



Módulo 2

Desarrollos del mercado de las bombas de calor

Elaborado por el LEI (Instituto Lituano de la Energía)



Co-funded by
the European Union



Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



Resumen del módulo 2



Este módulo repasa la evolución actual del mercado en el ámbito de la tecnología de bombas de calor, explicando cómo los cambios en los refrigerantes, el diseño de los ciclos termodinámicos y la innovación en los componentes están dando forma a los sistemas comerciales y domésticos actuales. Describe cómo los fabricantes integran sistemas de compresión avanzados, refrigerantes naturales e intercambiadores de calor de alta eficiencia para cumplir con los requisitos medioambientales y de rendimiento cada vez más estrictos.

Contenido del módulo 2

Lección 9	Ciclo de compresión estándar		
Lección 10	Ciclo de inyección de vapor		
Lección 11	Sistemas de bomba de calor en cascada		
Lección 12	Sistemas transcíticos de CO ₂		
Lección 13	Refrigerantes naturales en sistemas domésticos		

LECCIÓN 9

Ciclo de compresión estándar



Co-funded by
the European Union



Objetivos de la lección 9

1. Presentar el ciclo de compresión de vapor de una sola etapa
2. Descripción general de las unidades de bomba de calor comerciales típicas que utilizan este ciclo
3. Principales indicadores que caracterizan el proceso de funcionamiento de las bombas de calor y sus consecuencias en el entorno humano

9.1 Introducción

Tendencias:

- La tecnología más habitual en aplicaciones de climatización son los compresores de vapor de una sola etapa – base activa desde hace varias décadas
- El enfoque actual está en la reducción del potencial de calentamiento global (GWP) junto con el aumento de la eficiencia de las unidades de bomba de calor, creciente adopción de refrigerantes de bajo GWP, como el R32, R454B o el R290
- Expansión del mercado de bombas de calor comerciales modulares con potencias de hasta 1 MW y superiores

Las bombas de calor comerciales de una sola etapa siguen el ciclo simple de compresión de vapor, que consta de cuatro componentes principales:

- evaporador,
- compresor,
- condensador y
- válvula de expansión.



Co-funded by
the European Union



9.1 Introducción

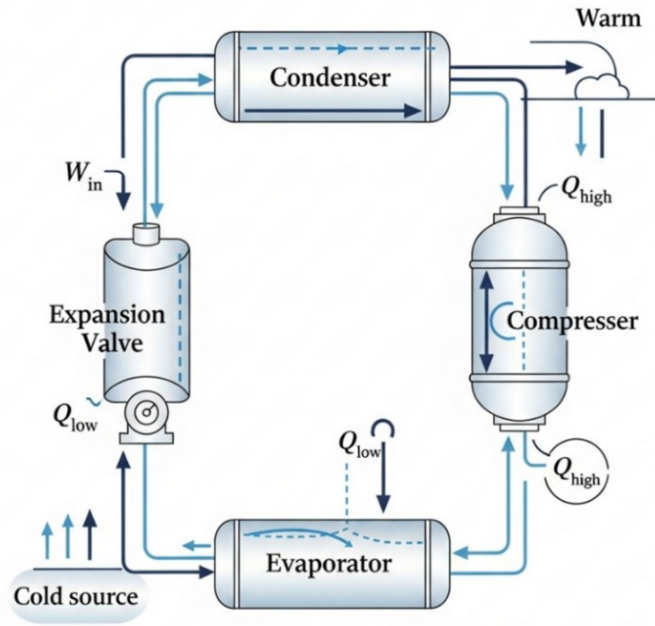


Diagrama de flujo del proceso

- Evaporador:
El líquido refrigerante se evapora a baja temperatura y baja presión (~3–5 bar), absorbiendo calor de la fuente (normalmente aire o suelo)
- Compresor:
El compresor comprime el vapor que sale del evaporador, aumentando su presión (hasta 20 bar) y su temperatura
- Condensador:
El vapor a alta presión transfiere calor al circuito de calefacción de agua o al ambiente a 40–60 °C, condensando en el proceso
- Válvula de expansión:
Reduce bruscamente la presión del líquido caliente y a alta presión que sale del condensador; en el proceso se forma algo de vapor y se enfría considerablemente todo el fluido

9.1 Introducción

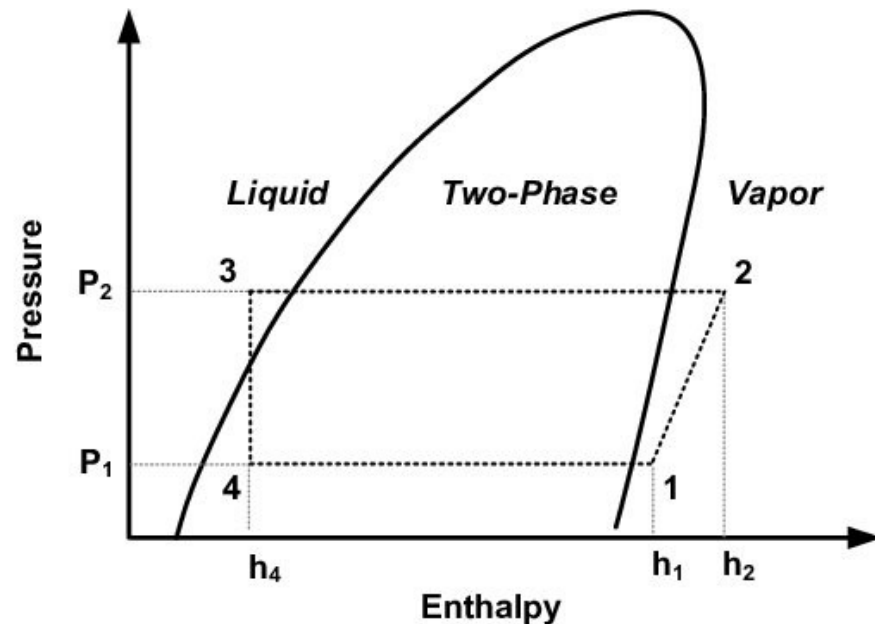


Diagrama P-h (ciclo ideal)

- Compresión (1→2): Compresión isentrópica ideal; el trabajo real supera al ideal debido a ineficiencias
- Condensación (2→3): Disipación de calor isobárica
- Expansión (3→4): estrangulamiento isentálpico
- Evaporación (4→1): comienza la absorción de calor

9.2 Productos comerciales

Mercado

- A escala europea: potencias de 1 kW a 500 kW por unidad
- Los líderes de la UE, Danfoss, Ochsner y Bosch, ofrecen productos diseñados para los refrigerantes R32 y R454B
- Mitsubishi Electric y Daikin (Japón) destacan por los compresores inverter de velocidad variable avanzados con mantenimiento predictivo y gestión energética basados en IA, adecuados tanto para edificios comerciales como para aplicaciones de calefacción urbana
- LG Electronics (Corea del Sur) integra el funcionamiento inteligente en un ciclo de una sola etapa, centrándose en la adaptabilidad a la infraestructura urbana y a las fuentes de energía renovables
- Objetivos actuales: emplear refrigerantes con menor potencial de calentamiento global (GWP) y mantener altos valores de COP

9.2 Productos comerciales

Resumen

Fabricante (Región)	Rango de potencia (kW)	Refrigerante	Temperatura máxima de funcionamiento (°C)	Rango de COP	Innovaciones destacadas
Danfoss (Europa)	5 – 240	R32, R454B	90	3,5 – 5,0	Compresores scroll avanzados con inyección de vapor para climas fríos
Ochsner (Europa)	30 – 350	R290, R32	80	4,0 – 5,2	Enfoque en refrigerantes naturales y productos modulares
Bosch Thermotechnik (Europa)	20 – 500	R32	75	3,6 – 4,8	Controles integrados y sistemas híbridos
Mitsubishi Electric (Japón)	10 – 300	R32, R410A	75	3,6 – 5,1	Compresores scroll de alta eficiencia con inversor, algoritmos avanzados de descongelación
Daikin (Japón)	20 – 450	R32, R410A	85	3,8 – 5,3	Opciones multisplit, sistemas de control basados en IA para la eficiencia energética
LG Electronics (Corea del Sur)	10 – 300	R32, R410A	75	3,5 – 5,0	Controles inteligentes IoT con caudal de refrigerante variable y compatibilidad con sistemas de distrito



9.3 Indicadores de rendimiento (I)

Indicadores de rendimiento	
<i>Coeficiente de rendimiento (COP)</i>	El COP cuantifica la relación instantánea entre la potencia calorífica útil y la energía eléctrica consumida en condiciones definidas. Los sistemas comerciales europeos recientes presentan valores de COP de entre 3,5 y 5,2 en puntos de potencia nominal estándar (A7/W35). Las temperaturas ambiente más bajas reducen el COP debido al mayor trabajo del compresor y a menores tasas de extracción de calor.
<i>Factor de rendimiento estacional (SPF)</i>	El SPF proporciona una medida de eficiencia media a lo largo de la temporada de calefacción, incluyendo efectos transitorios como el funcionamiento a carga parcial y los ciclos de descongelación. Estudios de campo europeos indican valores de SPF que oscilan entre 3,2 y 4,8 dependiendo del clima y del diseño del sistema.
<i>Índice de eficiencia energética integrada (IEER)</i>	Relevante para modos en los que predomina la refrigeración, el IEER pondera el EER a distintos niveles de carga parcial para aproximarse a una eficiencia realista. Los valores de IEER de las unidades modernas se sitúan entre 12 y 18.

9.3 Indicadores de rendimiento (I)

Índices económicos	
<i>Período de amortización simple (SPP)</i>	Calculado como la relación entre el coste de inversión incremental y el ahorro anual en costes energéticos, las bombas de calor comerciales en Europa suelen tener períodos de amortización de entre 3 y 5 años cuando sustituyen a calderas de combustibles fósiles, lo que refleja la disminución de los costes de capital y el aumento de los precios de los combustibles.
<i>Coste nivelado de la calefacción (LCOH)</i>	El LCOH integra los gastos de capital, el mantenimiento, los costes operativos y los precios de la energía a lo largo de la vida útil del sistema, normalizados por la producción de calor. Las instalaciones comerciales de la UE registran un LCOH de entre 0,04 y 0,07 EUR/kWh.

9.3 Indicadores de rendimiento (I)

Indicadores de rendimiento medioambiental	
<i>Impacto total equivalente de calentamiento (TEWI)</i>	El TEWI engloba las emisiones directas de refrigerante, las emisiones indirectas debidas al consumo de electricidad y las pérdidas de refrigerante al final de la vida útil a lo largo del ciclo de vida. Para una bomba de calor típica de 200 kW con refrigerante R32 y un 2 % de fugas, el TEWI es de aproximadamente 0,45-0,6 t CO ₂ -eq/kW-año, dominado en gran medida por las emisiones indirectas.
<i>Potencial de calentamiento global (GWP)</i>	El cambio del R410A (GWP 2088) a refrigerantes de bajo GWP, como el R32 (GWP 675) y el R454B (GWP 466), reduce significativamente las emisiones directas, lo que constituye un importante factor para el cumplimiento normativo y la aceptación en el mercado.
<i>Índice de energía primaria (PER)</i>	El PER evalúa la eficiencia energética con respecto al consumo de energía primaria teniendo en cuenta las pérdidas de la red. Con factores de red europeos de ~2,5, las bombas de calor comerciales alcanzan valores de PER de entre 1,5 y 2,0, lo que indica un ahorro sustancial de energía primaria.



9.3 Contextos de aplicación (II)

Indicadores de rendimiento medioambiental	
Edificios de oficinas y comerciales	Las capacidades típicas oscilan entre 50 y 350 kW, con sistemas diseñados para el funcionamiento aire-agua, que suministran calor para la calefacción de espacios y agua caliente sanitaria. La modularidad y la tecnología de compresores con inversor se adaptan a cargas variables.
Procesos industriales ligeros	Las bombas de calor se utilizan para el calentamiento de procesos a temperaturas bajas y medias (hasta 85-95 °C), sustituyendo a las calderas de combustibles fósiles y generando un ahorro energético de hasta un 50 %-70 %, con la correspondiente reducción de emisiones.
Redes de calefacción urbana	Las bombas de calor modulares a gran escala con potencias superiores a 500 kW se integran en las redes de calefacción urbana, proporcionando calor renovable de carga base. Los ensayos de campo europeos actuales destacan la integración con la flexibilidad de la red y el almacenamiento estacional.

LECCIÓN 10

Ciclo de inyección de vapor

Objetivos de la lección 10

1. Presentar la compresión en dos etapas con inyección de vapor
2. Presentar diferentes configuraciones de economizador y tanque de expansión, y explicar sus efectos sobre las presiones entre etapas, la temperatura de descarga y la capacidad en climas fríos
3. Posible implementación de diferentes elementos en compresores mejorados con inyección de vapor

10.1 Principios de la compresión en dos etapas con inyección de vapor

En aplicaciones que requieran:

- temperaturas de evaporación muy bajas
- temperaturas de condensación muy altas



- La relación de compresión aumenta demasiado
- La temperatura de salida del compresor aumenta demasiado (degradación del aceite de lubricación, degradación de juntas, etc.)
- El COP disminuye



Posible solución: compresión en dos etapas

- T de funcionamiento del compresor ↓
- Grado de subenfriamiento ↑
- COP del sistema ↑

10.1 Principios de la compresión en dos etapas con inyección de vapor

Concepto: la compresión no se realiza en una única etapa ($P_{ev} \rightarrow P_{cd}$) sino en dos. La primera etapa eleva la presión desde la presión del evaporador hasta una presión intermedia ($P_{ev} \rightarrow P_{int}$). En este proceso el vapor se recalienta. Se procede a enfriarlo inyectando un pequeño caudal de vapor frío procedente de otro lugar del ciclo. La corriente resultante pasa a la segunda etapa de compresión hasta la presión del condensador ($P_{int} \rightarrow P_{cd}$). Esto reduce la temperatura de descarga y el trabajo total de compresión (mejorando el COP).

Ventajas:

- Mejora de la capacidad en climas extremos (calefacción a $< 0^\circ\text{C}$ y refrigeración a $> 35^\circ\text{C}$ de temperatura ambiente)
- Flexibilidad del sistema mediante el control del caudal másico del refrigerante inyectado (ahorro energético)
- La temperatura de descarga del compresor en un ciclo de inyección de vapor es inferior a la de un ciclo convencional de una sola etapa

Compresión en dos etapas (etapa de baja/alta presión):

- Se reduce la relación de presión manejada por cada compresor (se mejora la eficiencia volumétrica, se reducen las temperaturas de descarga y se consigue un funcionamiento más estable)
- Inyección de vapor entre etapas: se inyecta vapor sobrecalentado en una etapa intermedia, lo que permite un caudal másico adicional hacia la etapa de alta presión. Esto aumenta la densidad del vapor comprimido y mejora el COP del sistema.

10.2 Diseño del ciclo y casos de uso para mejorar el rendimiento en climas fríos

Tecnología de compresión de vapor en dos etapas



especialmente para bombas de calor en climas fríos. Existen varios tipos de configuraciones entre etapas

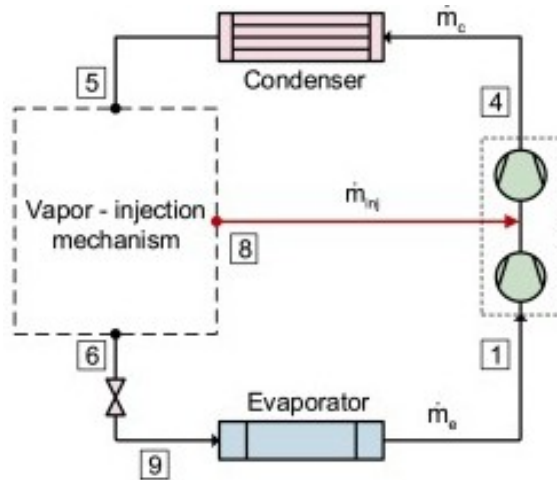
Configuración habitual → inyección de vapor con depósito de expansión y inyección de vapor con economizador (intercambiador de calor interno).



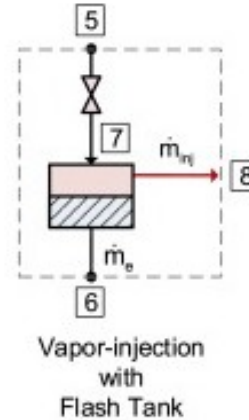
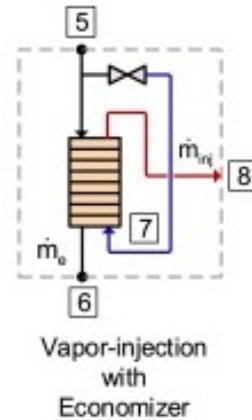
Co-funded by
the European Union



10.2 Diseño del ciclo y casos de uso para mejorar el rendimiento en climas fríos



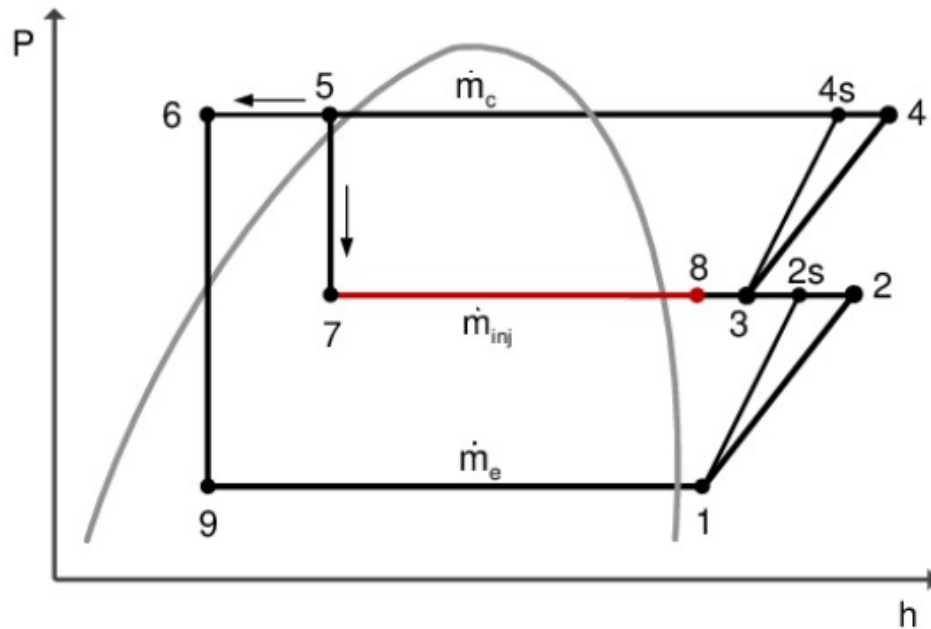
Ciclo de compresión de vapor de dos etapas con inyección de vapor



Combinaciones:

- En el ciclo con tanque de expansión, el refrigerante se expande a una presión intermedia y, a continuación, las fases líquida y gaseosa del refrigerante se separan en el tanque de expansión. El refrigerante gaseoso se inyecta en la etapa intermedia de compresión (8), mientras que la parte líquida (6) se expande hasta la presión de evaporación.
- En el ciclo con economizador, una parte del refrigerante se extrae desde la salida del condensador y se expande a una presión intermedia (7). Esta parte del refrigerante se vaporiza en el economizador mediante intercambio de calor con el resto del refrigerante, y luego se inyecta en la etapa intermedia de compresión (8)
- En ambas configuraciones del ciclo, no se permite que el caudal másico de inyección se expanda hasta la presión del evaporador; por lo tanto, el trabajo de compresión de esta parte del refrigerante es menor

10.3 Diagramas P-h

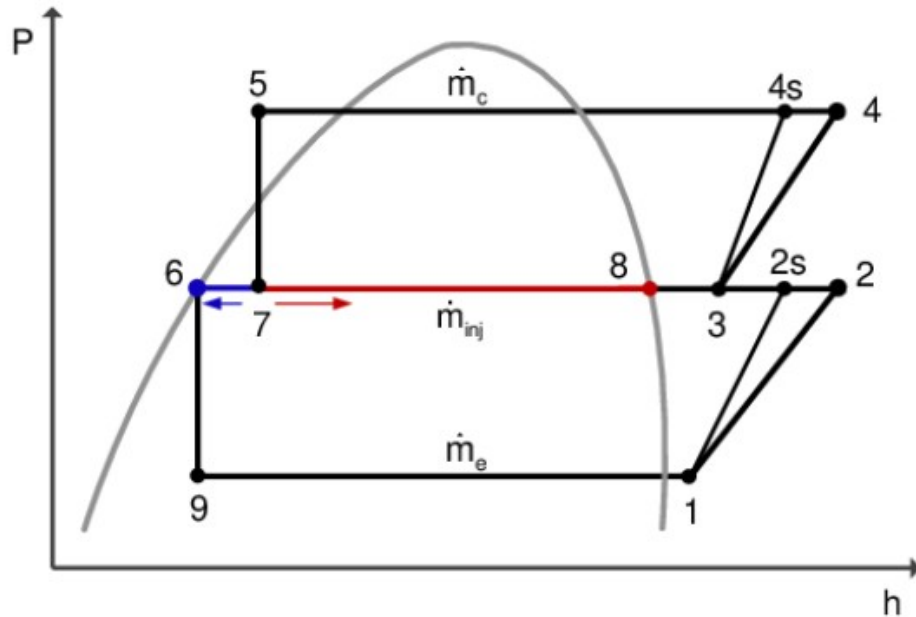


Ciclo de inyección de vapor de dos etapas con economizador

Ciclo con economizador:

- Se extrae una parte del refrigerante (estado 5) y se expande a una presión intermedia (estado 7).
- Esta parte del refrigerante se vaporiza en el economizador (proceso 7-8) mediante intercambio de calor con el resto del refrigerante,
- luego se inyecta (estado 8) en la etapa intermedia de compresión.
- El estado 3 es el resultado de la mezcla del vapor de refrigerante (estado 8 y estado 2) antes de la segunda etapa del compresor
- Otros procesos:
 - el proceso 9 – 1 es la evaporación y el sobrecalentamiento en el evaporador, 1 – 2 es la primera etapa de compresión (1 – 2s – compresión isoentrópica), el proceso 3 – 4 es la segunda etapa de compresión (3 – 4s – compresión isentrópica), el estado 3 es el resultado de la mezcla de vapor de refrigerante (estado 8 y estado 2) y el proceso 4 – 5 son los procesos de condensación y subenfriamiento

10.3 Diagramas P-h



Ciclo de inyección de vapor de dos etapas con depósito intermedio

! En ambas configuraciones del ciclo, no se permite que el caudal másico de inyección se expanda hasta la presión del evaporador

Ciclo con tanque de expansión:

- El refrigerante condensado (estado 5) se expande hasta una presión intermedia (estado 7)
- Las fases líquida (estado 6) y gaseosa (estado 8) del refrigerante se separan en el depósito intermedio
- El refrigerante en fase vapor se inyecta en la etapa intermedia de compresión, mientras que la parte líquida se expande hasta la presión de evaporación (estado 9)

Otros procesos:

- 9 – 1 es la evaporación y el sobrecalentamiento en el evaporador
- 1 – 2 es la primera etapa de compresión (1 – 2s – es la compresión isoentrópica)
- 3 – 4 es la segunda etapa de compresión (3 – 4s – es la compresión isoentrópica)
- el estado 3 es el resultado de la mezcla del vapor refrigerante (estado 8 y estado 2)
- 4 – 5: procesos de condensación y subenfriamiento en el condensador



Co-funded by
the European Union

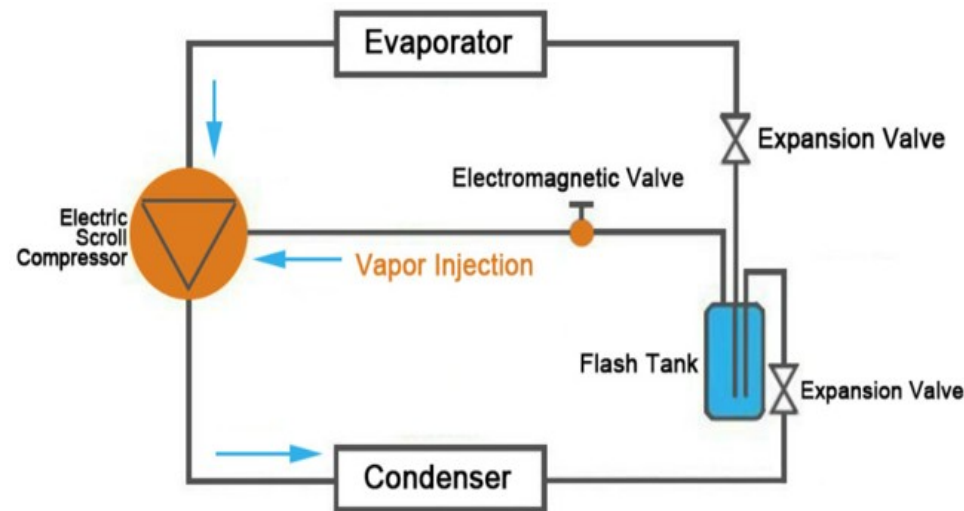


10.4 Sistemas comerciales con inyección

La siguiente figura muestra el esquema de principio de un sistema de inyección de vapor que utiliza:

- Un "Flash Tank" o depósito intermedio
- Un compresor scroll con puerto de inyección de vapor. Este vapor se inyecta en una posición intermedia de la cámara de compresión, enfriando el vapor que está siendo comprimido y mejorando significativamente las prestaciones del ciclo

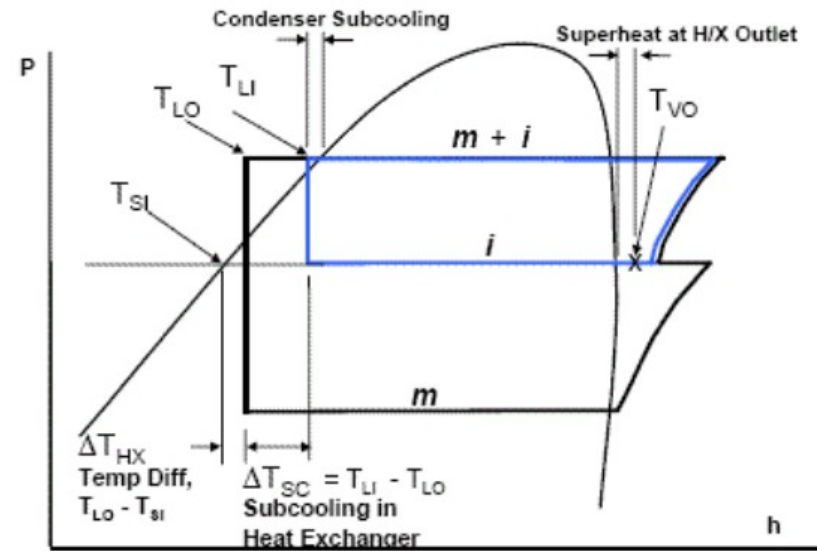
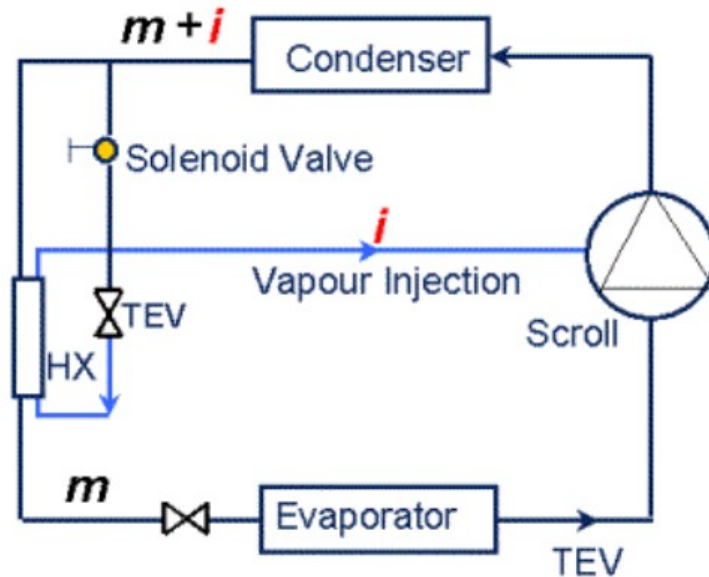
Nótese que el sistema no utiliza dos compresores independientes.



Tecnología de «inyección de vapor mejorada»

10.4 Sistemas comerciales con inyección

La siguiente figura ilustra otra técnica para generar el vapor que se inyecta: utilizar un economizador



Co-funded by
the European Union



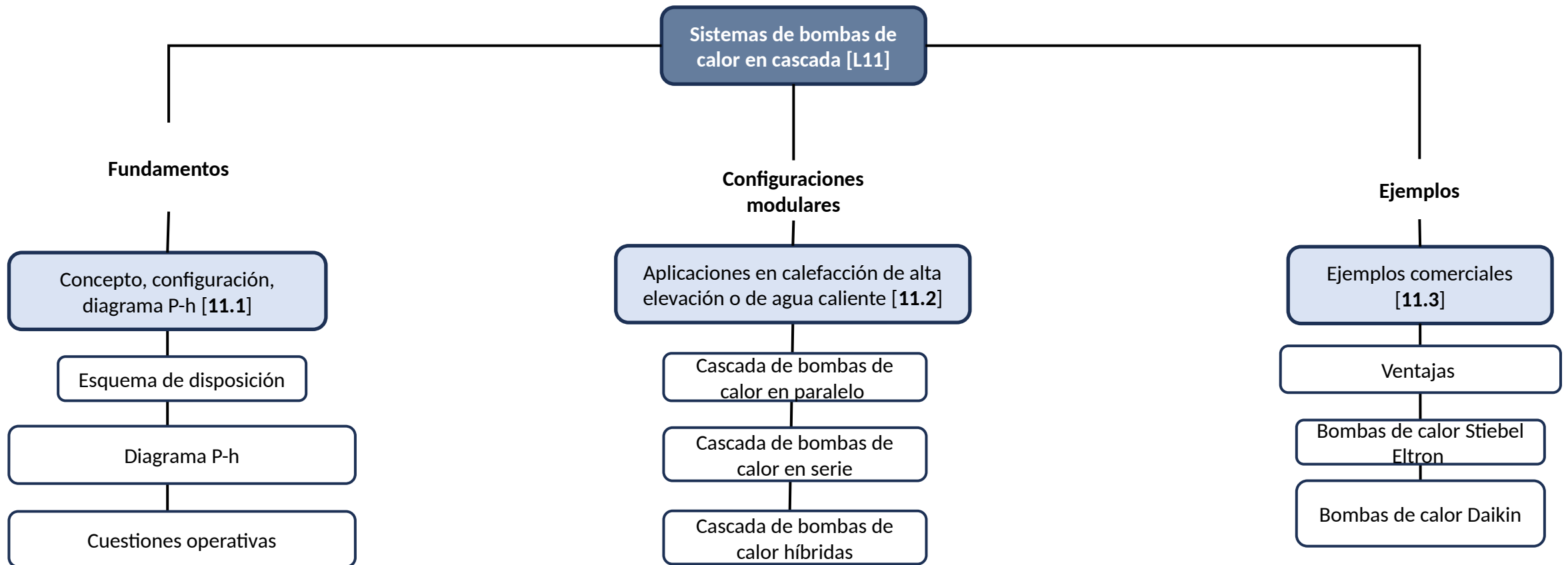
LECCIÓN 11

Sistemas de bombas de calor en cascada

Objetivos de la lección 11

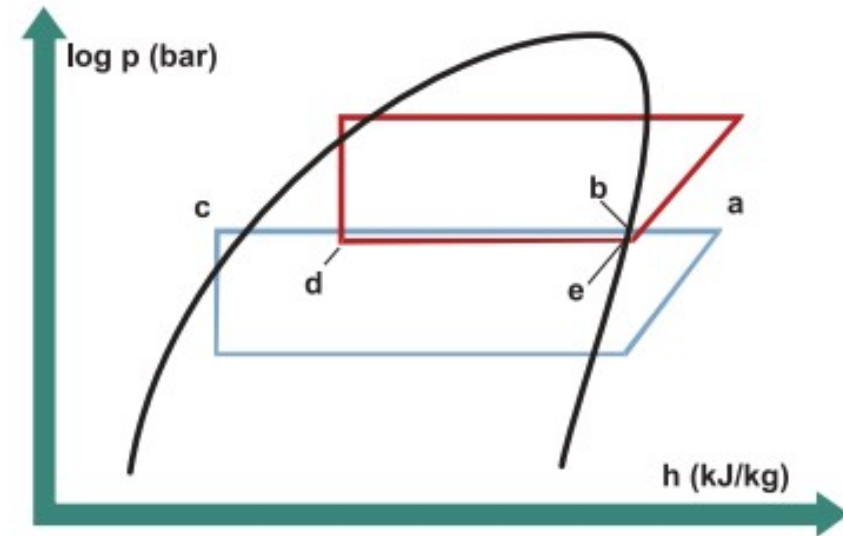
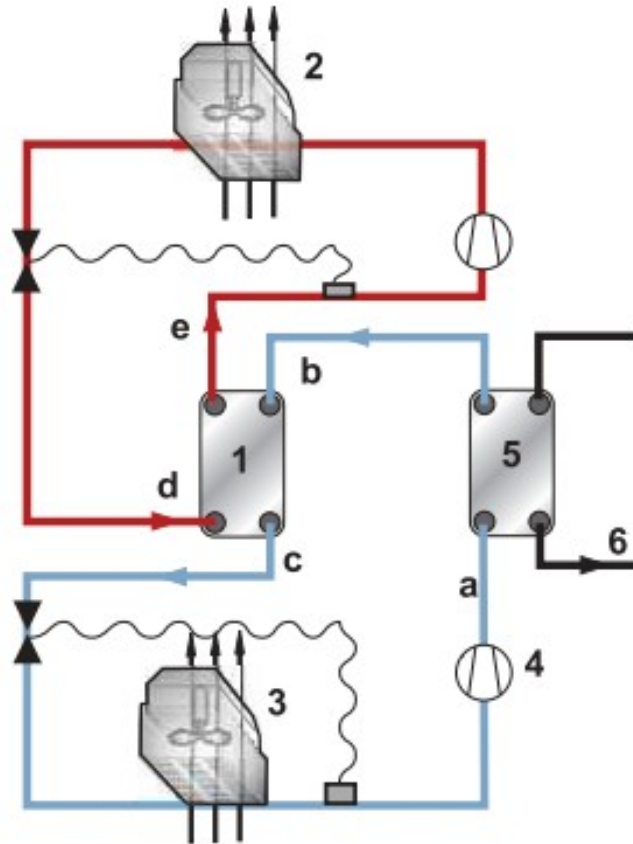
1. Presentar el concepto de sistemas en cascada, describiendo la separación entre los circuitos de baja y alta temperatura
2. Interpretación del diagrama P-h
3. Describir el funcionamiento del intercambiador de calor en cascada y la selección del refrigerante
4. Comprender las diferentes aplicaciones que requieren diferencias de temperatura elevadas, incluidas las configuraciones en paralelo, en serie e híbridas

Contenido de la lección 11



11.1 Concepto, configuración de los ciclos en cascada, diagrama P-h

- (1) Intercambiador de cascada
- (2) Condensador de aire ambiente
- (3) Evaporador de aire a baja temperatura
- (4) Etapa del compresor de baja temperatura
- (5) Desupercalentador BPHE
- (6) Agua caliente sanitaria



11.1 Concepto, configuración de los ciclos en cascada, diagrama P-h

Selección del refrigerante

Ciclos de refrigeración multietapa

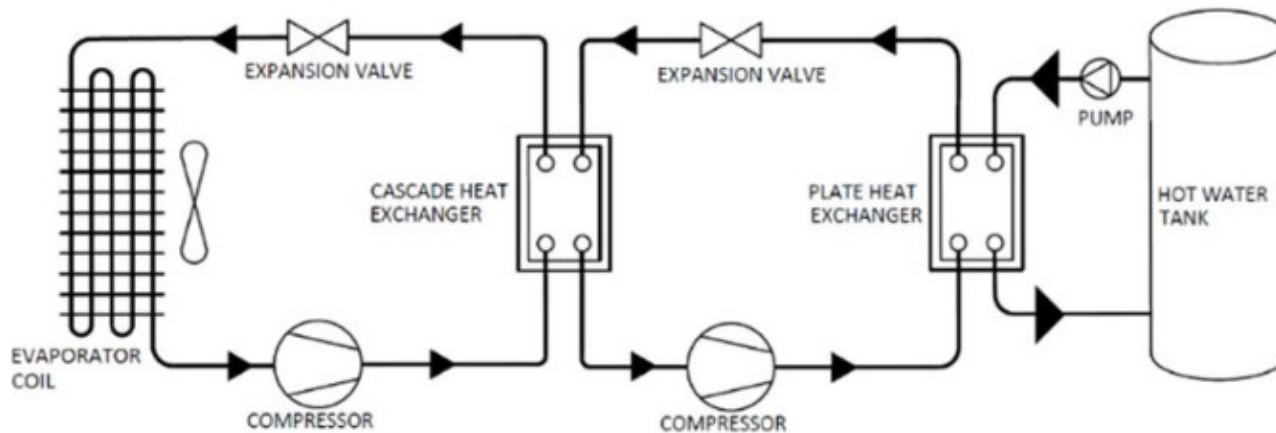
- El mismo refrigerante debe funcionar a los niveles de presión más altos y más bajos. La selección del refrigerante para evitar presiones excesivamente altas en el condensador ambiente y presiones de evaporación inferiores a una atmósfera en el evaporador frío puede resultar difícil.
- Mayor riesgo de que el aire y la humedad se filtren en el sistema, lo que conduce a un rendimiento reducido del sistema.
- Mayor riesgo de distribución desigual del aceite.

Sistemas en cascada

Ventaja principal: las dos etapas no contienen necesariamente los mismos refrigerantes.

- El intercambiador de calor en cascada está expuesto a fluctuaciones de T y p.
- Para evitar el riesgo de fatiga térmica en el interior de la unidad en cascada debido a un ΔT muy elevado, se recomienda la instalación de un desupercalentador (5).
- El desupercalentador reduce la temperatura del gas de entrada del lado de condensación de la unidad en cascada, al tiempo que utiliza la energía de sobrecalentamiento para producir agua a alta temperatura (6).

11.2 Aplicaciones en sistemas de calefacción de alta potencia o de agua caliente



Cascada de bombas de calor híbridas (aire-agua)

El sistema de bomba de calor en cascada consta de dos ciclos de refrigerante: el ciclo de etapa baja y el de etapa alta, conectados mediante un intercambiador de calor en cascada.

El intercambiador de calor en cascada funciona como condensador para el ciclo de baja potencia y como evaporador para el ciclo de alta potencia.

La combinación de sistemas de bombas de calor en cascada, en serie y en paralelo, se utiliza en sistemas de calefacción más complejos o de mayor tamaño con requisitos variables en cuanto a escalonamiento de potencia, niveles de temperatura o redundancia.

Las aplicaciones típicas son:

- Etapas de alta y baja temperatura
- Calor de proceso o agua caliente sanitaria
- Sistemas de calefacción híbridos con recuperación de calor
- Sistemas reversibles para calefacción y refrigeración

11.3 Ejemplos comerciales



Ejemplo de un sistema de bombas de calor en cascada



Co-funded by
the European Union



Las bombas de calor se están convirtiendo en una opción popular y fiable para una calefacción eficiente; sin embargo, en los edificios comerciales de gran tamaño con importantes necesidades de calefacción y agua caliente, a menudo una sola unidad de bomba de calor resulta insuficiente. Para estos casos de alta demanda, un sistema de bombas de calor en cascada puede ser la solución ideal.

Estos sistemas están diseñados para ajustar su potencia de forma dinámica: cuando la demanda es alta, todas las unidades pueden trabajar juntas para proporcionar una gran potencia combinada, mientras que durante los periodos de menor demanda, pueden funcionar individualmente o a potencias reducidas. Esta flexibilidad mejora la eficiencia energética al evitar el consumo innecesario.



11.3 Ejemplos comerciales

Altas temperaturas.

Los sistemas en cascada alcanzan altas temperaturas, lo que significa que son especialmente eficaces para el suministro de agua caliente sanitaria. Satisfacen las fluctuaciones en la demanda de temperatura. Los sistemas en cascada pueden suministrar una amplia gama de temperaturas, desde bajas utilizando solo la primera etapa hasta altas con ambas etapas al máximo. Esto permite controlar la calefacción con compensación climática de una forma muy flexible.



Ejemplo de un sistema en cascada de bombas de calor Stiebel Eltron

Co-funded by
the European Union



Solución de bombas de calor en cascada de Daikin para altas temperaturas del agua.

El sistema en cascada de Daikin consiste en una solución con una unidad refrigerada por aire y otra refrigerada por agua que funcionan conjuntamente para alcanzar altas temperaturas de salida del agua, lo que lo hace adecuado para proyectos de rehabilitación. En edificios antiguos sin planes de mejora del aislamiento, pueden ser necesarias temperaturas del agua más altas para igualar las temperaturas del agua proporcionadas por la solución de caldera existente. Daikin puede proporcionar hasta 75 °C en una solución en cascada en la que las unidades de bomba de calor aire-agua y agua-agua funcionan conjuntamente.



LECCIÓN 12

Sistemas transcríticos de CO₂



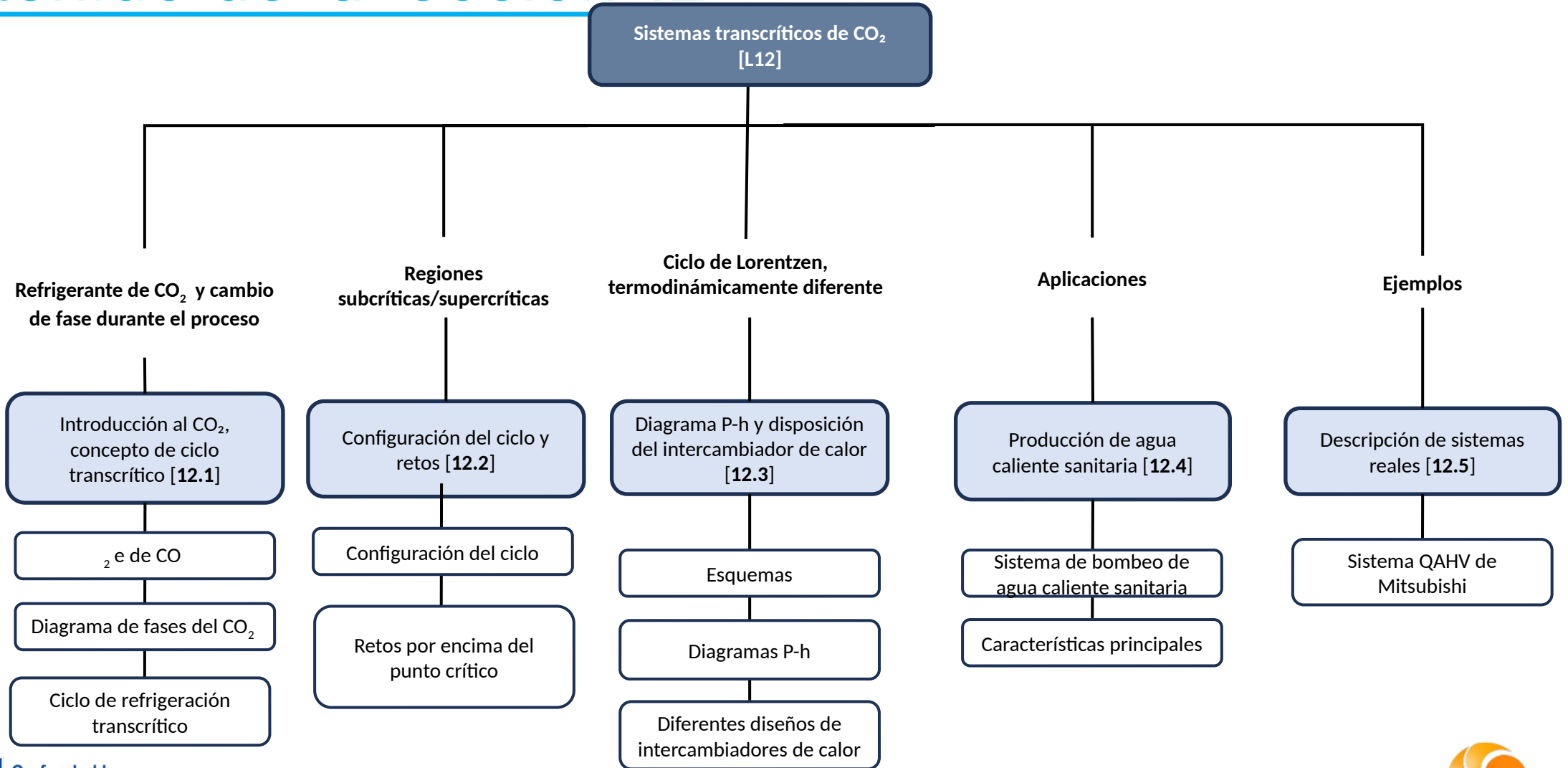
Co-funded by
the European Union



Objetivos de la lección 12

1. Descripción general de los sistemas transcríticos con refrigerante CO₂
2. Presentar el concepto de ciclo transcrítico, el diagrama de fases y el ciclo de refrigeración, detallando la función del enfriador de gas, el funcionamiento a alta presión y la influencia de los puntos críticos y triples del CO₂
3. Introducción al ciclo transcrítico real de CO₂ de alta presión (ciclo de Lorentzen)
4. Comparar varias arquitecturas basadas en CO₂ y presentar sistemas comerciales de agua caliente sanitaria (ACS) de alta temperatura (p. ej., Mitsubishi QAHV).

Contenido de la lección 12



12.1 Introducción al CO₂ como refrigerante y al concepto de ciclo transcrítico

El CO₂ es uno de los refrigerantes naturales que pueden utilizarse como fluido de trabajo en diversas aplicaciones de refrigeración, junto con el amoníaco y los hidrocarburos.

Ventajas

- Seguridad: el CO₂ no es tóxico ni inflamable;
- Termodinámica:
 - (a) el CO₂ tiene una temperatura crítica relativamente baja (31,1 °C) y una presión crítica elevada (7,38 MPa);
 - (b) el ciclo transcrítico presenta algunas características únicas, como el proceso de enfriamiento de gas en fase transcrítica, con gran deslizamiento de temperatura, que lo hace ideal para producir agua caliente sanitaria 8 hasta 90°C)
 - (c) la capacidad volumétrica es bastante grande, lo que contribuye al uso de componentes más pequeños para lograr un sistema más compacto y más eficaz;
 - (d) la conductividad térmica del CO₂ es relativamente alta, lo que mejora la transferencia de calor.
- Aspectos ecológicos: su respeto por el medio ambiente y su mejor compatibilidad con los lubricantes habituales.
- Aspectos económicos: precios más bajos

Retos

- requiere componentes robustos y un compresor estable



Co-funded by
the European Union



12.1 Introducción al CO₂ como refrigerante y al concepto de ciclo transcrítico

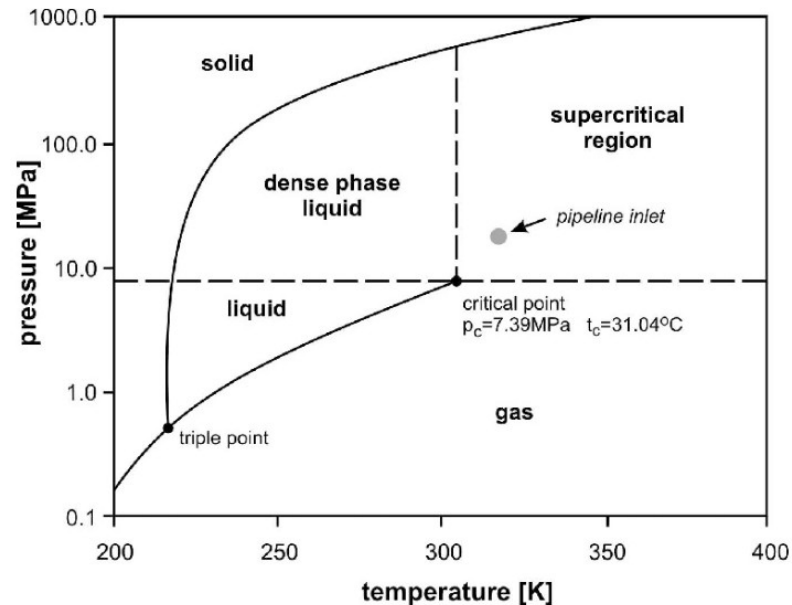


Diagrama de fases del CO₂

Ciclo de refrigeración transcrítico: se produce cuando parte del proceso de refrigeración tiene lugar por encima del punto crítico. La absorción de calor en el evaporador tiene lugar por debajo de p_{cr} . La liberación de calor dentro del enfriador de gas tiene lugar por encima de p_{cr} . Debido a esto, el proceso de transferencia de calor al sumidero ocurre dentro de un rango de temperaturas muy amplio. Esto contrasta con los sistemas de compresores convencionales, en los que la transferencia de calor tiene lugar a una temperatura fija (la de condensación, a excepción del tramo de recalentamiento)

El **punto triple** representa la condición en la que las tres fases pueden coexistir en equilibrio (-56°C; 5.2atm). Por debajo de la temperatura del punto triple, el líquido no puede existir. A presión atmosférica, el CO₂ solo puede existir en estado sólido o gaseoso.

El **punto crítico** marca el límite superior para los procesos de transferencia de calor basados en la evaporación o la condensación. A T y p superiores a las del punto crítico se tiene una fase especial denominada supercrítica, cuyas propiedades se encuentran entre las del líquido y el vapor.

12.2 Configuración del ciclo y retos por encima del punto crítico

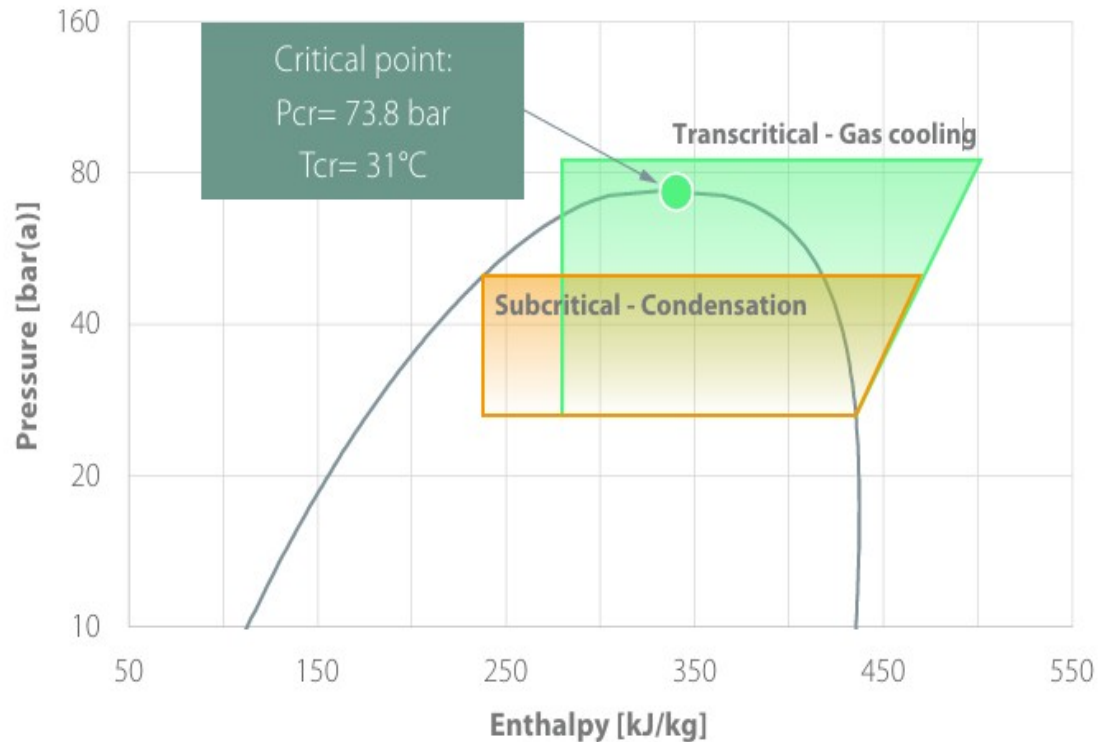
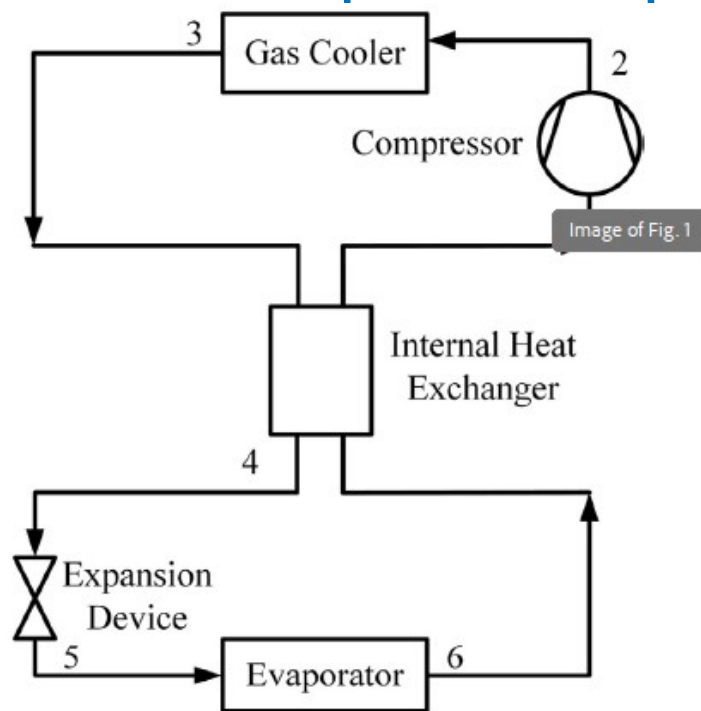


Diagrama P-h

Las bombas de calor transcriticals tienen la misma configuración básica que cualquier bomba de calor de compresión de vapor. Sin embargo, requieren una temperatura de retorno baja ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y pueden suministrar temperaturas de salida elevadas ($> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

- En los ciclos de compresión de vapor, los refrigerantes suelen funcionar en condiciones subcríticas. Un ciclo transcritical es capaz de funcionar tanto en modo subcrítico como supercrítico
- En el modo subcrítico, la disipación de calor se lleva a cabo mediante condensación, mientras que en el modo transcritical se consigue mediante enfriamiento del gas (supercrítico).
- Para cumplir este objetivo, los sistemas de refrigeración de CO₂ emplean un intercambiador de calor específico: un enfriador de gas. El enfriador de gas desempeña un papel fundamental en el sistema de refrigeración de CO₂ al facilitar una transferencia de calor eficiente durante el proceso de enfriamiento del gas.

12.3 Diagrama P-h y diseño del intercambiador de calor específico para sistemas de CO₂



Esquema de la bomba de calor de CO₂ con IHX

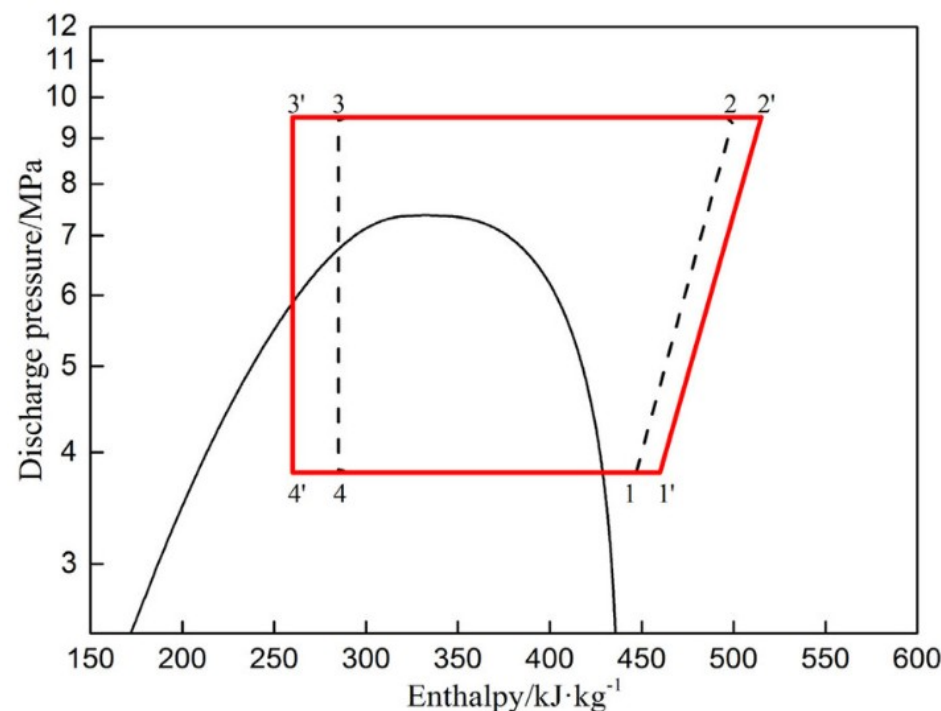


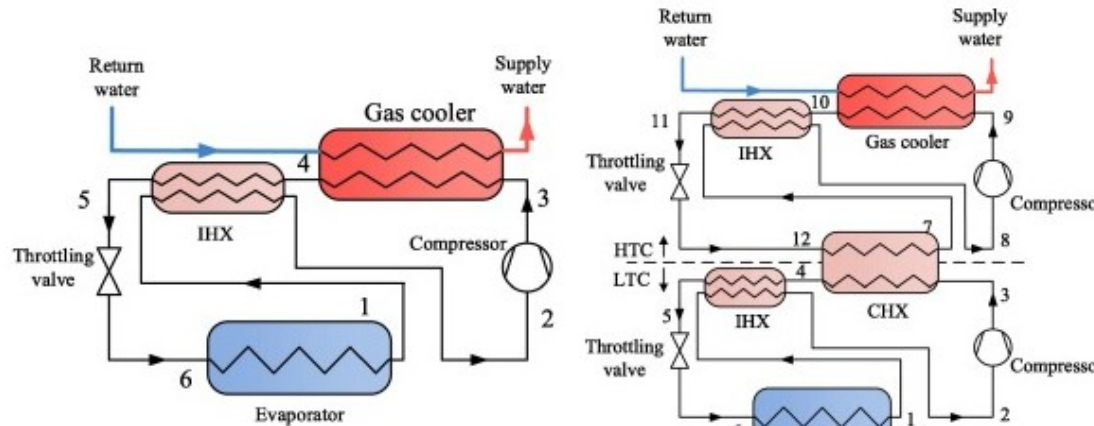
Diagrama de presión-entalpía

1-2-3-4-1: sistema sin IHX
1'-2'-3'-4'-1' : sistema con IHX

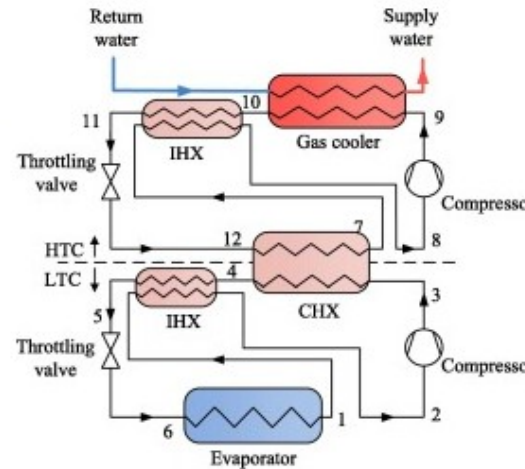
El ciclo teórico:

- 1-2 (1' -2'): Compresión isentrópica en el compresor
- 2-3 (2' -3): Liberación de calor sin cambio de fase en el enfriador de gas
- 3-4 (3' -4): proceso de estrangulamiento isentálpico en la válvula de expansión
- 4-1 (4' -1): Absorción de calor con cambio de fase en el evaporador
- 3-3' y 1-1': Transferencia de calor en el intercambiador de calor interno

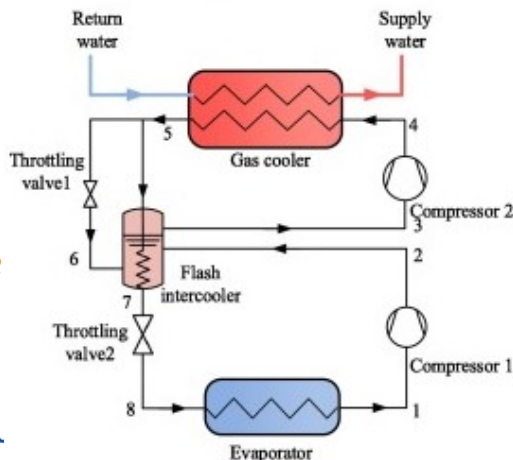
12.3 Diagrama P-h y disposición del intercambiador de calor específicos para sistemas de CO₂



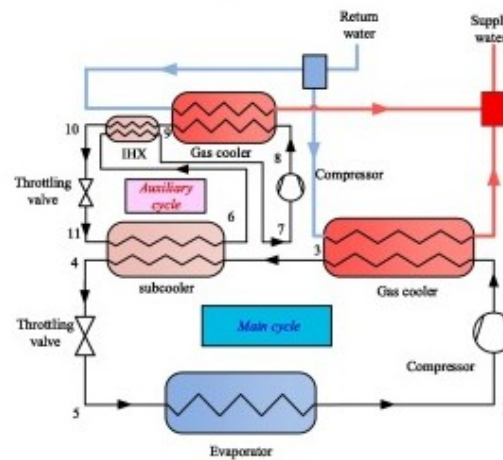
(a) BASE



(b) CHPS



(c) TSCHPS



(d) MSHPS

Diagramas esquemáticos de los sistemas de bomba de calor de CO₂

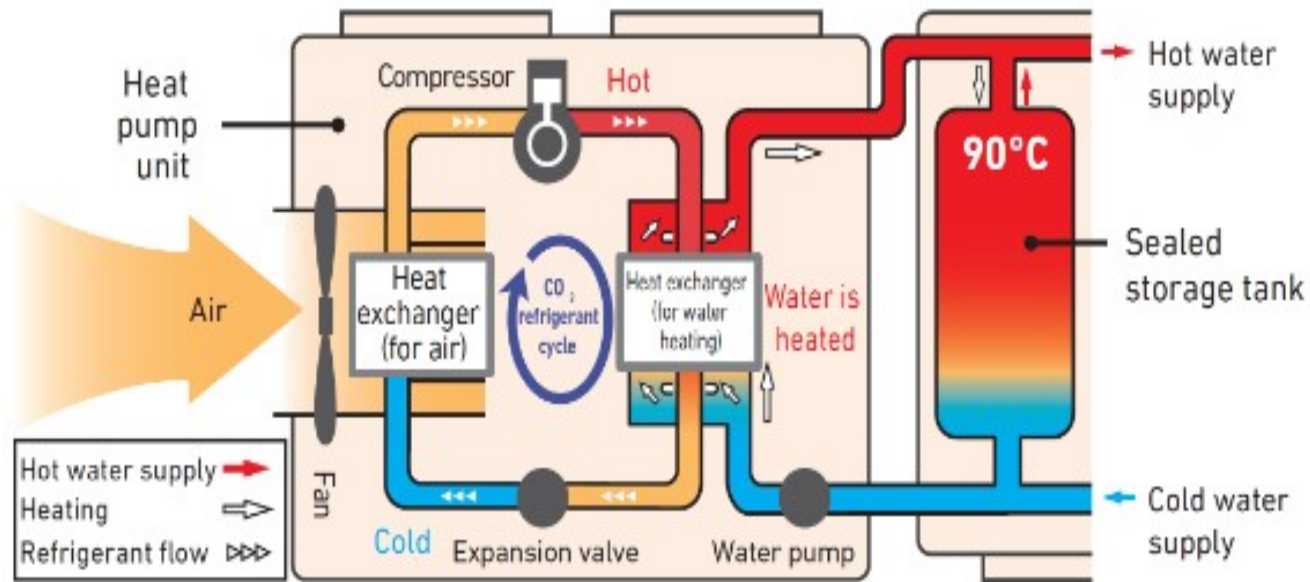
BASE: sistema de alta presión transcrítico de CO₂ convencional,

CHPS: sistema de alta presión en cascada de CO₂/CO₂,

TSCHPS: sistema de bomba de calor de CO₂ con compresión en dos etapas y flash intermedio,

MSHPS: sistema de bomba de calor de subenfriamiento mecánico CO₂/CO₂.

12.4 Casos de aplicación: Producción de agua caliente sanitaria



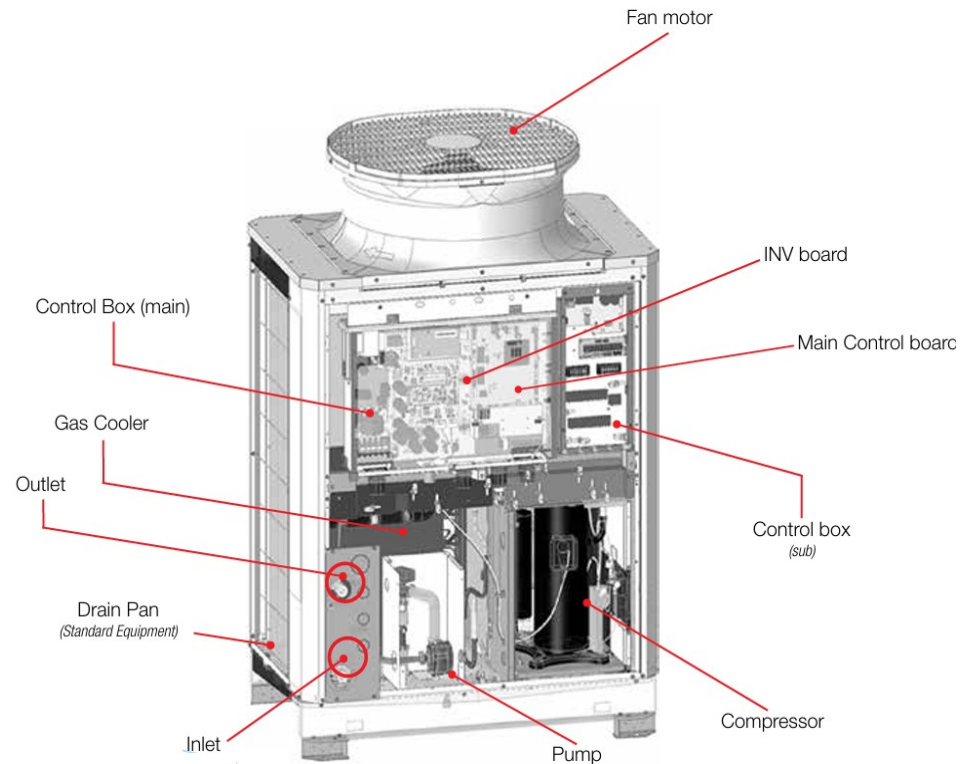
Sistema de bomba de calor de CO₂ para agua caliente a alta temperatura

La tecnología de bombas de calor de CO₂ se ha mejorado continuamente y ahora ofrece importantes oportunidades de ahorro energético y calefacción sostenible.

Sistemas de agua caliente sanitaria con bomba de calor de CO₂:

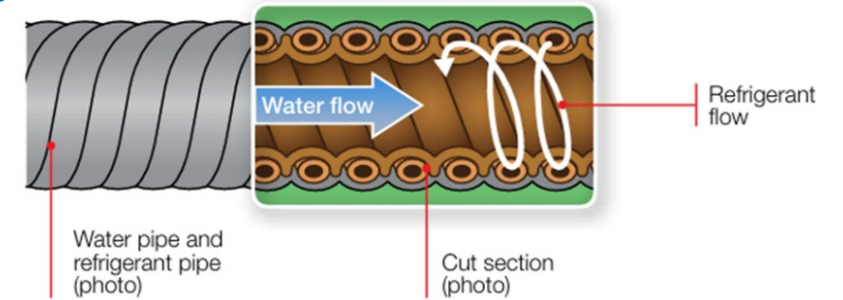
- Utilizan CO₂, un gas refrigerante natural y respetuoso con el medio ambiente
- garantizan un alto nivel de seguridad (la ausencia de combustión reduce el riesgo de incendio)
- producen agua caliente con un COP medio de hasta 4,2
- convierten 1 kW de energía de entrada en 3,9 kW de energía de salida
- producen agua caliente hasta 90 °C, incluso con temperaturas ambiente que bajan hasta los -25 °C
- ofrece soluciones energéticamente eficientes para el agua caliente sanitaria y la calefacción de espacios en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales

12.5 Descripción de sistemas reales

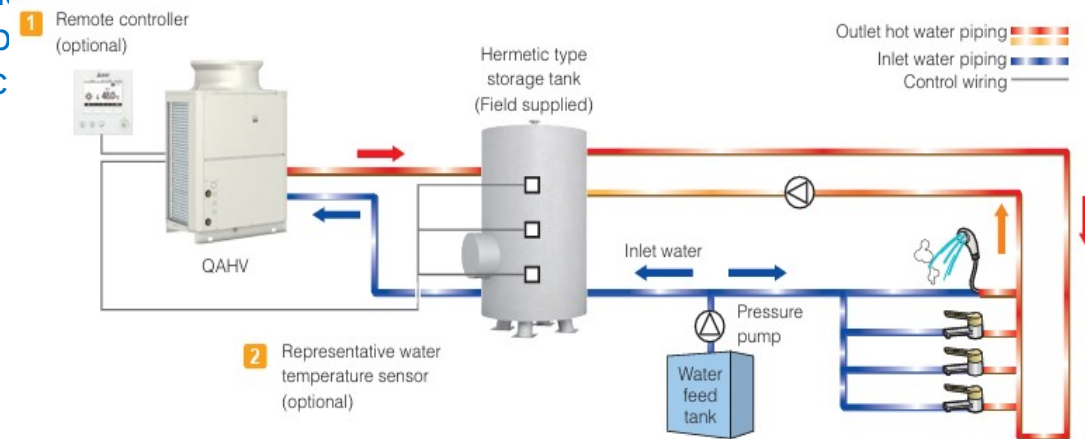


Mitsubishi QAHV

- diseñado exclusivamente para producir agua caliente sanitaria,
- con una temperatura de salida de 65 °C, la QAHV es aproximadamente un 70 % más eficiente que la CAHV de Mitsubishi,
- es capaz de proporcionar una temperatura de salida máxima 20 °C superior a la de otras bombas de agua caliente



Enfriador de gas en espiral y retorcido del Mitsubishi QAHV



Esquema del sistema Mitsubishi QAHV

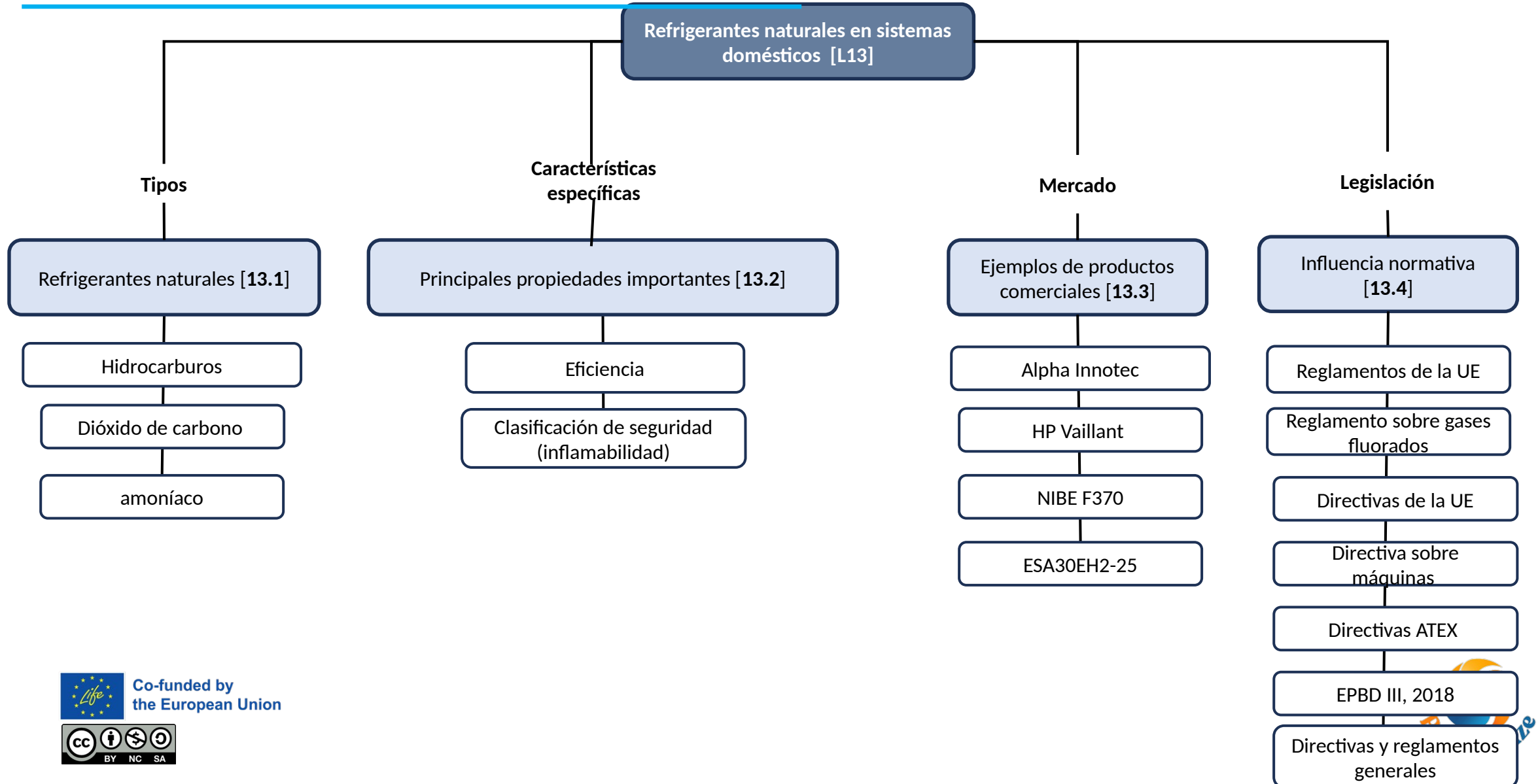
LECCIÓN 13

Refrigerantes naturales en sistemas domésticos

Objetivos de la lección 13

1. Repasar los refrigerantes naturales, abordando su comportamiento termodinámico, clases de seguridad, inflamabilidad y gestión de la toxicidad
2. Presentar productos nacionales
3. Ofrecer una visión general de los marcos normativos de la UE que facilitan la selección de refrigerantes y el diseño de sistemas

Contenido de la lección 13



13.1 Refrigerantes naturales

Los 3 refrigerantes naturales más comunes:

1. hidrocarburos
(adecuados para bombas de calor de menor tamaño, monobloques, sistemas de aire acondicionado split simples, sistemas colectivos y aplicaciones industriales; menos adecuados para sistemas multisplit y VRF de mayor tamaño, debido a los altos costes y a las medidas de seguridad adicionales).
2. Dióxido de carbono CO₂
(adecuado para temperaturas de suministro más altas tanto en bombas de calor pequeñas como grandes)
3. amoníaco
(apto principalmente para bombas de calor industriales)

(1) refrigerantes de hidrocarburos

Name	R number	Atmospheric boiling point (°C)	Pressure at 25°C in bar(a)	Comments
Ethane	R170	-89	24	Rarely used, high pressure
Propane	R290	-42	9.6	Most common
Propene (propylene)	R1270	-48	11.5	Rarely used, specific odour
Butane	R600	0	2.5	High-temperature heat pumps
Isobutane	R600a	-12	3.5	Suitable for small appliances
n-Pentane	R601	36	0.6	High-temperature heat pumps
Propaene	R433A	-44	10.3	Mixture of R290 and R1270, specific odour

PD: todos de clase de seguridad A3 (altamente inflamables)

Los hidrocarburos más utilizados tienen propiedades muy similares a las de los (H)CFC, HFC y HFO convencionales (excepto en cuanto a la inflamabilidad). La elección del aceite rara vez supone un problema.

13.1 Refrigerantes naturales

(2) Dióxido de carbono (CO₂, R744)

uno de los refrigerantes más antiguos del mundo. El CO₂ está clasificado como refrigerante de clase A1 (baja toxicidad, no inflamable). El CO₂ tiene propiedades específicas que lo hacen muy diferente de otros refrigerantes. Estas propiedades diferentes son a veces ventajosas, pero otras veces también desventajosas o restrictivas:

- el punto triple (sólido-líquido-vapor, a -56,6 °C)
- el hielo seco (sólido-vapor, a -78,4 °C)
- punto crítico (diferencia/sin diferencia entre líquido y vapor, a 31 °C).

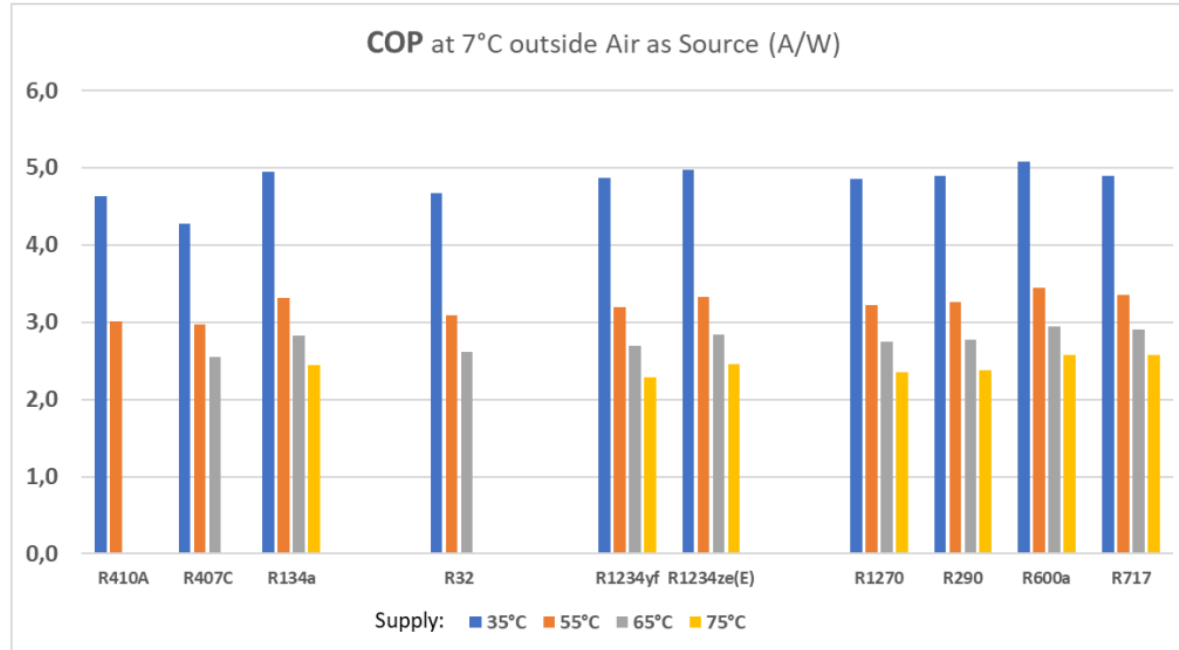
(3) Amoníaco (R717, NH₃)

uno de los refrigerantes más antiguos, fue muy utilizado en los primeros sistemas de refrigeración mecánica. La tecnología sigue evolucionando, es un ámbito de innovación y competencia en el mercado. Es muy eficiente, no produce gases de efecto invernadero y tiene un impacto medioambiental insignificante. El olor acre del amoníaco es una señal de alerta eficaz en caso de una fuga menor. Desventajas:

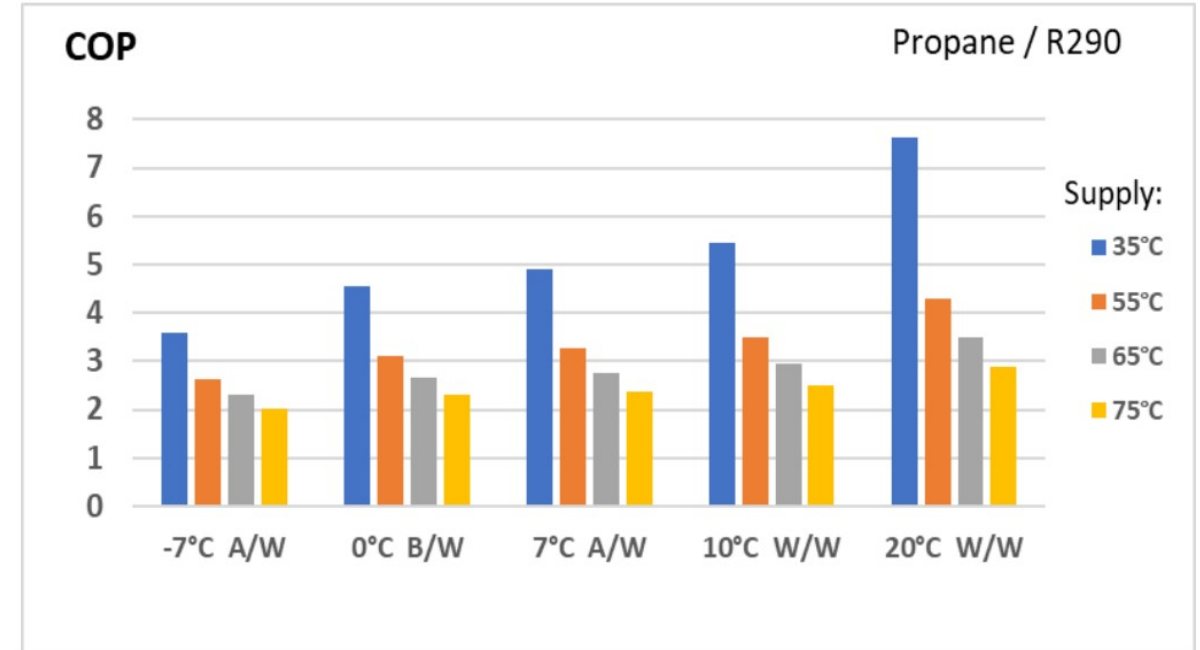
- el cobre (el material más utilizado para las tuberías de refrigerante) no se puede utilizar con amoníaco. Esto implica que se requieren materiales más caros (acero) y conexiones (soldadura).
- es tóxico y ligeramente inflamable (problemas de seguridad, riesgos de corrosión).

13.2 Eficiencia, clasificación de seguridad e inflamabilidad

Eficiencia



COP según el refrigerante



Influencia de las condiciones de funcionamiento del propano (R290)

Nota:

El rendimiento energético de la bomba de calor viene determinado principalmente por la fuente y la temperatura de suministro; también son importantes las condiciones de uso y el comportamiento del usuario. Si todas las condiciones externas son iguales, se obtiene el COP teórico.

Una temperatura de suministro más alta (utilizando propano o CO₂) obviamente también tendrá un impacto.

13.2 Eficiencia, clasificación de seguridad e inflamabilidad

Clasificación de seguridad

En el caso de los refrigerantes naturales (hidrocarburos), estos riesgos están relacionados principalmente con la inflamabilidad.

En el caso del dióxido de carbono, a las altas presiones y a la formación de dióxido de carbono sólido (hielo seco).

En el caso del amoníaco, a la toxicidad.

A2L (R-410A. Entre los ejemplos clave se incluyen el R-32, el R-454B y el R-1234yf): inflamabilidad moderada, baja toxicidad, bajo potencial de calentamiento global (GWP), más seguro que el amoníaco y los hidrocarburos, más eficiente energéticamente que los sistemas de R-410A y CO₂

A3 (R290, R600a, R-170, R-290, R-600, R-600A): baja toxicidad y alta inflamabilidad. Los refrigerantes A3 requieren medidas de seguridad estrictas debido a su naturaleza altamente inflamable, especialmente el R290 y el R600a, en comparación con los A2L.

F I N C M E A B I L I T Y	SAFETY GROUP	
	Higher Flammability	A3 B3
	Flammable	A2 B2
	Lower Flammability	A2L B2L
	No Flame Propagation	A1 B1
	Lower Toxicity	Higher Toxicity
	INCREASING TOXICITY	

Clasificación de seguridad de ASHRAE

13.3 Ejemplos de productos comerciales

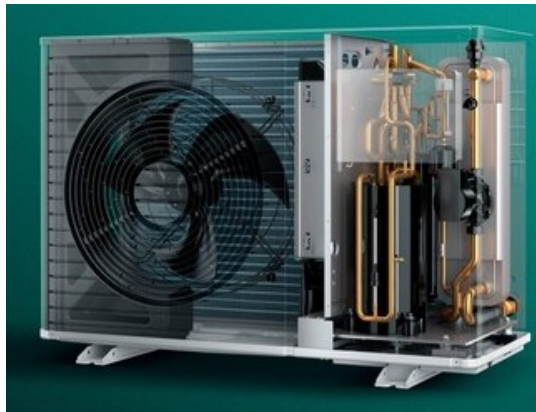
Refrigerantes naturales: amoníaco, el dióxido de carbono y los hidrocarburos (propano por ejemplo).



Fabricante: Alpha Innotec

Bomba de calor Alpha Innotec – LWDV con refrigerante natural (propano – 8 kW), ampliamente utilizada en el mercado doméstico y en pequeñas empresas.

Ventajas: La mejor de su clase: versátil y eficiente; funciona siempre bajo demanda; alcanza altas temperaturas de impulsión, lo que la hace ideal para su uso en proyectos de renovación.



Fabricante: HP Vaillant

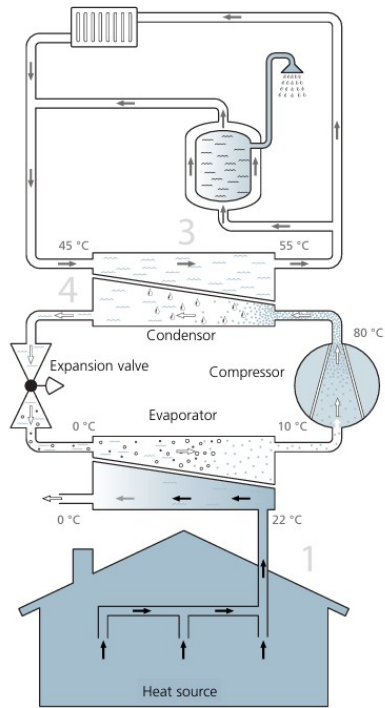
Bomba de calor aire-agua: bomba de calor aroTHERM plus de fuente de aire de 12 kW. Utiliza el refrigerante natural R290 para alcanzar temperaturas de impulsión más altas, de hasta 75 °C. Adecuada para todas las aplicaciones, esta bomba de calor de fuente aire puede utilizar los radiadores existentes y funciona hasta -25 °C.



El uniTOWER es un cilindro integrado de 190 litros con componentes hidráulicos que puede proporcionar fácilmente agua caliente suficiente para las necesidades de una familia de cinco miembros. Gracias a sus dimensiones compactas, el sistema es la elección perfecta para edificios de nueva construcción.



13.3 Ejemplos de productos comerciales

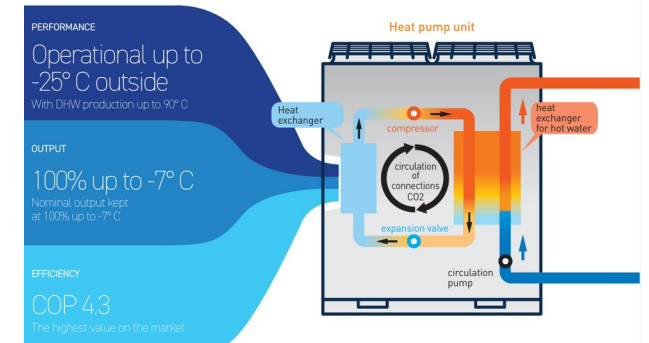


← Fabricante, NIBE F370

Un ventilador de CC integrado + calentador de agua con protección anticorrosión, + un calentador de inmersión integrado. Está diseñado para circuitos de radiadores dimensionados para bajas temperaturas y/o calefacción por suelo radiante. El NIBE F370 puede conectarse a redes de calefacción urbana, leña, gasóleo y gas. Utiliza el refrigerante R290 (propano), respetuoso con el medio ambiente.

Fabricante, MHI

→
aire-agua, Q-ton | ESA30EH2-25, agua caliente sanitaria. Compresor GSR de doble etapa. Se pueden controlar hasta 16 unidades exteriores mediante un único control. Potencia máxima: 480 kW. Posibles instalaciones en grandes edificios de apartamentos nuevos o en edificios de apartamentos muy grandes con sistemas de calefacción urbana existentes.



13.4 Influencia normativa

Reglamentos de la UE relativos a los refrigerantes: actos legislativos que se aplican de forma automática y uniforme y que son jurídicamente vinculantes para todos los Estados miembros de la UE; la capa de ozono: las obligaciones del Protocolo de Montreal.

Reglamento sobre gases fluorados: obligaciones del Protocolo de Kioto sobre sustancias que contribuyen al efecto invernadero. Este reglamento tiene por objeto garantizar que, para 2030, las emisiones europeas de gases fluorados se reduzcan al menos en un 60 % en comparación con las emisiones de 2005.

Directivas de la UE: los requisitos esenciales. Los países de la UE son responsables de su aplicación. En el caso de los sistemas de refrigeración, las bombas de calor y sus componentes, las directivas más importantes son las relativas a la maquinaria, los equipos a presión, los aparatos eléctricos y electrónicos, la eficiencia energética y, en algunos casos, las atmósferas potencialmente explosivas.

Directiva de máquinas 2006/42/CE (junio de 2006): establece los requisitos que deben cumplir las máquinas destinadas al mercado europeo; contiene un gran número de requisitos de seguridad y salud. Los fabricantes están obligados a cumplir los requisitos de la Directiva.

Directivas ATEX (ATmosphère EXplosible): abarcan todas las situaciones en las que existe riesgo de explosión de gases y polvos.

Directiva sobre el rendimiento energético de los edificios (EPBD III, 2018): esta Directiva tiene por objeto mejorar la eficiencia energética de los edificios y, de este modo, reducir el consumo de energía.

Directivas y reglamentos generales: Las siguientes directivas de la UE se aplican, en su mayoría, también de forma general a los sistemas de refrigeración y a las bombas de calor, sin aspectos específicos del sector.

