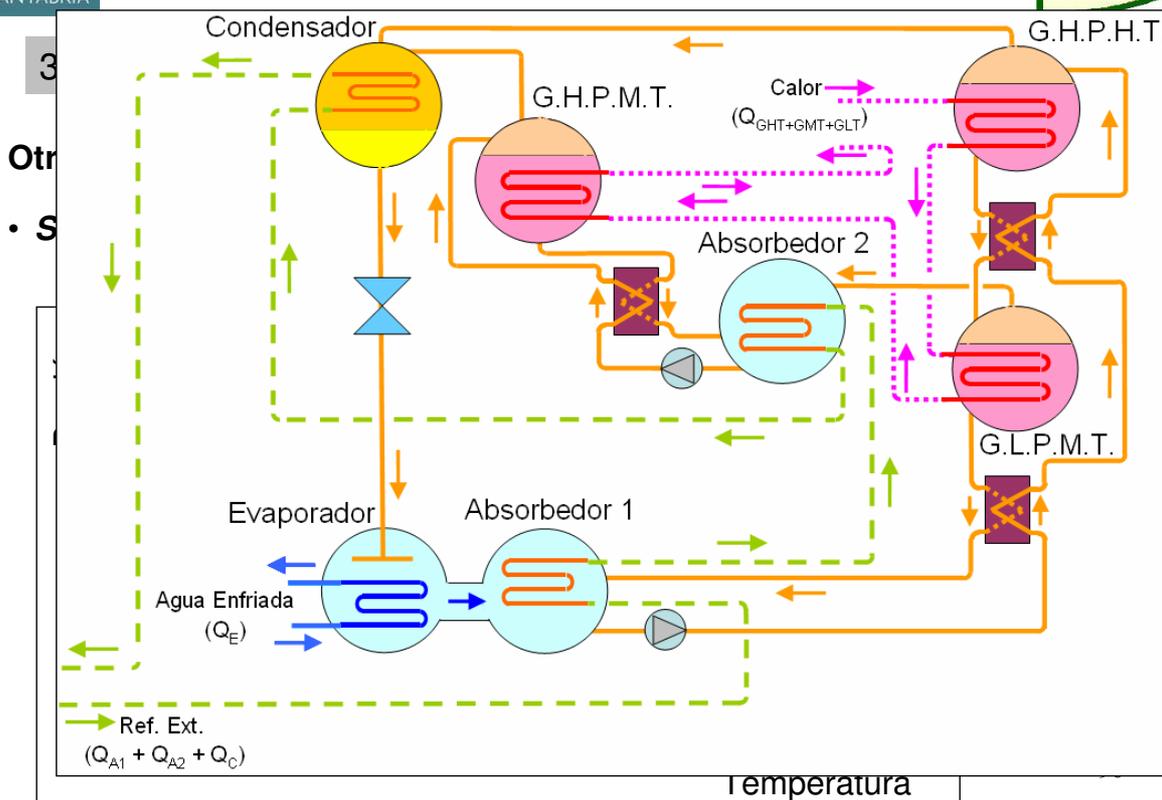
Otros ciclos de absorción (IV)

• **Single-effect/double-lift:**

- Busca conseguir gran enfriamiento en el agua de alimentación al generador

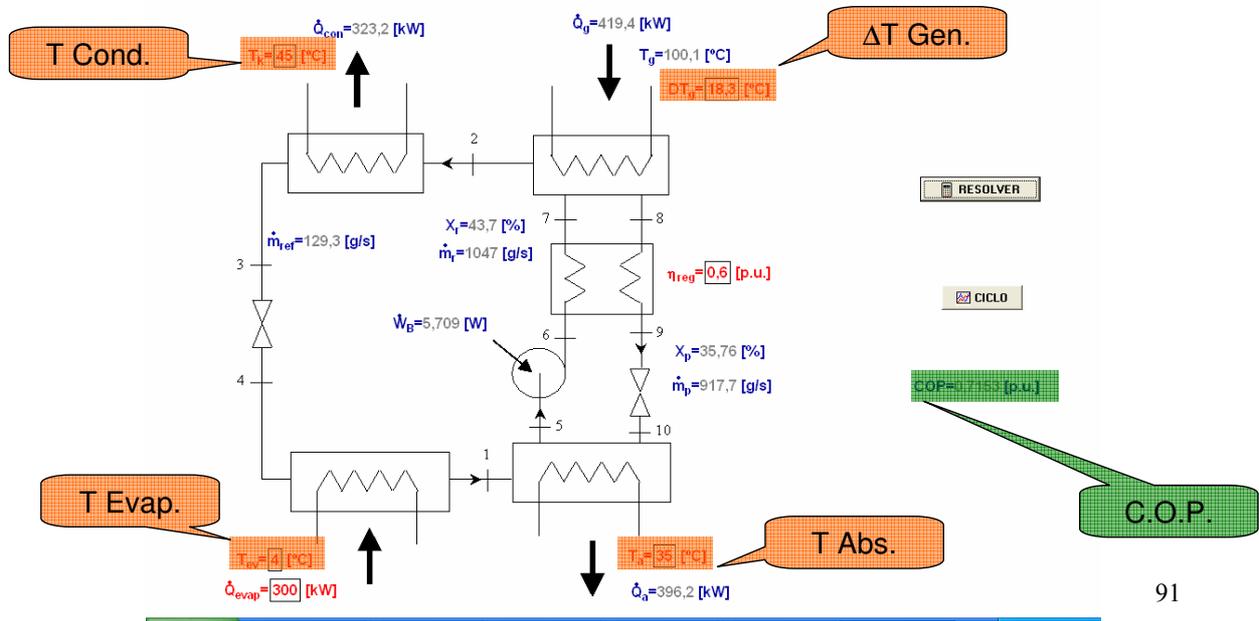


89



3.- Refrigeración por Absorción (XIV)

EES Distributable C:\Documents and Settings\renedoc.UNICAN\wis documentos\MANUALES Y PROGRAMAS\Prog-Manuales\Absorción\H2O-LIBR.EXE ...



Un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor funciona con R12 entre las temperaturas de saturación de -20°C en el evaporador y $41,64^{\circ}\text{C}$ en el condensador. Calcular la capacidad de refrigeración, el coeficiente de operación (COP) y el cociente entre la potencia consumida por el compresor en hp y la capacidad de refrigeración en ton si el flujo másico de refrigerantes es de $0,6 \text{ kg/s}$.

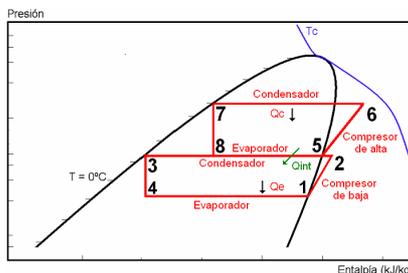
Un ciclo ideal de refrigeración por compresión del problema anterior experimenta los siguientes cambios:

- El refrigerante a la salida del evaporador está recalentado hasta -10°C
- El refrigerante a la salida del condensador está subenfriado hasta 40°C
- El compresor tiene un rendimiento adiabático del 80%

Calcular la capacidad de refrigeración real y el COP

93

Un ciclo de dos etapas de refrigeración sustituye al ciclo del problema 1. Calcular la capacidad de refrigeración y el COP y comparar los resultados con los del problema 1. Utilizar un caudal másico en el ciclo de baja de $0,6 \text{ kg/s}$



94

Una máquina de absorción de LiBr Agua funcionando con $T_{gen.} 70^{\circ}C$, $T_{evap.} 10^{\circ}C$, $T_{cond.} 30^{\circ}C$ y eficacia del intercambiador de la solución del 75%. Se desea conocer el COP del sistema suponiendo $T_{abs.} = T_{cond.}$.

Bibliografía del Tema



La Producción de Frío
Ejercicios de Producción de Frío
E. Torrella



Cálculos en Instalaciones Frigoríficas
J.M Pinazo

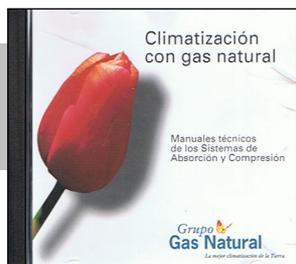
Frío Industrial
P. C. Koelet



Bibliografía del Tema



ASHRAE HANDBOOKS (CD's)
Fundamentals; Cap 1
Refrigeration; Cap 41



Climatización con Gas Natural
Sistemas de Absorción y Compresión
Gas Natural

Revistas nacionales:

- El Instalador
- Montajes e Instalaciones

