



Módulo 1

Tecnología de bombas de calor

Desarrollado por la Agencia de Energía - Plovdiv



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.

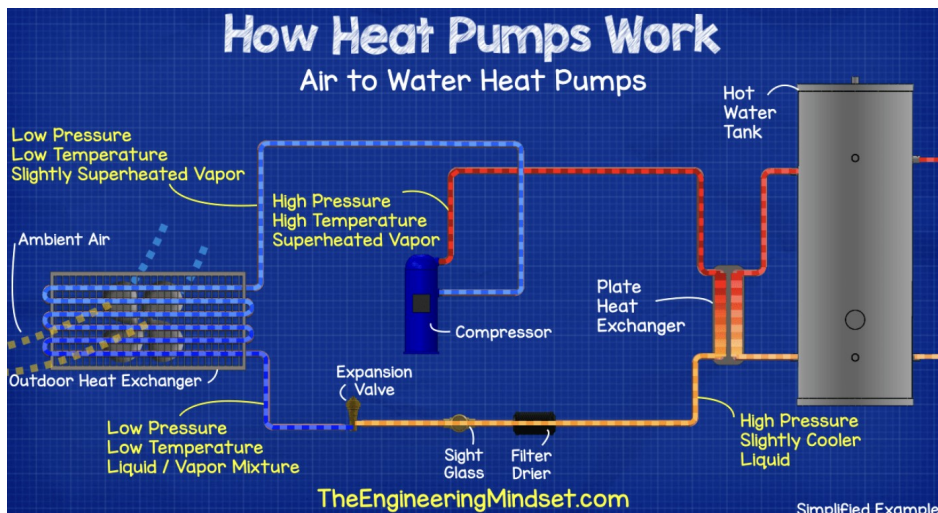


Resumen del módulo 1

Este módulo proporciona los fundamentos técnicos para comprender la tecnología de las bombas de calor como un sistema integrado de termodinámica e ingeniería. El módulo comienza con los principios fundamentales de la transferencia de calor y el ciclo de compresión de vapor, estableciendo las bases termodinámicas del funcionamiento y el rendimiento de las bombas de calor.

A continuación, examina los refrigerantes y sus clasificaciones medioambientales y de seguridad, seguido de un análisis detallado de los principales componentes del circuito de refrigeración, incluidos compresores, evaporadores, condensadores y dispositivos de expansión. También se abordan elementos adicionales del sistema.

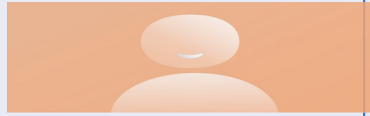
En conjunto, estos temas permiten comprender de forma exhaustiva cómo funcionan las bombas de calor, cómo interactúan sus componentes y cómo las decisiones de diseño del sistema influyen en la eficiencia, la fiabilidad y el funcionamiento seguro.



Co-funded by
the European Union



Contenido del módulo 3

Lección 1	Fundamentos de las bombas de calor	Lección 7	Componentes adicionales del circuito de refrigeración
Lección 2	Termodinámica del ciclo de compresión de vapor	Lección 8	Componentes auxiliares
Lección 3	Los refrigerantes como fluidos de trabajo		
Lección 4	Compresores		
Lección 5	Intercambiadores de calor externos (evaporadores y condensadores)		
Lección 6	Dispositivos de expansión		

LECCIÓN 1

Fundamentos de las bombas de calor



Co-funded by
the European Union



Lección 1 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar el principio fundamental de la transferencia de calor «en contra de la dirección natural» y la analogía entre las bombas hidráulicas y las bombas de calor.
2. Describir la estructura y el funcionamiento del ciclo de compresión de vapor, incluyendo el evaporador, el compresor, el condensador y el dispositivo de expansión.
3. Diferenciar entre las tecnologías de bombas de calor de compresión mecánica, absorción y termoeléctricas (Peltier).

Concepto y analogía de la bomba de calor

- Una bomba de calor es un dispositivo que utiliza energía de entrada para transferir calor desde una fuente de baja temperatura a un sumidero de alta temperatura. No genera calor, sino que desplaza la energía térmica existente «cuesta arriba» en contra de la dirección natural del flujo de calor, de forma muy similar a como una bomba hidráulica eleva el agua a una altura mayor.
- En una bomba de calor, el trabajo mecánico o eléctrico «mejora» la calidad del calor, lo que permite extraer calor del aire ambiente frío, del suelo o del agua y transportarlo a espacios interiores cálidos. La figura 1.1 ilustra esta analogía entre una bomba hidráulica y una bomba de calor térmica.

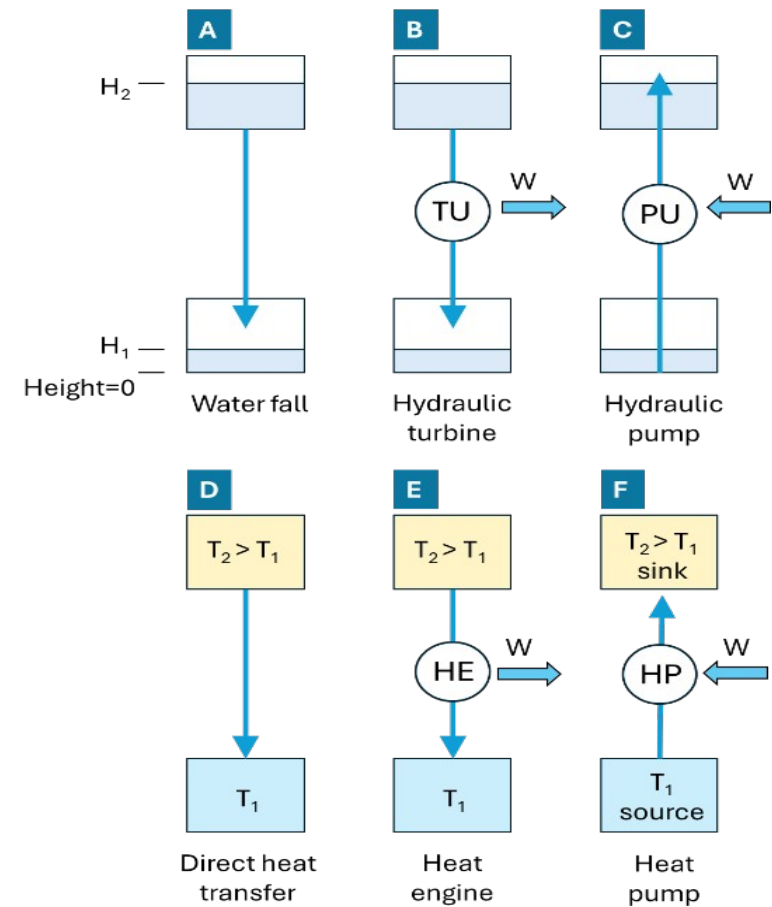


Figura 1.1. Analogía entre los sistemas hidráulicos y térmicos.

Bomba de calor frente a caldera

A diferencia de una caldera convencional (que quema combustible para **generar** calor), una bomba de calor **transfiere** calor. Una caldera convierte la energía química directamente en energía térmica en el agua, mientras que una bomba de calor utiliza trabajo para trasladar el calor ambiental al circuito de calefacción.

Como resultado, una bomba de calor puede proporcionar más energía térmica que la energía aplicada ($COP > 1$), ya que gran parte del calor que genera proviene del entorno exterior. En la práctica, esto significa que las bombas de calor pueden alcanzar una mayor eficiencia efectiva al aprovechar el calor exterior, mientras que las calderas están limitadas al 100 % (o ligeramente más con la condensación) del contenido energético del combustible.

Componentes y subsistemas de una bomba de calor

Un sistema completo de bomba de calor consta de tres subsistemas interconectados: la **fuentes de calor** (por ejemplo, el suelo, el aire ambiente o el agua), el **circuito de refrigeración** y el sistema **de distribución de calor** (interior). El circuito de refrigeración (circuito cerrado) hace circular un fluido de trabajo (refrigerante) a través de los cuatro componentes principales —evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión— para transferir calor.

Durante el funcionamiento, el refrigerante absorbe calor de la fuente en el evaporador a baja presión, se comprime (aumentando su temperatura) y, a continuación, cede calor en el condensador al sistema de distribución a alta presión. A continuación, el refrigerante líquido enfriado se expande para reiniciar el ciclo.

Mediante la coordinación de estos componentes, la bomba de calor «bombea» energía térmica a través de todas las partes del sistema.

Tipos de bombas de calor

Bombas de calor de compresión mecánica (circuito de refrigerante)

La bomba de calor más común utiliza el **ciclo mecánico de compresión de vapor** impulsado por un compresor eléctrico. En este ciclo, el refrigerante circula continuamente y sufre cambios de fase (líquido ↔ vapor). El compresor aumenta la presión y la temperatura del refrigerante, lo que le permite liberar calor en el condensador. Tras la condensación, el refrigerante pasa por un dispositivo de expansión para reducir su presión y temperatura, y luego se evapora absorbiendo calor de la fuente.

La figura 1.2 muestra un esquema de una bomba de calor de compresión mecánica. Estas unidades se utilizan ampliamente en sistemas de climatización residenciales y comerciales, y funcionan en un circuito cerrado de refrigerante con un compresor accionado eléctricamente.

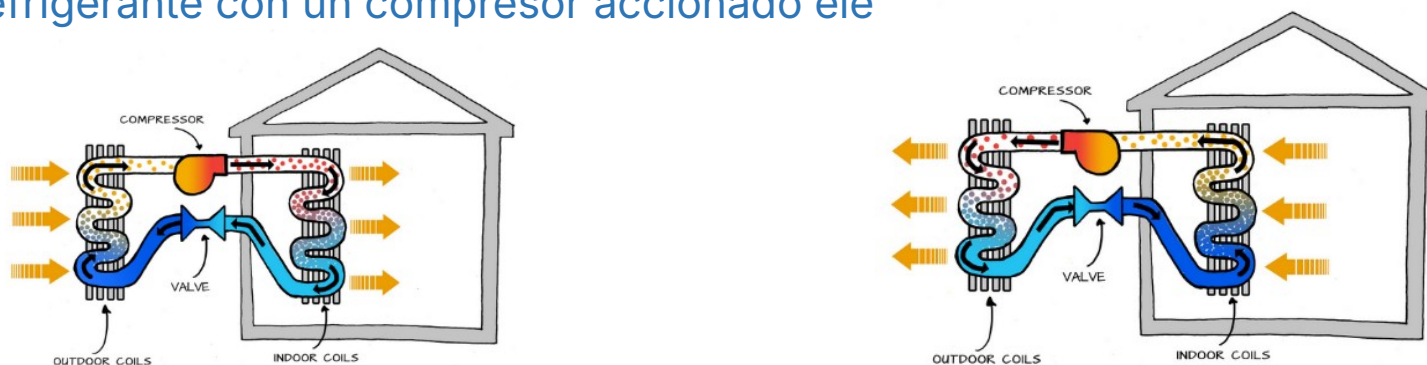


Figura 1-2. Funcionamiento básico de una bomba de calor de compresión mecánica (lado izquierdo: calefacción de la vivienda; lado derecho: refrigeración de la vivienda)



Co-funded by
the European Union



Bombas de calor de absorción y Peltier

Más allá de la compresión mecánica, existen tecnologías alternativas de bombas de calor.

Las bombas de calor de absorción utilizan un generador térmico (a menudo alimentado por gas o calor residual) y un par refrigerante-absorbente (por ejemplo, amoníaco-agua) para lograr la refrigeración sin necesidad de un compresor eléctrico. El calor impulsa el ciclo provocando que el refrigerante se desorba del absorbente (Figura 1.3.).

Las bombas de calor termoeléctricas (Peltier) utilizan módulos semiconductores de estado sólido: cuando la corriente eléctrica pasa a través de una unión, el calor se bombea de un lado al otro (Figura 1.4.). Estas tecnologías pueden ser útiles en aplicaciones especializadas (por ejemplo, sistemas impulsados por calor residual).

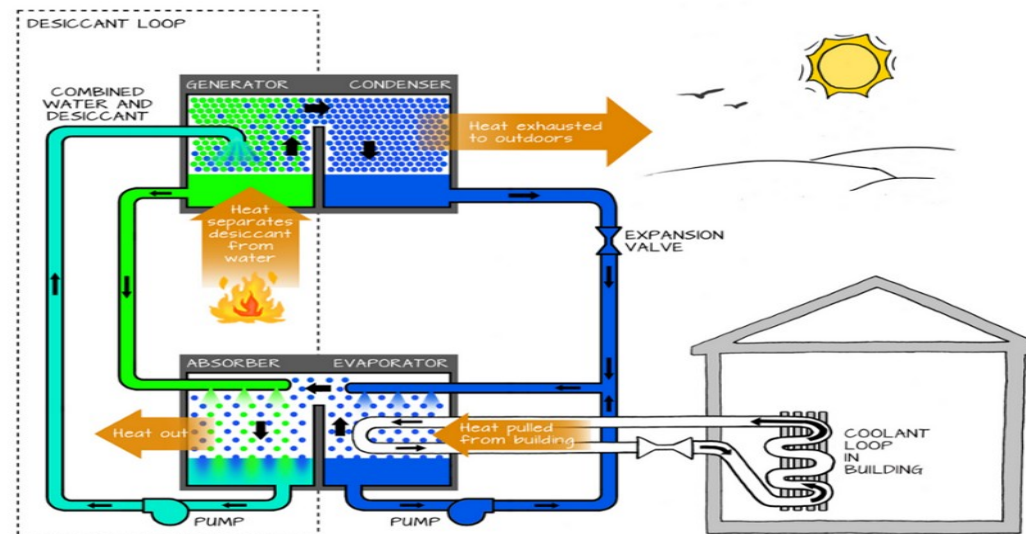


Fig. 1.3. Ciclo dual de un enfriador por absorción.

Fuente: Taller de Sostenibilidad, Venture Well

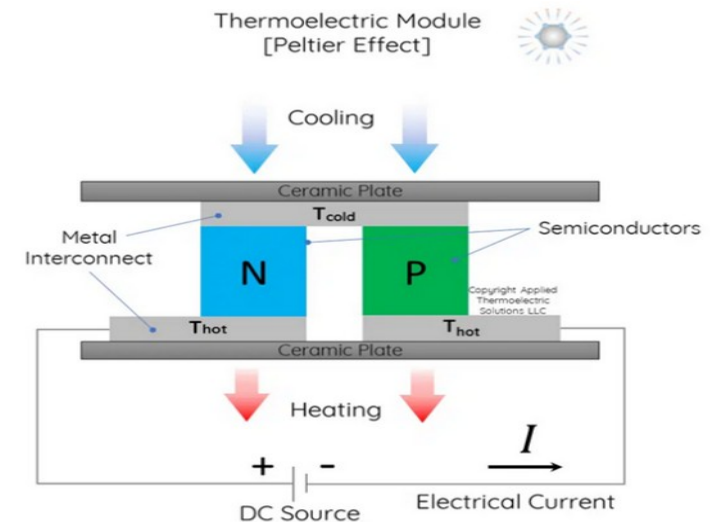


Fig. 1.4. Esquema conceptual de una célula Peltier. Fuente: Applied Thermoelectric Solutions

Funcionamiento del ciclo de vapor por compresión

Evaporador: Proceso de evaporación del refrigerante

El evaporador es el intercambiador de calor que **absorbe el calor** de la fuente de baja temperatura y lo transfiere al refrigerante. En el interior del evaporador, una mezcla fría de líquido y vapor a baja presión hierve (se evapora) a una temperatura de saturación constante.

A medida que fluye a través de los serpentines del evaporador, el refrigerante absorbe una gran cantidad de calor (calor latente de vaporización) del aire o del suelo que lo rodea.

Esto hace que el refrigerante se convierta por completo en vapor (a menudo con un ligero sobrecalentamiento) en el momento

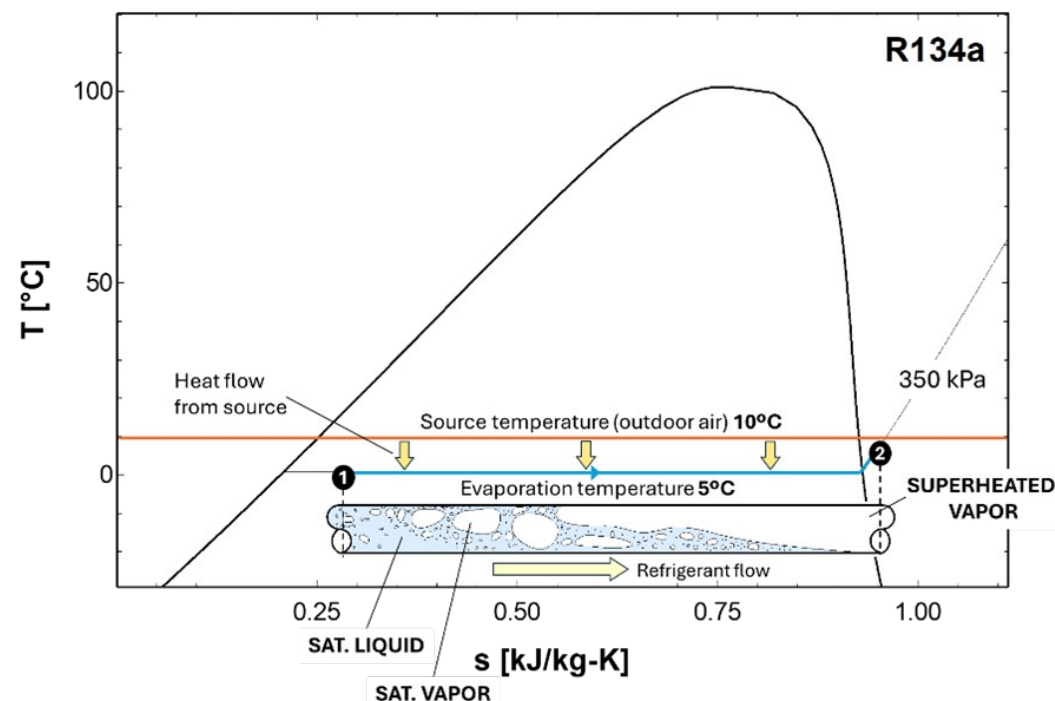


Figura 1-5. Evaporación del refrigerante en un diagrama TS

Condensador: Proceso de condensación del refrigerante

El condensador es el intercambiador de calor que **disipa el calor** hacia el sumidero (el espacio interior o el ambiente). El vapor de refrigerante caliente a alta presión procedente del compresor entra en el condensador.

Dado que el condensador se mantiene a alta presión (y, por lo tanto, a una temperatura de saturación elevada), el refrigerante se encuentra por encima de la temperatura del sumidero. A continuación, **se condensa** a una temperatura casi constante, liberando su calor. Durante este cambio de fase, el calor latente de vaporización se transfiere al sumidero (por ejemplo, el aire interior o el agua), saliendo el refrigerante como líquido a alta presión y temperatura.

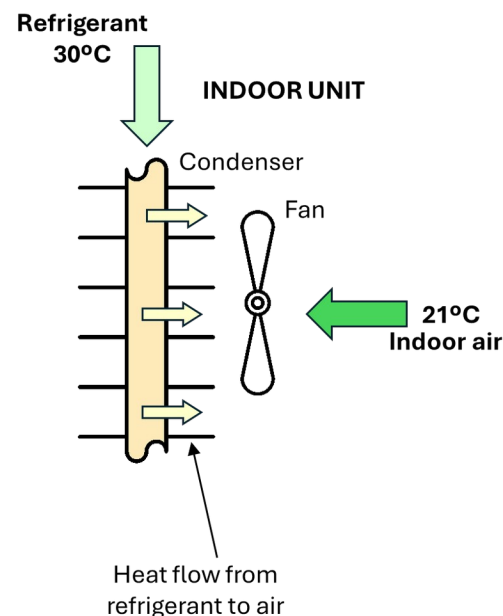


Figura 1-6. Condensación del refrigerante



Co-funded by
the European Union



Ciclo simple de compresión de vapor

En resumen, el ciclo de compresión de vapor de una sola etapa transfiere calor de forma continua desde la fuente de baja temperatura al sumidero de alta temperatura (véase la figura 1.7). El calor se absorbe en el evaporador (baja presión) procedente de la fuente. A continuación, el compresor eleva la presión (y la temperatura) del refrigerante mediante el trabajo realizado. El condensador libera calor hacia el sumidero. Por último, la válvula de expansión reduce la presión hasta el nivel del evaporador. En general, la bomba de calor suministra calor

$$Q_c = Q_o + W$$

al sumidero en cada ciclo. Dado que incluye el calor ambiental absorbido más el trabajo, el coeficiente de rendimiento (COP) puede superar 1, lo que pone de relieve la ventaja termodinámica de la bomba de calor.

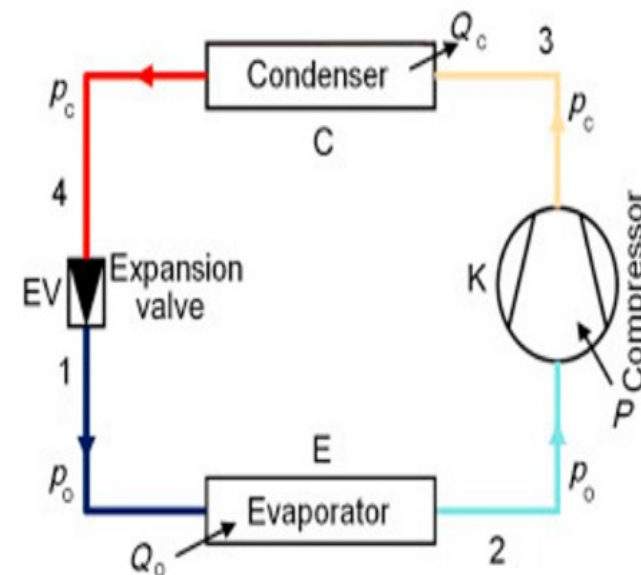


Figura 1-7. Esquema de un sistema de refrigeración por compresión de una sola etapa

LECCIÓN 2

Termodinámica del ciclo de compresión de vapor



Co-funded by
the European Union



Lección 2 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar el concepto de elevación de temperatura y su impacto en la eficiencia de la bomba de calor y en el COP.
2. Interpretar la bomba de calor como un motor térmico inverso y definir el coeficiente de rendimiento (COP).
3. Distinguir entre ciclos ideales (Carnot) y reales, e identificar las fuentes de irreversibilidad termodinámica.

Diferencial de temperatura y eficiencia de la bomba de calor

La eficiencia (COP) de una bomba de calor depende en gran medida de la **diferencia de temperatura** entre la fuente y el sumidero. Una diferencia de temperatura menor (es decir, una fuente más cálida o un sumidero más frío) implica que el compresor tiene que realizar menos trabajo y, por lo tanto, se obtiene un COP más alto.

Por el contrario, a medida que la temperatura del evaporador desciende (o la temperatura del condensador se eleva), el trabajo requerido aumenta drásticamente, lo que reduce el rendimiento.

Por lo tanto, los diseñadores tratan de minimizar las diferencias de temperatura entre la fuente y el sumidero siempre que sea posible. Al elevar la temperatura de la fuente o reducir la temperatura de distribución, la bomba de calor funciona con diferencias de temperatura menores y con una eficiencia significativamente mayor.

La bomba de calor como motor térmico inverso (concepto de COP)

Una bomba de calor puede entenderse como un motor térmico a la inversa. En el ciclo ideal de Carnot, se utiliza el trabajo W para trasladar el calor Q_c de un depósito frío a uno caliente, proporcionando calor

$$Q_h = Q_c + W$$

al sumidero (Figura 2.1). El **coeficiente de rendimiento** se define como

$$\text{COP} = Q_h/W$$

Una bomba de calor de Carnot que funciona entre las temperaturas de la fuente y el sumidero tiene el COP máximo posible para esas temperaturas. En la práctica, esto significa que, para una entrada de trabajo dada, la bomba puede mover (o «bombear») calor de tal manera que su salida de calor supere el trabajo.

Las bombas de calor reales se acercan a este límite, pero siempre se ven limitadas.

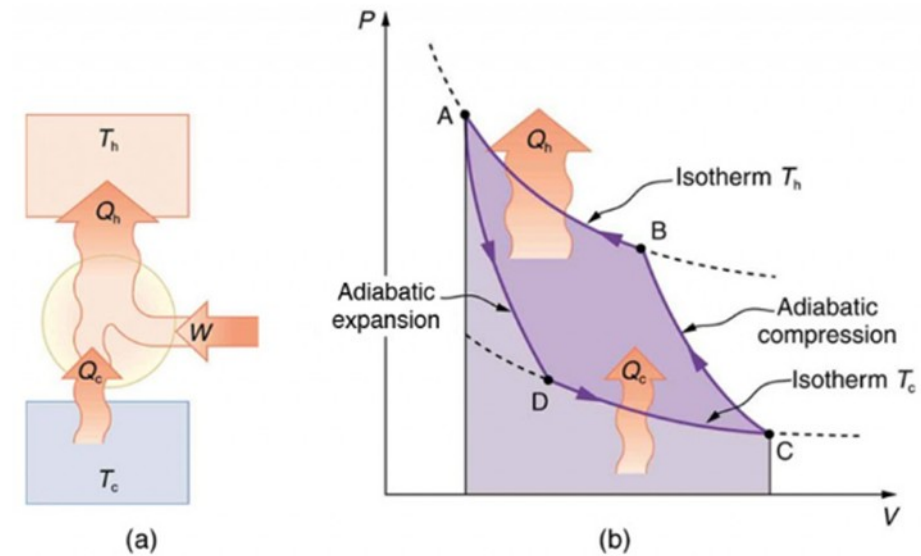


Figura 2.1. Motor de Carnot: (a) diagrama esquemático de la transferencia de calor; (b) diagrama de un ciclo de Carnot invertido

Interpretación del ciclo de vapor-compresión en un diagrama termodinámico

El ciclo de compresión de vapor puede representarse en diagramas termodinámicos como el de temperatura-entropía (T - s) (figura 2.2) o el de presión-entalpía (p - h). Estos diagramas ofrecen una interpretación gráfica de los procesos físicos que tienen lugar en el interior de la bomba de calor.

Los cuatro procesos principales son:

- **Evaporación (baja presión):** El refrigerante absorbe calor de la fuente a una temperatura casi constante mientras cambia de fase, pasando de líquido a vapor.
- **Compresión:** El compresor aumenta la presión y la temperatura del refrigerante mediante el aporte de trabajo mecánico.
- **Condensación (alta presión):** El refrigerante libera calor al sumidero a una temperatura casi constante mientras se condensa a líquido.
- **Expansión:** El dispositivo de expansión reduce la presión, lo que provoca una caída de la temperatura antes de que el refrigerante vuelva a entrar en el evaporador.

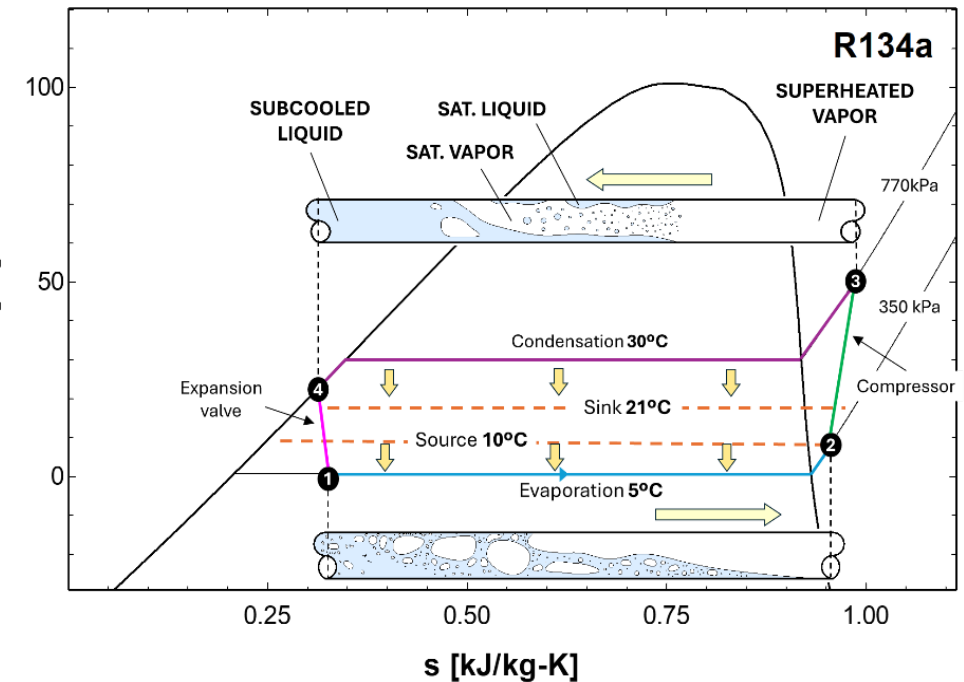


Figura 2.2. Motor de Carnot: (a) diagrama esquemático de la transferencia de calor; (b) diagrama de un ciclo de Carnot invertido

Eficiencia de Carnot e irreversibilidad

La figura 2.1 ilustra el efecto de las irreversibilidades en ciclos reales sobre la termodinámica de una bomba de calor ideal. En la práctica, la compresión no es isentrópica (véase la trayectoria punteada frente a la continua en la figura 2.3), y las diferencias de temperatura en los intercambiadores de calor provocan generación de entropía. Estas pérdidas hacen que el COP real sea inferior al COP ideal de Carnot.

Por ejemplo, las caídas de presión y el comportamiento no ideal de los gases requieren un trabajo adicional. El diagrama T-s también muestra la entropía adicional generada durante la compresión real. En resumen, cualquier desviación del ciclo reversible —como la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura o la fricción en el compresor— reduce la eficiencia global y el COP.

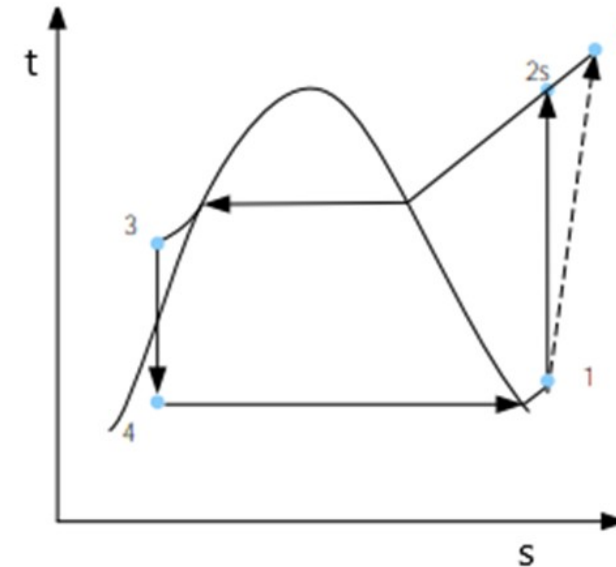


Figura 2.3. Diagrama T-s del ciclo de compresión de vapor real frente al ideal

Implicaciones del diseño termodinámico para la eficiencia de las bombas de calor

El coeficiente de rendimiento (COP) aumenta cuando:

- Se reduce la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el sumidero de calor (Figura 2.4.)
- El evaporador funciona a una temperatura más alta.
- El condensador funciona a una temperatura más baja.

Los fenómenos irreversibles, como la compresión no isentrópica, las caídas de presión y la transferencia de calor con diferencias de temperatura, reducen la eficiencia del sistema.

En la práctica, esto significa que:

- Las temperaturas de suministro del sistema de calefacción más bajas mejoran el rendimiento.
- Las temperaturas de la fuente más altas (por ejemplo, suelo frente a aire frío) aumentan la eficiencia.
- Un dimensionamiento adecuado del intercambiador de calor reduce el aumento de temperatura y mejora el COP.

La optimización termodinámica está directamente relacionada con las decisiones de diseño del sistema y la selección de componentes.

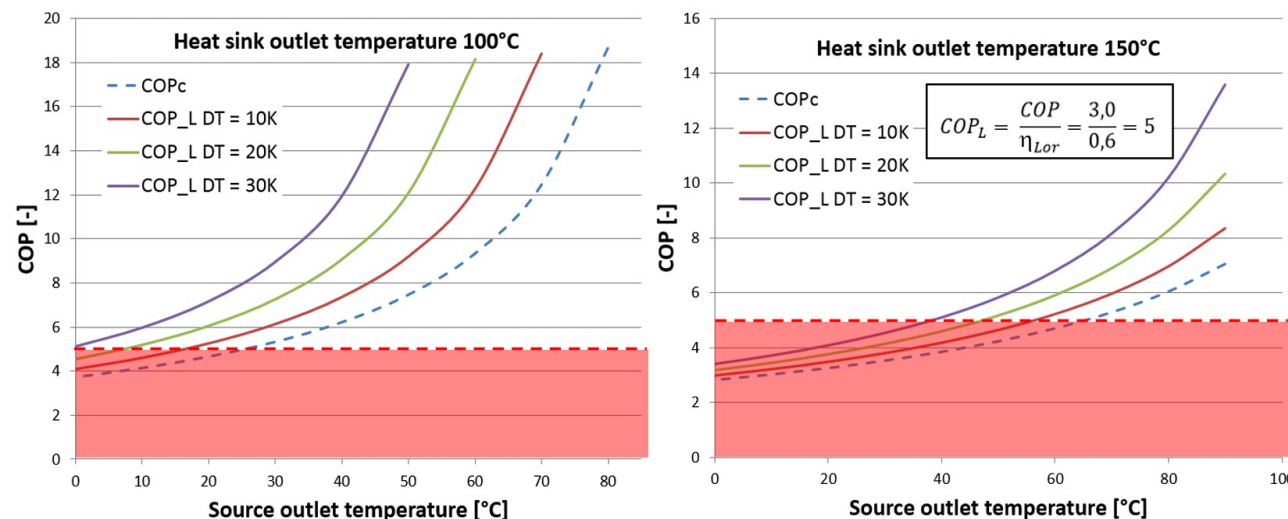


Figura 2.4. COP en función del cambio de temperatura tanto en la fuente como en el sumidero



Co-funded by
the European Union



LECCIÓN 3

Los refrigerantes como fluidos de trabajo

Lección 3 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Describir los criterios termodinámicos, de seguridad y medioambientales que se utilizan en la selección de refrigerantes.
2. Interpretar los sistemas de clasificación de refrigerantes (ASHRAE/ISO), incluidas las categorías de toxicidad e inflamabilidad.
3. Analizar las tendencias actuales hacia los refrigerantes de bajo PCA (potencial de calentamiento atmosférico) y sus implicaciones para el diseño y la seguridad de las bombas de calor.

Función y criterios de selección de los refrigerantes

- Los refrigerantes son los fluidos de trabajo que transportan el calor en el ciclo de compresión de vapor. Sus propiedades termodinámicas (punto de ebullición, calor latente, densidad y calor específico) influyen directamente en el diseño y la eficiencia del sistema.
- Los buenos refrigerantes tienen un alto calor latente, una alta capacidad volumétrica (para que los equipos puedan ser compactos) y un comportamiento estable y predecible. La selección también depende de factores no termodinámicos: seguridad (baja toxicidad, inflamabilidad aceptable), estabilidad química, compatibilidad de materiales e impacto ambiental (potencial de agotamiento del ozono (**ODP**) nulo y bajo potencial de calentamiento global (**GWP**)).
- Todos estos criterios deben equilibrarse: mejorar una propiedad a menudo requiere sacrificar otra. En los sistemas modernos, **el ODP cero** es la norma, y los refrigerantes se eligen para minimizar el GWP al tiempo que se cumplen los requisitos de rendimiento y seguridad

Denominación de los refrigerantes y clasificación de seguridad

- Los refrigerantes se identifican mediante los números R de ASHRAE/ISO (por ejemplo, R-410A, R-134a, R-290). El sistema de numeración de ASHRAE codifica la composición química: por ejemplo, el R-134a es tetrafluoroetileno y el R-290 es propano.
- La seguridad se clasifica con una letra (toxicidad) y un número (inflamabilidad) según la Norma 34 de ASHRAE (ISO 817). Los refrigerantes de clase A son de baja toxicidad, los de clase B son de mayor toxicidad; «1» = no inflamable, «2L» = inflamabilidad leve, «3» = inflamabilidad alta.
- Por ejemplo, el propano (R-290) es de clase A3 (baja toxicidad, alta inflamabilidad), el R-134a es A1 (no inflamable) y el amoníaco (R-717) es B2L (tóxico, ligeramente inflamable). La figura 3.1 ilustra la convención de numeración de ASHRAE y ejemplos de números R.

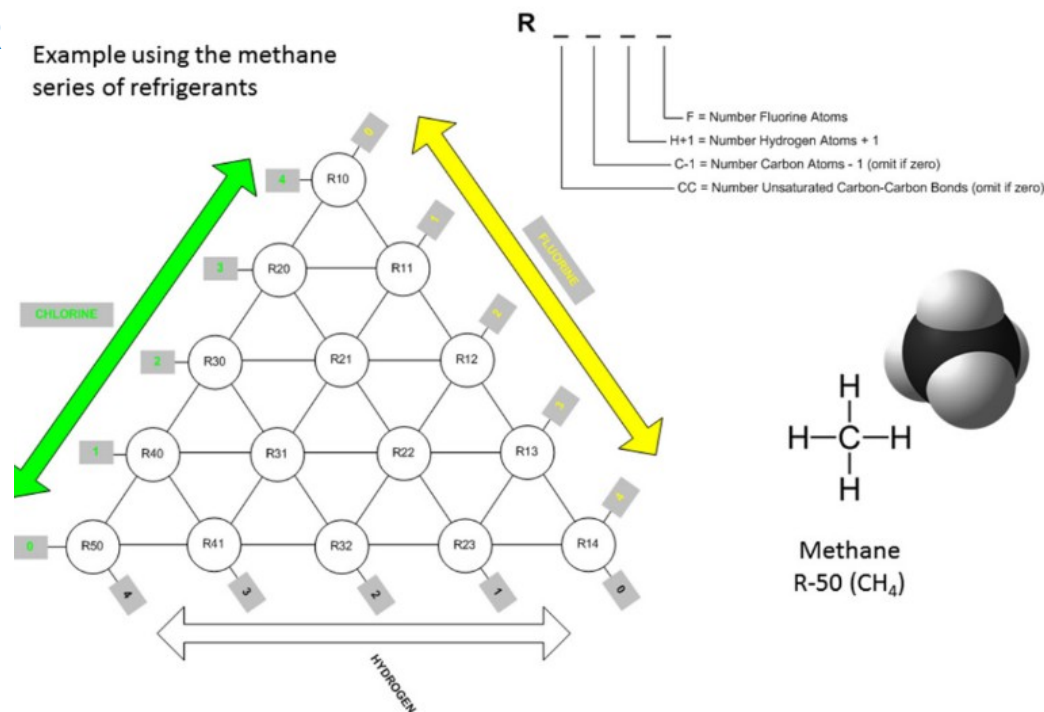


Figura 3.1. Ejemplo del sistema de nomenclatura de refrigerantes

Propiedades termodinámicas y medioambientales clave

- Entre las propiedades críticas de los fluidos se incluyen el punto de ebullición, la presión y la temperatura críticas, y el calor latente; estas determinan las presiones de funcionamiento y el dimensionamiento de los equipos. Por ejemplo, una temperatura crítica más alta permite presiones de condensación más elevadas.
- Los parámetros medioambientales son igualmente importantes: todos los fluidos modernos tienen un ODP = 0, pero el GWP varía ampliamente. El CO₂ (R-744) tiene un GWP ~1, mientras que los HFC tradicionales tienen GWP de miles. Se están adoptando nuevos refrigerantes de bajo GWP (por ejemplo, HFO, refrigerantes naturales) para cumplir con la normativa.
- Las propiedades de seguridad (inflamabilidad, toxicidad) también limitan las opciones. La tabla 3.1 destaca los valores típicos (p. ej., R-410A: GWP 2088, A1; R-32: GWP 675, A2L; R-290: GWP 3, A3; R-744: GWP 1, A1).

Refrigerante	Tipo	PGE	ODP	Seguridad	Aplicación típica	Ventajas clave	Limitaciones principales
R-410A	Mezcla de HFC	2088	0	A1	Bombas de calor aire/agua	No inflamable, fiable	Alto PCA
R-32	HFC	675	0	A2L	Bombas de calor aire/agua	Alta eficiencia, menor PCA	Ligeramente inflamable
R-454B	Mezcla de HFC/HFO	466	0	A2L	Nuevos sistemas	Bajo PCA, eficiencia	Ligeramente inflamable
R-290	HC	3	0	A3	Doméstico/comercial	GWP muy bajo, eficiente	Altamente inflamable
R-744	CO ₂	1	0	A1	Industrial, comercial	No inflamable, GWP nulo	Alta presión, pérdida de eficiencia a altas temperaturas
R-134a	HFC	1430	0	A1	Calentadores de agua, secadoras	No inflamable, fiable	Alto potencial de calentamiento global

Tabla 3.1. Propiedades termofísicas de los refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global

Tendencias hacia los refrigerantes de bajo GWP

- Las normativas internacionales (Protocolo de Montreal/Enmienda de Kigali, Reglamento de la UE sobre gases fluorados) están impulsando un rápido abandono de los HFC de alto potencial de calentamiento global (GWP). El sector está adoptando alternativas de GWP ultrabajo: hidrofluoroolefinas (HFO) como el R-1234yf (GWP ~4) y fluidos naturales (CO₂, amoníaco, hidrocarburos). Las mezclas híbridas (HFC/HFO) también se utilizan como soluciones de transición. Estos nuevos fluidos suelen ser más inflamables (A2L o A3), pero tienen un ODP/GWP insignificante.
- Como resultado, los diseños modernos de bombas de calor incorporan medidas de seguridad mejoradas: detección de fugas, ventilación y límites de carga mejorados, junto con el cumplimiento de las nuevas normas de seguridad (por ejemplo, la norma IEC 60335-2-40 para refrigerantes A2L).
- La investigación se centra en igualar el rendimiento de los refrigerantes tradicionales; por ejemplo, los componentes de ciclo avanzado (eyectores, compresión en paralelo, subenfriamiento) pueden ayudar a que los sistemas de CO₂ alcancen eficiencias comparables a las de los antiguos sistemas de HFC.

LECCIÓN 4

Compresores



Co-funded by
the European Union



Lección 4 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar la función del compresor dentro del ciclo de compresión de vapor y su influencia en el rendimiento del sistema.
2. Comparar los compresores alternativos, rotativos, scroll y de tornillo en cuanto a principios de funcionamiento y aplicaciones.
3. Evaluar el impacto de la irreversibilidad de la compresión y la eficiencia isentrópica en el COP de la bomba de calor.

Función del compresor en las bombas de calor

El compresor es el **corazón** de una bomba de calor de compresión de vapor. Aumenta la presión y la temperatura del refrigerante (de la presión del evaporador a la del condensador) al realizar trabajo. Esto establece el diferencial de presión que impulsa todo el ciclo. En la entrada del compresor, el refrigerante es un gas a baja presión; tras la compresión, sale como un gas a alta presión y alta temperatura, listo para la condensación.

La elección del tipo de compresor depende del caudal y la relación de presión requeridos. Por ejemplo, un compresor rotativo es adecuado para caudales grandes y relaciones bajas, mientras que un compresor de pistón alternativo maneja caudales más bajos y relaciones altas. La figura 4.1 muestra un cilindro básico de compresor alternativo.

Compresores alternativos (Figura 4.1.)

Un compresor alternativo (de pistón) utiliza un pistón deslizante en un cilindro para comprimir el refrigerante. En la carrera de admisión, el pistón se desplaza hacia fuera, aspirando refrigerante desde el puerto de succión. En la carrera de compresión, el pistón se desplaza hacia dentro, comprimiendo el gas y expulsándolo por el puerto de descarga.

Esta acción pulsante se repite continuamente. Los compresores alternativos son habituales en aplicaciones de potencia media a alta, ya que proporcionan aumentos de presión elevados. Son relativamente sencillos y bien conocidos, pero suelen tener más piezas móviles y requieren lubricación.

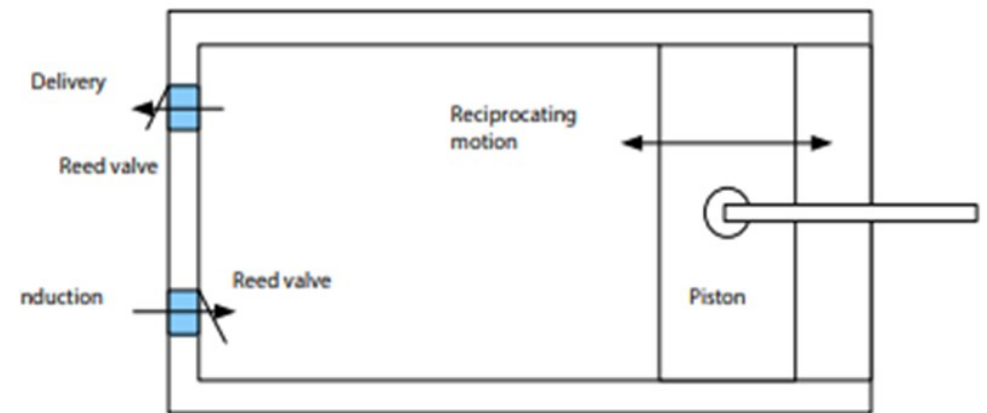


Fig. 4.1. Cilindro de un compresor de pistón alternativo.

Compresores rotativos y de espiral

- Los compresores rotativos (Figura 4.2) utilizan un rotor giratorio con paletas o tornillos. En un compresor rotativo de paletas, un rotor descentrado con paletas deslizantes atrapa y comprime el refrigerante en cámaras que se van reduciendo continuamente a medida que gira.
- Otros tipos rotativos incluyen los compresores de tornillo (tornillos entrelazados) y los compresores de espiral (dos espirales entrelazadas). Estos diseños ofrecen un flujo suave (especialmente a bajas velocidades), un funcionamiento silencioso y una alta fiabilidad. En las bombas de calor residenciales modernas, son comunes los compresores de doble rotor (rotativos gemelos): dos rotores en un solo eje permiten una alta eficiencia a baja velocidad, reduciendo las pérdidas por ciclos y el ruido.
- La figura 4.2 ilustra un compresor rotativo de paletas sencillo.

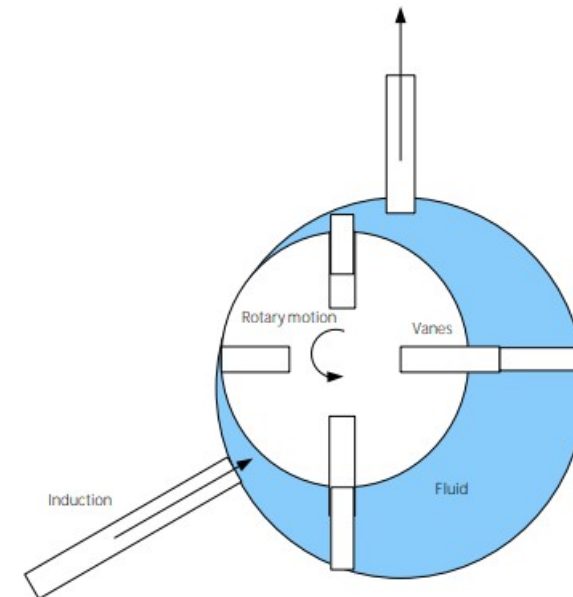


Figura 4.2. Un compresor rotativo de paletas

Irreversibilidad de la compresión (Figura 4.3)

- Los procesos reales de compresión no son ideales. La fricción, la transferencia de calor y las pérdidas mecánicas hacen que la compresión sea irreversible. En un diagrama T-s (figura 4.3), la trayectoria real de compresión (punteada) se desvía de la trayectoria isentrópica ideal (en negrita). La entropía al final de la compresión es mayor en la realidad, lo que significa que se requirió más trabajo que en el caso ideal.
- La relación entre el trabajo ideal y el real es la eficiencia isentrópica del compresor.
- Una menor eficiencia implica más potencia de entrada para el mismo aumento de presión, lo que reduce el COP global. La figura 4.3 del módulo ilustra estas pérdidas para un ciclo de refrigeración típico.

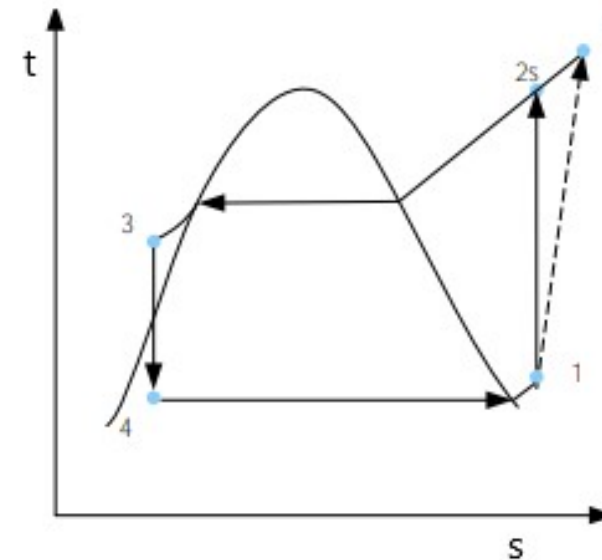


Figura 4.3. Diagrama T-s del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, incluyendo la eficiencia isentrópica del compresor

Tipos comunes de compresores (Figura 4.4)

La figura 4.4 resume los principales tipos de compresores utilizados en las bombas de calor: **rotativos** (habituales en sistemas pequeños), **scroll** (muy utilizados en bombas de calor pequeñas y medianas por su funcionamiento silencioso y eficiente), **alternativos** (compresores de pistón para instalaciones de tamaño mediano a grande) y compresores **de tornillo** para sistemas de alta capacidad. Cada uno tiene sus ventajas: los scroll son compactos y no utilizan aceite; las unidades con compresores alternativos soportan altas presiones; y los compresores de tornillo se utilizan en enfriadoras de gran tamaño. La elección depende del tamaño, la potencia requerida y el coste. Los compresores modernos suelen ser herméticos o semiherméticos (carcasas selladas) lo que dificulta la sustitución del motor.

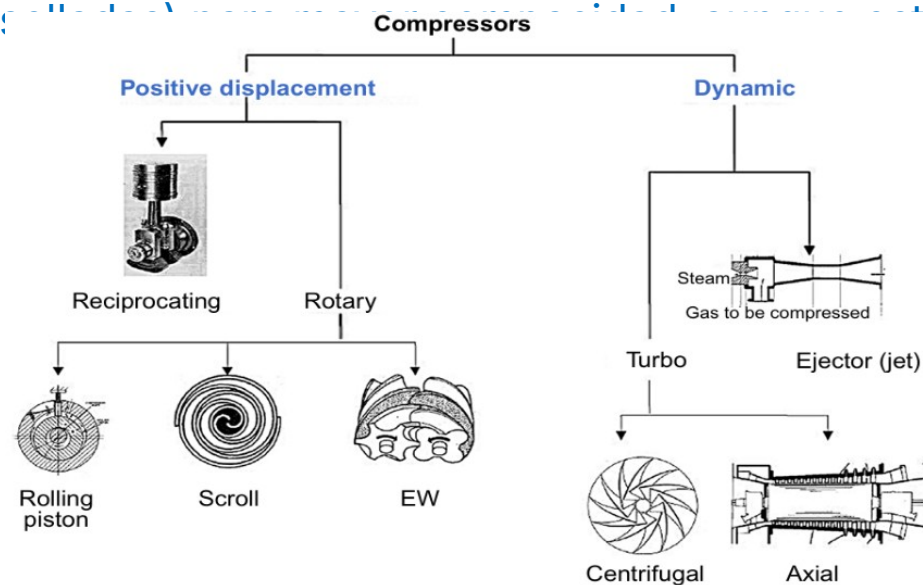


Figura 4.4. Tipos de compresores para bombas de calor

LECCIÓN 5

Intercambiadores de calor externos

Lección 5 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Describir la función termodinámica de los evaporadores y los condensadores en la absorción y la disipación de calor.
2. Comparar las configuraciones de los intercambiadores de calor refrigerados por aire y por agua, así como sus aplicaciones.
3. Explicar los mecanismos de formación de escarcha en los evaporadores que intercambian con aire y los principios del funcionamiento del desescarche.

Función del evaporador

- La función del evaporador es **absorber** el **calor** del entorno exterior y transferirlo al refrigerante. El refrigerante líquido a baja presión entra en el evaporador, donde hierve (se evapora) absorbiendo calor del aire ambiente, del suelo o del agua.
- Este cambio de fase requiere una gran cantidad de energía (calor latente), por lo que el serpentín del evaporador, a baja temperatura, absorbe calor de su entorno.
- El refrigerante se evapora a una temperatura de saturación constante, saliendo en forma de vapor frío. En modo calefacción, el evaporador suele estar en el exterior (fuente de calor del aire o del suelo); en modo refrigeración, puede estar en el interior (absorbiendo el calor de la habitación). En todos los casos, el evaporador permite la absorción de calor al reducir la presión y la temperatura del refrigerante.

Función del condensador

- La función del condensador es **transferir** el **calor** del refrigerante al disipador. En modo calefacción, transfiere el calor al aire o al agua del interior; en modo refrigeración, libera el calor al exterior. El vapor a alta presión procedente del compresor entra en el condensador.
- Dado que se mantiene a alta presión (y temperatura), el refrigerante está más caliente que el sumidero. A medida que fluye a través de las baterías o placas del condensador, libera calor y se condensa en líquido. Este calor liberado calienta el agua o el aire de calefacción del edificio.
- A continuación, el refrigerante líquido condensado vuelve al dispositivo de expansión. En modo inverso (refrigeración), el intercambiador interior actúa como evaporador y el intercambiador exterior como condensador. El condensador funciona siempre a alta presión, lo que permite una disipación eficiente del calor.

Tipos de condensadores: refrigerados por aire

El diseño del condensador depende de la aplicación. **Los condensadores refrigerados por aire** (Figura 5.1.) utilizan el aire ambiente para absorber calor. Consisten en tubos con aletas y ventiladores que impulsan aire a través de la batería de tubos aleteados. Las unidades refrigeradas por aire son habituales en pequeños sistemas comerciales y las y económicas.

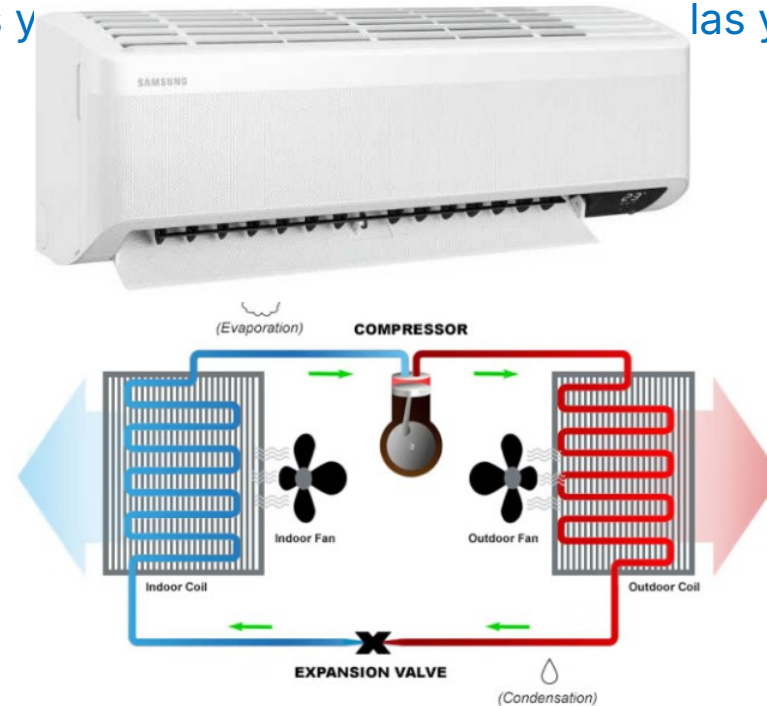


Figura 5.1. Condensador de bomba de calor aire-aire

Tipos de condensadores: refrigerados por agua

Los condensadores refrigerados por agua o por salmuera (Figura 5.2) transfieren calor a un líquido (agua o glicol). Se pueden utilizar intercambiadores de calor de placas o de carcasa y tubos, con bombas de circulación que mueven el líquido. Los condensadores refrigerados por agua alcanzan coeficientes de transferencia de calor más altos y se utilizan cuando se dispone de agua (por ejemplo, circuitos subterráneos o torres de refrigeración). La figura 5.2 muestra un condensador de placas aire-agua típico. La selección depende de la complejidad de la instalación y de las necesidades de eficiencia

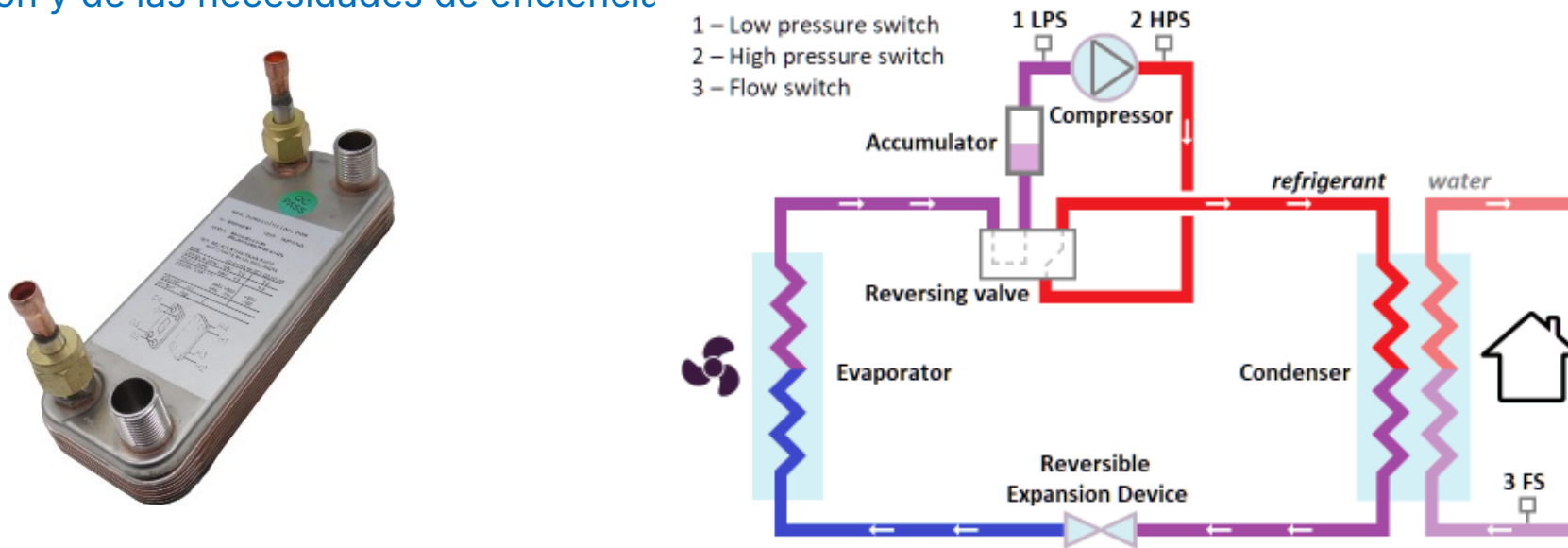


Figura 5.2. Condensador de placas de bomba de calor aire-agua y tierra-agua

Diseño de las baterías del evaporador y del condensador

Las baterías de los intercambiadores de calor varían en su construcción para adaptarse a su función. La mayoría de las baterías utilizan **tubos de cobre con aletas de aluminio**: el cobre por su conductividad térmica y el aluminio por su ligereza y su coste. **Las baterías de aluminio de microcanales** más modernas se utilizan en unidades compactas para lograr una alta transferencia de calor en menos espacio.

Las baterías del evaporador exterior suelen tener recubrimientos hidrófilos o anticongelantes para facilitar el drenaje de la humedad y retrasar la formación de hielo. Los intercambiadores interiores (agua-aire) pueden utilizar tratamientos antical en aplicaciones con agua dura. La forma y el tamaño también difieren: los evaporadores exteriores suelen ser más grandes (para gestionar la baja densidad de calor exterior), mientras que los condensadores por agua son más compactos. La figura 5.4 muestra placas típicas de bombas de calor aire-agua y tierra-agua. El diseño adecuado del intercambiador (geometría, material) es fundamental para una transferencia de calor eficiente y el rendimiento del sistema.



Figura 5.3. Ejemplos de evaporadores de bombas de calor aerotérmicas *Figura 5.4. Configuración de los serpentines del evaporador y el condensador con agua*

Formación de escarcha y descongelación en los evaporadores de bombas de calor aerotérmicas

En climas fríos, la humedad del aire exterior puede congelarse en la batería del evaporador. La acumulación de escarcha aísla la batería, reduciendo la absorción de calor y el flujo de aire. Por lo tanto, las bombas de calor de aerotérmicas deben **descongelarse** periódicamente para mantener su rendimiento.

Una estrategia habitual es **el desescarche por gas caliente**: el compresor sigue funcionando, pero el refrigerante se desvía para que el gas de descarga caliente fluya a través de la batería exterior (con escarcha) en sentido inverso, derritiendo el hielo.

También se pueden utilizar calentadores eléctricos (menos habituales). El control de descongelación suele activarse por tiempo o mediante la detección de la temperatura de la batería. La figura 5.5 ilustra el flujo de calor en el evaporador; durante la descongelación, este proceso se invierte. Las estrategias de descongelación eficaces son esenciales para un funcionamiento fiable en climas fríos.

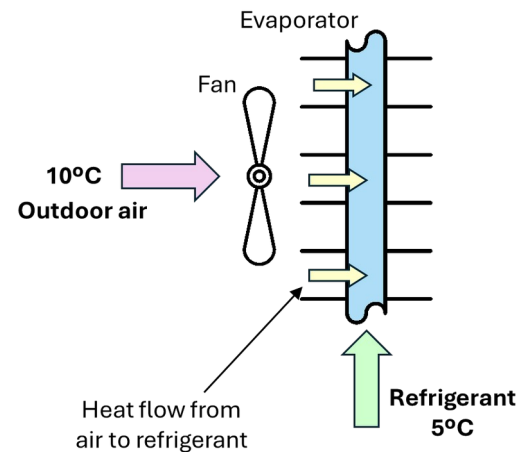


Figura 5.5. Dirección del flujo de calor en el evaporador

LECCIÓN 6

Dispositivos de expansión

Lección 6 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar la función de los dispositivos de expansión en la reducción de presión y el control del flujo de refrigerante.
2. Comparar los tubos capilares, las válvulas de expansión termostáticas (TXV), las válvulas de expansión electrónicas (EEV) y las válvulas de expansión automáticas (AEV).
3. Analizar la importancia del control del sobrecalentamiento para la protección del compresor y la eficiencia del sistema.

Funciones y descripción general del dispositivo de expansión

El dispositivo de expansión conecta los lados de alta y baja presión del sistema. Su función principal es reducir la presión del refrigerante (y, por lo tanto, la temperatura) antes del evaporador y dosificar el caudal. Esto crea el diferencial de presión necesario.

Los dispositivos de expansión simples (como los tubos capilares) fijan el tamaño del orificio y su longitud, **mientras que las válvulas de expansión termostáticas (TXV) y las válvulas de expansión electrónicas (EEV)** regulan activamente el caudal en función del sobrecalentamiento. Al controlar el caudal de refrigerante que entra en el evaporador, estos dispositivos mantienen el evaporador al sobrecalentamiento deseado, protegiendo al compresor del golpe de líquido y optimizando la eficiencia.

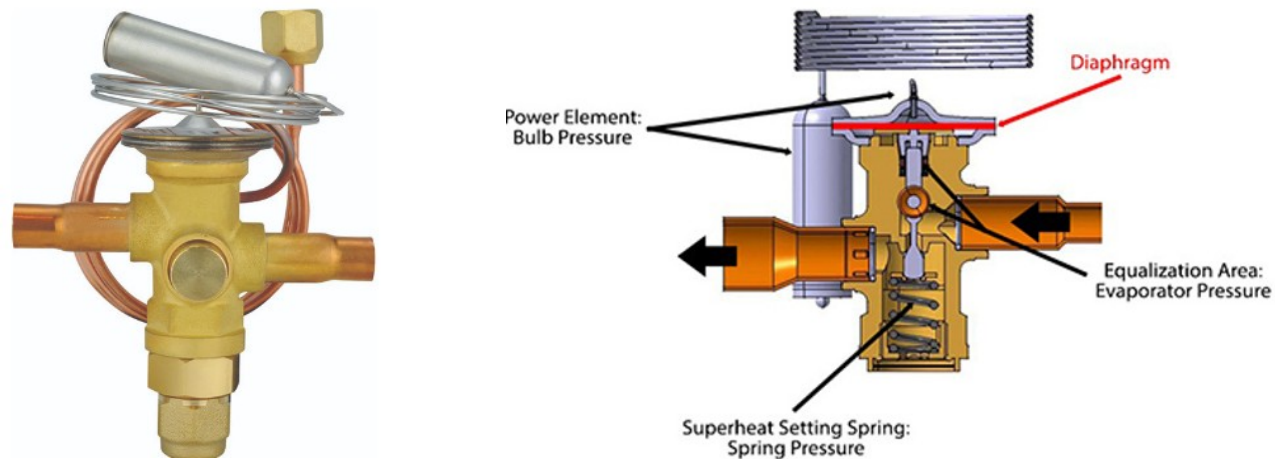


Figura 6. 1. Conjunto típico de válvula de expansión termostática

Expansión por tubo capilar

Un tubo capilar es el dispositivo de expansión más sencillo. Se trata simplemente de un tubo de cobre largo y estrecho (Figura 6.2) por el que fluye el refrigerante líquido. Su diámetro minúsculo genera una caída de presión fija. Los tubos capilares son muy económicos, duraderos y no tienen piezas móviles. Sin embargo, dado que las dimensiones son fijas, no hay control de retroalimentación y no pueden ajustar el flujo a cargas variables.

La longitud y el diámetro interior del tubo se seleccionan para una carga de refrigerante y unas condiciones de funcionamiento específicas; los cambios en las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, la temperatura ambiente) pueden dar lugar a un rendimiento subóptimo. Los tubos capilares se utilizan habitualmente en sistemas pequeños y sencillos (como frigoríficos domésticos o pequeños aparatos de aire acondicionado) donde la carga es relativamente constante.



Figura 6. 2. Dispositivo de expansión con tubo capilar

Válvula de expansión termostática (TXV)

La TXV es una válvula activa y autoajustable. Detecta la temperatura de salida del evaporador (a través de un bulbo remoto) y modula el caudal para mantener un **sobrecalentamiento** prácticamente constante. En el interior de la TXV (Figura 6.1), un diafragma recibe la acción de tres presiones: la presión del bulbo (proporcional a la temperatura de salida), la presión del resorte (preajustada) y la presión de succión del evaporador.

Si la salida del refrigerante está demasiado fría (sobrecalentamiento bajo), la presión del bulbo aumenta y cierra la válvula; si la salida se calienta (sobrecalentamiento alto), la presión del bulbo descende y la válvula se abre más. Esta retroalimentación mantiene el evaporador en un sobrecalentamiento óptimo bajo cargas variables.

Las TXV se utilizan ampliamente en aplicaciones de refrigeración y bombas de calor. La Figura 6.3 muestra las fuerzas que actúan sobre el diafragma de una TXV. Al mantener un sobrecalentamiento adecuado, las TXV protegen el compresor y mejoran la estabilidad del sistema.

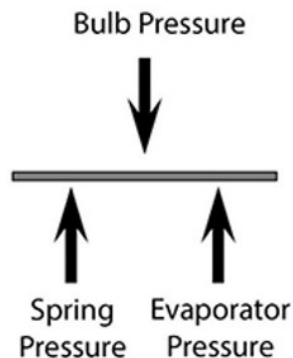


Figura 6.3. Fuerzas que actúan sobre el diafragma de una TXV



Co-funded by
the European Union



Válvula de expansión electrónica (EEV)

Las EEV son válvulas accionadas por motor y controladas por un controlador electrónico. Permiten un ajuste rápido y preciso del caudal de refrigerante. En comparación con las TXV, las EEV ofrecen una respuesta rápida y un amplio rango de funcionamiento. Son especialmente ventajosas en las modernas bombas de calor **accionadas por inversor**: el controlador puede adaptar activamente el caudal a la velocidad variable del compresor.

El conjunto de la EEV incluye un motor paso a paso o un servomotor, un controlador y, en ocasiones, sensores (Figura 6.4.). Durante el funcionamiento, la placa de control ajusta la apertura de la válvula en función del sobrecalentamiento u otras entradas del sistema. El resultado es un control más preciso del sobrecalentamiento y una mayor eficiencia a carga parcial. Básicamente, una EEV realiza la misma función que una TXV, pero con un control electrónico programable.



Figura 6.4. Válvulas de expansión electrónicas para bombas de calor domésticas

Válvula de expansión automática (AEV)

La AEV es una válvula mecánica más sencilla que controla el caudal utilizando únicamente la presión. No tiene bulbo sensor externo. En su lugar, ajusta su apertura en función de la presión del evaporador: a medida que aumenta la presión del evaporador, la válvula se cierra ligeramente para mantener estable la presión (y, por lo tanto, el sobrecalentamiento).

Las AEV mantienen automáticamente una presión del evaporador (y un sobrecalentamiento) relativamente constantes. Funcionan mejor en sistemas con una carga casi constante, como las aplicaciones de refrigeración fija o de enfriadores industriales.

Las AEV son menos adecuadas para grandes oscilaciones de carga (por ejemplo, en sistemas típicos de climatización), pero aún se encuentran en algunos frigoríficos y congeladores comerciales. La figura 6.5 muestra una válvula de expansión automática representativa.



Figura 6.5. Válvula de expansión automática



Co-funded by
the European Union



LECCIÓN 7

Componentes adicionales del circuito de refrigeración



Co-funded by
the European Union



Lección 7 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar la función de los componentes auxiliares de refrigeración, tales como válvulas de inversión, válvulas solenoides, válvulas de retención y filtros desecadores.
2. Describir el papel de los separadores de aceite y los depósitos de líquido en el mantenimiento de la fiabilidad y el rendimiento del sistema.
3. Interpretar la importancia operativa de las mirillas y los indicadores de humedad en el diagnóstico y el mantenimiento.

Válvula de inversión de cuatro vías (calefacción $\Leftrightarrow$ refrigeración)

Una válvula de inversión de cuatro vías es el componente clave que permite a una bomba de calor cambiar entre los modos de calefacción y refrigeración. Dirige el flujo de refrigerante de manera que los serpentines interior y exterior intercambian sus funciones.

Estructuralmente, cuenta con cuatro puertos (al compresor, al intercambiador interior, al intercambiador exterior y a la succión) y un elemento deslizante interno (véase la figura 7.1.). Cuando la bobina del solenoide se activa (o desactiva), la corredera se desplaza, invirtiendo el ciclo. En **el modo de calefacción**, el intercambiador exterior se convierte en el evaporador (absorbiendo el calor exterior) y el intercambiador interior en el condensador. En **el modo de refrigeración**, ocurre lo contrario.

Aunque es esencial, la válvula de inversión añade cierta caída de presión y puede presentar fugas internas. Los nuevos diseños de válvulas tienen como objetivo minimizar estas pérdidas (mejorando potencialmente el COP hasta en un 60 % solo en la caída de presión).

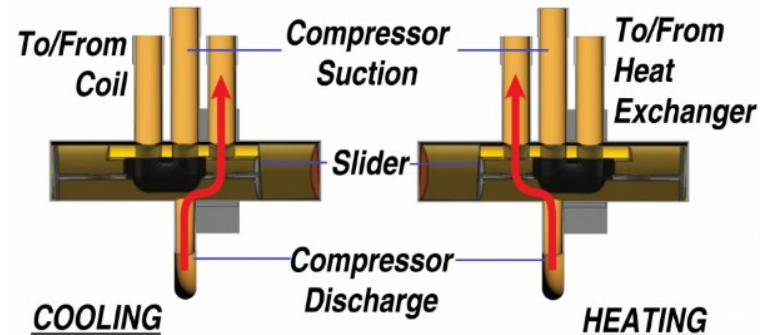


Figura 7.1. Válvula de expansión automática

Válvulas solenoides

Las válvulas solenoides utilizan un accionamiento electromagnético para abrir o cerrar las tuberías de refrigerante. Una válvula solenoide de acción directa contiene un émbolo que es accionado por una bobina (Figura 7.2.), mientras que una válvula solenoide pilotada utiliza un pequeño flujo piloto para controlar una válvula más grande (lo que permite controlar flujos de alta presión).

Estas válvulas tienen múltiples funciones: pueden aislar el refrigerante (para el bombeo o el mantenimiento), controlar el desescarche dirigiendo el gas caliente o detener el flujo de refrigerante en caso de fallo. Por ejemplo, en un ciclo de desescarche, el controlador puede activar una válvula solenoide para enviar el gas caliente de descarga del compresor a través de la batería exterior.

Las solenoides son fundamentales para el control automatizado y la seguridad. La Figura 7.2. muestra la construcción interna de una válvula solenoide típica de refrigeración. Las bombas de calor modernas suelen incluir varias solenoides para estas funciones.

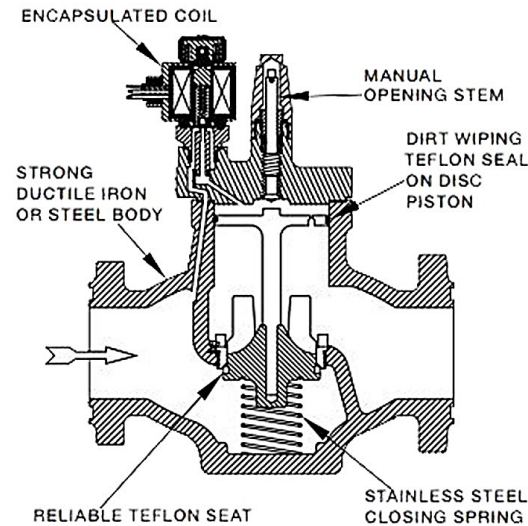


Figura 7.2. Sección transversal de una válvula solenoide

Válvulas de retención

Las válvulas de retención permiten el flujo en una sola dirección, evitando el flujo inverso. Se colocan en el circuito de refrigerante (o en las líneas de aceite) para mantener el flujo unidireccional.

Entre los tipos más comunes se incluyen las válvulas de retención de bola (una bola sobre un resorte que sella bajo contrapresión), las válvulas de retención oscilantes (un disco con bisagra) y las válvulas de retención de pistón (un pistón guiado que sella). La figura 7.3 ilustra el interior típico de una válvula de retención.

Las válvulas de retención se utilizan, por ejemplo, para garantizar que el aceite vuelva al cárter del compresor y para evitar el reflujo del refrigerante durante la parada. Su instalación requiere una orientación correcta y tramos de tubería rectos suficientes aguas arriba y aguas abajo para que funcionen correctamente. Los sistemas de alta presión (como las unidades transcriticals de CO₂) utilizan válvulas de retención con

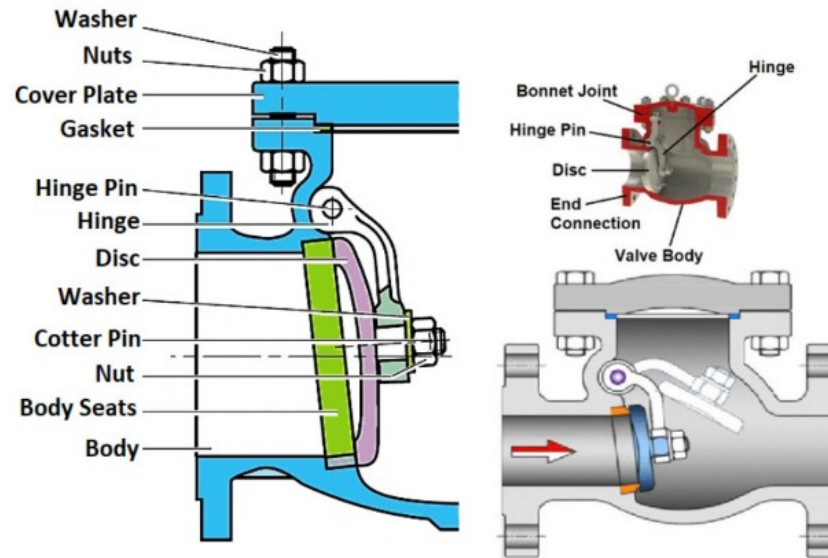


Figura 7.3. Componentes internos de una válvula de retención

Filtros desecantes

Los filtros desecantes eliminan la humedad, los ácidos y las partículas del refrigerante. Consisten en una carcasa de acero rellena de desecante (normalmente tamiz molecular y alúmina activada) y mallas metálicas. A medida que el refrigerante pasa a través de ellos, el vapor de agua y los ácidos se adsorben químicamente, mientras que las partículas sólidas quedan atrapadas. La eliminación de contaminantes es crucial: la humedad puede congelarse o provocar corrosión, y los residuos pueden obstruir las válvulas de expansión.

Los filtros-secadores estándar se instalan en la línea de líquido entre el condensador y la válvula de expansión. En las bombas de calor reversibles se utilizan **filtros-secadores de doble flujo** (Figura 7.4); estos tienen lechos de desecante en ambos extremos para que el refrigerante pueda fluir en cualquier dirección. La Figura 7.4 muestra el corte transversal de un secador de doble flujo.

El dimensionamiento adecuado es fundamental: un secador de tamaño insuficiente provoca una gran caída de presión y un rendimiento reducido.



Figura 7.4. Sección transversal de un filtro-secador de doble flujo

Mirillas

Las mirillas proporcionan una indicación visual del estado del refrigerante en la línea de líquido. Permiten a los técnicos confirmar que la carga de refrigerante es la adecuada y que el sistema está seco. Al observarlas, las burbujas indican la presencia de vapor (carga insuficiente o evaporación); un líquido transparente indica que la carga es completa.

Muchas mirillas incluyen un indicador de humedad (un disco de color) que cambia de color (por ejemplo, de verde a amarillo) si hay agua presente. La figura 7.5 muestra una mirilla típica con indicador.

Las mirillas son especialmente útiles durante la carga o el mantenimiento: la presencia de burbujas advierte de una carga insuficiente, y una señal de humedad indica la saturación del secador o la existencia de fugas. En los circuitos de bombas de calor, las mirillas se colocan después del filtro-secador y antes del dispositivo de expansión (líquido subenfriado). Los diseños modernos también integran indicadores de caudal con sensores para una monitorización inteligente.

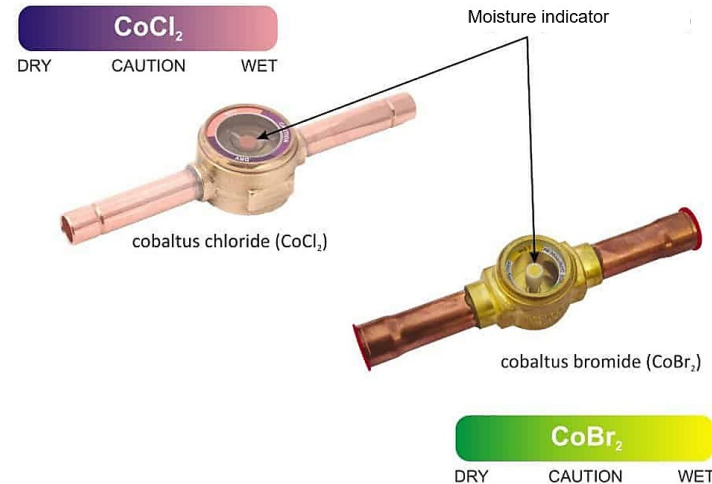


Figura 7.5. Sección transversal de un filtro-secador de doble flujo

Separadores de aceite

Los separadores de aceite se instalan en la descarga del compresor para separar el aceite arrastrado del vapor refrigerante. Utilizan mecanismos centrífugos o helicoidales: el flujo de gas a alta velocidad gira dentro del recipiente (Figura 7.6.), lo que empuja las gotas de aceite hacia el exterior para que se acumulen en las paredes. El aceite separado se acumula en el fondo, donde un flotador o una válvula de retención lo devuelve al cárter del compresor. Esto garantiza una circulación adecuada del aceite y evita que se acumule en el evaporador (lo que reduciría la transferencia de calor).

Los separadores de aceite son especialmente importantes en sistemas con varios compresores; pueden combinarse con depósitos de aceite y reguladores para equilibrar el aceite entre los compresores. Los separadores modernos están diseñados para altas presiones (R410A, R744) y suelen incluir sensores para la monitorización del nivel de aceite.

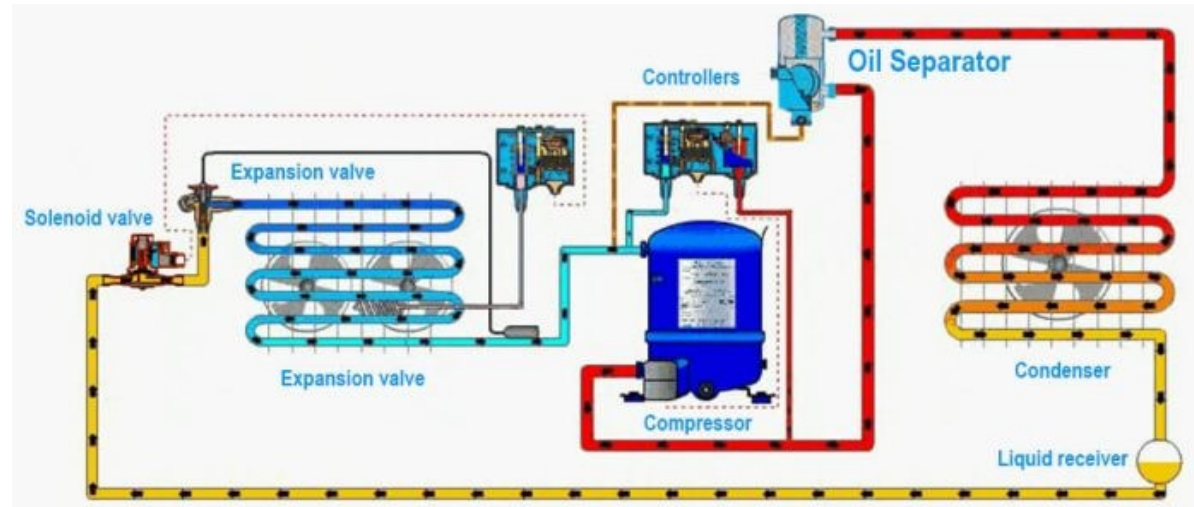


Figura 7. 6. Esquema del separador de aceite

Recipientes de líquido

Los depósitos de líquido están situados en la línea de líquido a alta presión (después del condensador). Su función es garantizar un suministro constante y sin burbujas de refrigerante líquido al dispositivo de expansión.

Durante el funcionamiento a baja carga, el exceso de líquido puede acumularse en el receptor; durante la alta demanda, libera el líquido almacenado para mantener un caudal adecuado. Esto evita la falta de líquido en el evaporador y el golpe de líquido en el compresor. Los recipientes están disponibles en diseños verticales u horizontales (Figura 7.7.) y su tamaño se determina en función de las fluctuaciones previstas en el volumen de refrigerante.

Muchos recipientes incluyen una mirilla y válvulas de servicio para facilitar la carga. El dimensionamiento adecuado del depósito es fundamental: si es demasiado pequeño, puede quedarse sin líquido; si es demasiado grande, añade costes y ocupa espacio sin aportar ningún beneficio.



Figura 7.7. Diferentes tipos de recipientes de líquido

LECCIÓN 8

Componentes auxiliares e integración hidrónica

Lección 8 – Objetivos de aprendizaje

Al finalizar esta lección, los participantes serán capaces de:

1. Explicar la función de los ventiladores y las bombas de circulación en la transferencia de calor y la eficiencia del sistema.
2. Describir la función de los interruptores de caudal, los vasos de expansión y los depósitos de inercia para garantizar un funcionamiento seguro y estable.
3. Analizar la importancia de la integración hidráulica y las estrategias de control inteligente en los sistemas modernos de bombas de calor.

Ventiladores en bombas de calor aerotérmicas

- En las bombas de calor aerotérmicas, los ventiladores se utilizan para hacer circular el aire a través de las baterías exteriores e interiores. Los sistemas modernos utilizan cada vez más **ventiladores de velocidad variable EC (conmutación electrónica)**. Al ajustar la velocidad del ventilador, el sistema puede adaptarse de manera eficiente a las variaciones de la carga.
- La figura 8.1 compara el COP estacional (SCOP) de una bomba de calor aerotérmica de velocidad fija frente a una con variador, mostrando una eficiencia hasta un 10 % mayor con el control por variador.
- Se utilizan dos tipos principales de ventiladores: **los ventiladores axiales**, que mueven grandes volúmenes de aire a baja presión (habituales en las unidades exteriores), y **los ventiladores centrífugos**, que generan presiones más altas (utilizados cuando se necesitan conductos o una alta presión estática). Un control adecuado del ventilador (por ejemplo, aumentando o reduciendo la velocidad gradualmente) también ayuda a minimizar la formación de escarcha en el evaporador, al evitar temperaturas innecesariamente bajas en la batería.

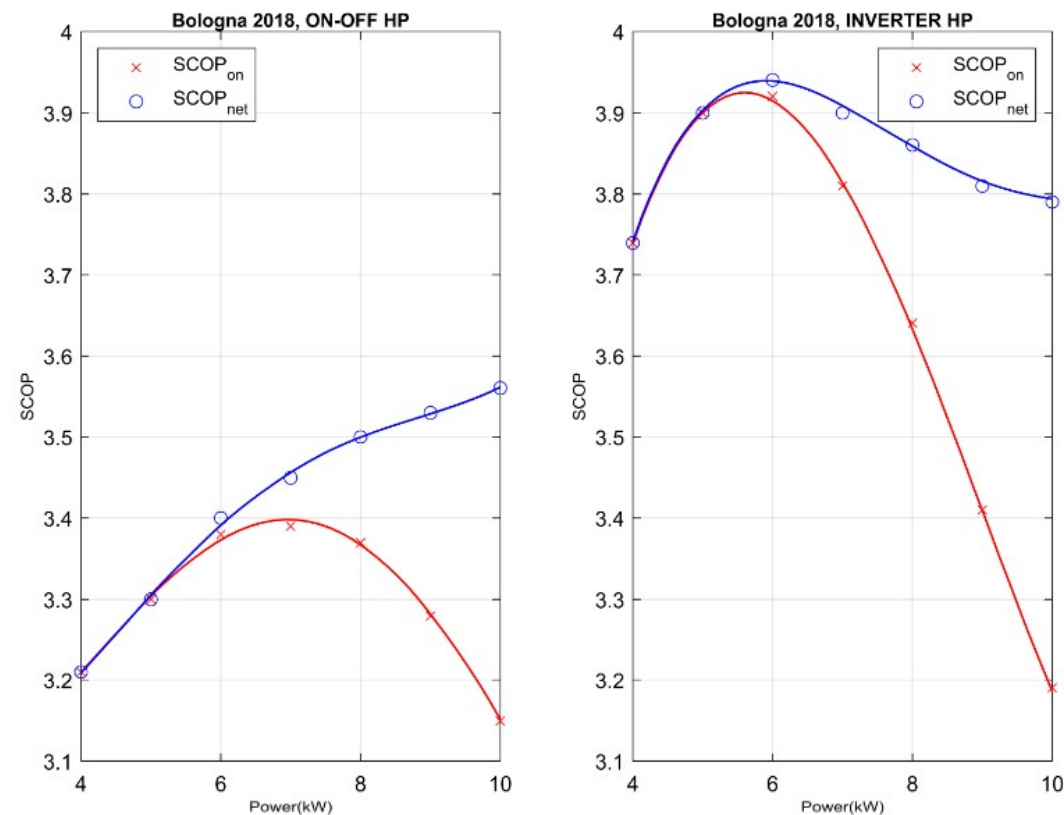


Figura 8.1. Comparación del SCOP entre bombas de calor de tipo on-off y con inversor

Bombas de circulación e integración hidráulica

Las bombas de circulación transportan el fluido caloportador (agua o glicol) entre la bomba de calor y el sistema de distribución del edificio (radiadores, serpentines de suelo, etc.). Las bombas ECM de velocidad variable son el estándar; ajustan el caudal en función de la demanda (diferencial de presión o temperatura). Estas bombas mejoran el uso de la energía al reducir la velocidad con cargas más bajas.

La figura 8.2 muestra un circuito hidráulico típico para una bomba de calor aire/agua: incluye la bomba principal, desacopladores hidráulicos y dispositivos de seguridad (interruptor de caudal, válvula de retención). La correcta ubicación de la bomba es esencial: por ejemplo, las bombas deben colocarse de manera que se eviten los cortocircuitos hidráulicos (p. ej., bombeando a través de un depósito de inercia en lugar de directamente a través de los intercambiadores). En sistemas más grandes o de múltiples circuitos, los esquemas de bombeo primario/secundario o el uso de varias bombas más pequeñas garantizan un caudal estable y evitan que un circuito prive de caudal a otro.

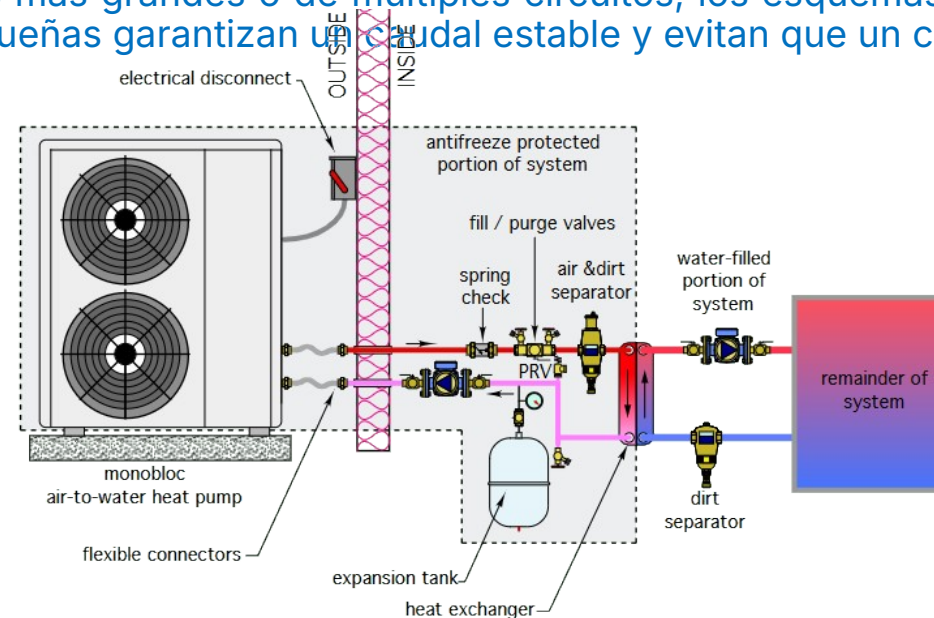


Figura 8. 2. Diagrama del circuito hidráulico con bomba y componentes de seguridad

Interruptores de caudal y dispositivos de seguridad

Los interruptores de caudal garantizan que exista un caudal de fluido suficiente antes de que el compresor o el ventilador entren en funcionamiento. Un diseño habitual es el interruptor de paleta (Figura 8.3.), que se activa cuando hay flujo de agua. Si el caudal cae por debajo de un umbral (por ejemplo, si la bomba se para o se produce una obstrucción), el interruptor envía una señal al controlador para que apague la unidad, protegiendo así a los intercambiadores de calor de la congelación y a los compresores de funcionar en seco.

Otros dispositivos de seguridad incluyen válvulas de alivio de presión, interruptores de alta/baja presión y sensores de congelación. Los sistemas modernos pueden utilizar **sensores de caudal electrónicos** para una monitorización más precisa. Todos estos dispositivos pueden integrarse en el sistema de control para la detección de fallos. Por ejemplo, un sensor de caudal electrónico puede detectar reducciones sutiles del caudal y permitir un mantenimiento preventivo. Las normas (por ejemplo, la EN 378) exigen este tipo de controles de seguridad. La integración adecuada de los interruptores de caudal y presión en la lógica de control es crucial para un funcionamiento fiable y seguro.

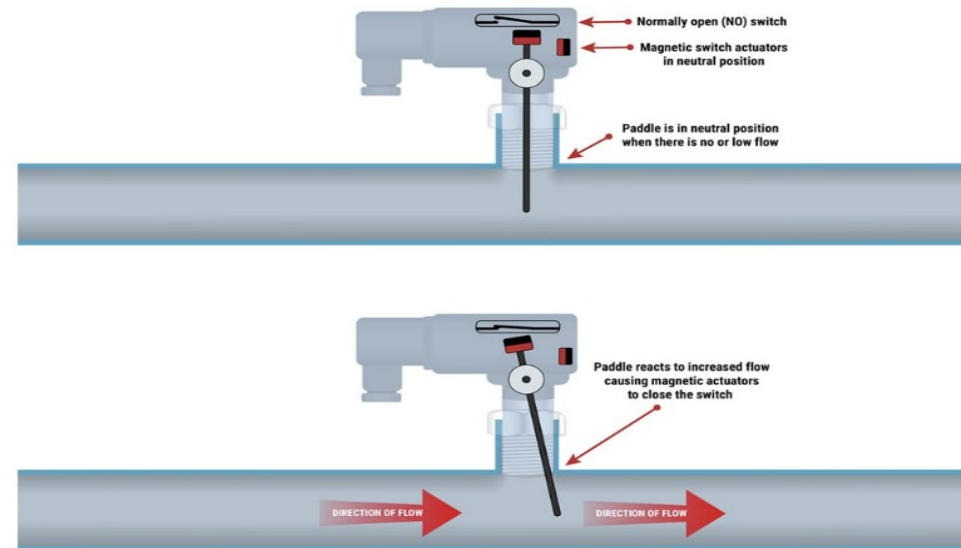


Figura 8. 3. Funcionamiento del interruptor de caudal de tipo paleta

Depósitos de expansión y de compensación

Los depósitos de expansión (depósitos a presión con una cámara de aire) compensan la expansión térmica del agua en circuitos cerrados. A medida que el agua se calienta, se expande; sin un depósito de expansión, la presión aumentaría peligrosamente. El colchón de aire del depósito absorbe este cambio de volumen, manteniendo estable la presión del sistema.

Los depósitos de inercia sirven para desacoplar la bomba de calor del sistema de distribución. Al aumentar el volumen total de agua, amortiguan las oscilaciones de temperatura y evitan los ciclos cortos. Por ejemplo, una bomba de calor pequeña con carga intermitente podría realizar ciclos cortos sin un depósito de inercia. El depósito proporciona una reserva de agua calentada, manteniendo el caudal cuando la demanda disminuye. Es esencial un dimensionamiento correcto: un depósito demasiado pequeño no tiene ningún efecto; uno demasiado grande aumenta el coste y ralentiza la respuesta. La figura 8.4 muestra un ejemplo de circuito con un depósito de inercia y una caldera auxiliar.

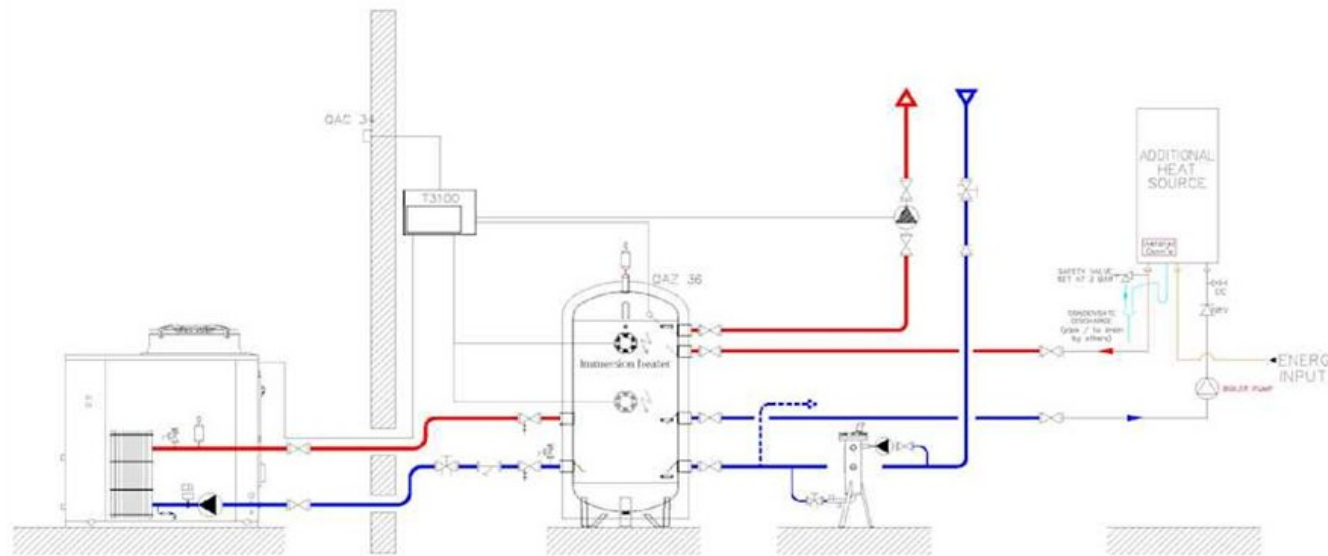


Figura 8.4. Diagrama del sistema con depósito de inercia y caldera

Integración moderna y tendencias

En las instalaciones modernas, muchos de estos componentes hidráulicos vienen premontados en módulos compactos (que combinan funciones de expansión y amortiguación, válvulas preinstaladas, etc.) para facilitar una instalación rápida.

El control digital también se está extendiendo a las bombas y válvulas: por ejemplo, los interruptores de velocidad y caudal de las bombas pueden comunicarse a través de los sistemas de gestión de edificios.

La tendencia general se orienta hacia controles más inteligentes (optimización de caudales, respuesta a la demanda, mantenimiento predictivo) y una integración más estrecha de los dispositivos de seguridad para lograr un mayor SCOP y fiabilidad.

A medida que evolucionan los sistemas de bombas de calor, los ventiladores, las bombas, los sensores y los depósitos se consideran partes integrales de un sistema de climatización inteligente, en lugar de meros componentes pasivos.

Referencias

- **Comité Europeo de Normalización**. (2017). *EN 12831-1: Eficiencia energética de los edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño*. Bruselas.
- **Organización Internacional de Normalización**. (2017). *ISO 52016-1: Eficiencia energética de los edificios. Necesidades energéticas para calefacción y refrigeración*. Ginebra.
- **Comisión Europea**. (2018). *Directiva (UE) 2018/844 por la que se modifica la Directiva EPBD*. Bruselas.
- **Comisión Europea**. (2020). *Estrategia «Ola de renovación» para Europa*. COM(2020) 662 final.
- **AIE**. (2022). *Bombas de calor: seguimiento del progreso de la energía limpia*. París.
- **AIE**. (2023). *El futuro de las bombas de calor*. París.
- **EHPA**. (2022). *Bombas de calor en edificios: aplicaciones, eficiencia e integración de sistemas*. Bruselas.
- **EHPA**. (2023). *Guía de buenas prácticas: Reacondicionamiento de bombas de calor en edificios residenciales*. Bruselas.
- **REHVA**. (2012). *Guía n.º 7: Calefacción a baja temperatura y refrigeración a alta temperatura*. Bruselas.
- **REHVA**. (2018). *Guía n.º 23: Renovación de edificios con sistemas de climatización*. Bruselas.
- **Fraunhofer ISE**. (2020). *Sistemas de bombas de calor en edificios existentes: rendimiento y estrategias de diseño*. Friburgo.
- **Fraunhofer ISE**. (2022). *Resultados del seguimiento de las rehabilitaciones con bombas de calor en Europa*. Friburgo.
- **ASHRAE**. (2020). *Manual ASHRAE: Sistemas y equipos de climatización*. Atlanta.
- **ASHRAE**. (2021). *Manual ASHRAE: Fundamentos*. Atlanta.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F. y Mathiesen, B. V. (2014). *Calefacción urbana de cuarta generación*. **Energy**, 68, 1-11.
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M. y Fedrizzi, R. (2019). *Sistemas de calefacción y refrigeración urbana de quinta generación*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 104, 504-522.
- Brandl, D., Mach, T., Karmann, C. y Struck, C. (2016). *Evaluación del confort térmico y el rendimiento energético de los sistemas de calefacción y refrigeración por radiación*. **Energy and Buildings**, 109, 351-363.
- Unión Europea. (2019). *Directrices de la UE para edificios de consumo energético casi nulo (nZEB)*. Oficina de Publicaciones de la UE.
- **IDAE**. (2023). *Guía Técnica de Bombas de Calor en Rehabilitación de Edificios*. Madrid.
- Hepbasli, A. y Kalinci, Y. (2009). *Una revisión de los sistemas de calentamiento de agua con bombas de calor*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13(6-7), 1211-1229.



