

Módulo 4

Refrigeración urbana

Parte del paquete educativo SHaKE sobre sistemas de calefacción y refrigeración urbanísticos

Guía

Recurso didáctico reutilizable para la educación superior y la formación profesional

Versión: 1.1
Fecha: mayo de 2026

<https://www.shakeproject-dhc.eu/>



Proyecto

Compartir calor y conocimientos sobre comunidades energéticas (SHaKE)
Erasmus+ KA220-HED: Asociaciones de cooperación en la educación superior
N.º de proyecto: 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

Autores

Dr. Adrián Mota-Babiloni, Ghad Alarnaot Alarnaout (Universidad Jaume I de Castellón)

Editores

Eva Szalma, Dr. Adrián Mota-Babiloni, Ghad Alarnaot Alarnaout

Agradecimiento por la financiación de la UE y exención de responsabilidad

Financiado por la Unión Europea. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la Fundación Pública Tempus. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención se hacen responsables de los mismos.

Coordinador

Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, Hungría

Instituciones asociadas

Universidad Jaume I de Castellón, España
Mines Paris – PSL, Francia

Agradecimientos

Esta publicación se ha elaborado en el marco del proyecto SHaKE. El consorcio desea expresar su agradecimiento a todos los docentes, investigadores, profesionales y partes interesadas que han contribuido al desarrollo, la revisión y la mejora de los materiales educativos.

Licencia

Salvo que se indique lo contrario, este material está sujeto a una licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Los usuarios pueden compartir y adaptar el material, siempre que se mencione debidamente al proyecto SHaKE y a los autores, se incluya un enlace a la licencia y se indiquen los cambios realizados.

Cita recomendada:

Universitat Jaume I de Castellón. Módulo 4: Refrigeración urbana. Proyecto SHaKE, 2026.

<https://www.shakeproject-dhc.eu/>



Guía de uso del Módulo 4

Este módulo forma parte del paquete educativo SHaKE, desarrollado para apoyar la enseñanza de los sistemas de calefacción y refrigeración urbanas (DHC) en contextos de educación superior y formación profesional.

El módulo 4 se centra en los sistemas de refrigeración urbana, prestando especial atención a la producción combinada de calor y frío, las tecnologías de producción de frío, los refrigerantes, el almacenamiento de energía térmica, el aprovechamiento del calor residual, las aplicaciones de energías renovables y la evaluación económica y medioambiental de las soluciones de refrigeración urbana. El módulo presenta los principios fundamentales de funcionamiento de las redes de refrigeración urbana y explica cómo se puede producir, distribuir, almacenar e integrar la refrigeración en infraestructuras más amplias de calefacción y refrigeración urbanas.

El objetivo principal de este material escrito es proporcionar una comprensión exhaustiva de los sistemas de refrigeración urbana, incluyendo la producción combinada de calor y frío, el aprovechamiento del calor residual y las aplicaciones de las energías renovables. Además, el módulo pretende ilustrar la implementación práctica de las infraestructuras de calefacción y refrigeración urbanas a través de ejemplos de proyectos realizados.

El módulo examina la producción conjunta de calor y frío, la evaluación técnica de las eficiencias térmicas, el funcionamiento de las enfriadoras y las máquinas de refrigeración por absorción, el papel de las bombas de calor, la relevancia medioambiental de los refrigerantes y la viabilidad de la refrigeración urbana en diferentes contextos urbanos y climáticos. También presenta estrategias de optimización para mejorar el rendimiento del sistema al tiempo que se reducen los costes económicos y medioambientales.

La guía está concebida principalmente como un recurso didáctico reutilizable para educadores, profesores y formadores. Puede utilizarse como apoyo para clases magistrales, actividades de aprendizaje mixto, debates en el aula, trabajos prácticos, cálculos técnicos, simulaciones de rendimiento, estudios de casos y formación para el desarrollo profesional continuo. Las diapositivas de presentación adjuntas, las diapositivas ampliadas de los estudios de casos, el banco de preguntas, el cuestionario de autoevaluación y las actividades prácticas están diseñadas para ayudar a los educadores a adaptar el contenido a su propio contexto docente.

Los estudiantes y los profesionales también pueden utilizar el módulo para el estudio autónomo, especialmente si ya cuentan con conocimientos básicos de termodinámica, transferencia de calor, sistemas de climatización, ciclos de refrigeración, bombas de calor, enfriadoras, calefacción urbana y sistemas energéticos de edificios.

Principales temas tratados en el módulo

- Los sistemas de refrigeración urbana y su papel en las redes modernas de energía urbana
- Principios de calefacción y refrigeración
- Producción combinada de calor y frío y aplicaciones de calefacción y refrigeración simultáneas
- Tecnologías de bombas de calor y enfriadoras
- Integración de bombas de calor, enfriadoras y fuentes de energía renovables en las redes de refrigeración urbana
- Aprovechamiento del calor residual e integración del calor renovable
- Tecnologías de producción de frío, incluidas las máquinas de refrigeración refrigeradas por aire y por agua
- Máquinas de refrigeración por absorción
- Almacenamiento de energía térmica para la refrigeración urbana
- Combinación de sistemas de refrigeración de accionamiento mecánico y térmico
- Refrigerantes: su clasificación, denominación, seguridad e impacto medioambiental
- Refrigerantes naturales y de bajo potencial de calentamiento global (GWP)
- Densidad de la demanda de refrigeración y evaluación de viabilidad
- Aspectos económicos y medioambientales de la refrigeración urbana



- Viabilidad de la refrigeración urbana en comparación con las tecnologías de refrigeración convencionales
- Optimización de las tecnologías de refrigeración urbana
- Estudios de casos reales de refrigeración urbana y de sistemas combinados de calefacción y refrigeración urbanos
- Aplicación práctica de los sistemas de refrigeración urbana en diferentes contextos climáticos y urbanos

Resultados de aprendizaje del módulo 4

El módulo está diseñado para favorecer el desarrollo de las siguientes habilidades y competencias. Al finalizar este módulo, los alumnos deberán ser capaces de:

- comprender los principios termodinámicos y las tecnologías en las que se basan los sistemas de refrigeración urbana;
- explicar los principios fundamentales de funcionamiento de las redes de refrigeración urbana;
- analizar los procesos de producción combinada de calor y frío y calcular su eficiencia operativa;
- distinguir entre las diferentes tecnologías de producción de frío, incluyendo las enfriadoras refrigeradas por aire, las enfriadoras refrigeradas por agua y las máquinas de refrigeración por absorción;
- evaluar y justificar la integración óptima de bombas de calor, enfriadoras, almacenamiento de energía térmica y fuentes de energía renovables en las redes de refrigeración urbana;
- evaluar el impacto medioambiental derivado del uso de diversos refrigerantes y tecnologías de refrigeración;
- comparar refrigerantes desde el punto de vista de la seguridad, el rendimiento, el potencial de calentamiento global (GWP) y el impacto medioambiental;
- evaluar la viabilidad económica de los sistemas de refrigeración urbana en relación con la densidad de la demanda de refrigeración, los costes de inversión, los costes operativos y el rendimiento a largo plazo del sistema;
- comparar las soluciones de refrigeración urbana con las tecnologías de refrigeración convencionales desde las perspectivas técnica, económica y medioambiental;
- interpretar casos prácticos reales de refrigeración urbana y de calefacción y refrigeración urbanas, e identificar los principales factores que influyen en su viabilidad y transferibilidad;
- aplicar estrategias de optimización para mejorar el rendimiento del sistema y, al mismo tiempo, reducir los costes económicos y medioambientales.

Carga de trabajo estimada

Este módulo supone aproximadamente 7,9 horas de aprendizaje, incluyendo clases magistrales, aplicaciones prácticas, trabajo con casos prácticos, estudio autónomo y evaluación.

Los docentes pueden adaptar la carga de trabajo en función del nivel del curso, los materiales seleccionados y el formato de enseñanza. El módulo puede utilizarse como:

- una unidad didáctica completa,
- un conjunto de materiales de clase seleccionados,
- un componente de aprendizaje mixto,
- un paquete de cálculos prácticos y simulaciones,
- un paquete de casos prácticos y debates,
- o un recurso complementario para cursos ya existentes.

Actividades y horas de aprendizaje



Tipo de actividad	Tiempo asignado	Descripción
Clases magistrales / Asimilación teórica	3 h	Análisis en profundidad de los principios, las tecnologías y las aplicaciones de la refrigeración urbana a través de clases teóricas y materiales de aprendizaje guiados
Aplicación práctica	1 h	Ejercicios que incluyen tareas de diseño de sistemas, cálculos técnicos, simulaciones de rendimiento y comparación de configuraciones de refrigeración o bombas de calor
Análisis de casos	0,5 h	Revisión crítica de proyectos reales de refrigeración urbana, teniendo en cuenta su diseño técnico y su adaptación a diferentes condiciones climáticas, urbanísticas y operativas
Investigación independiente / Autoaprendizaje	3 h	Lectura autónoma, revisión de bibliografía especializada, repaso de los materiales didácticos y preparación para las tareas de evaluación
Evaluación	0,4 h	Cuestionario de autoevaluación a nivel de módulo, preguntas seleccionadas del banco de preguntas, informe técnico, presentación de proyecto o actividad de evaluación final
Total de horas de aprendizaje	aprox. 7,9 h	

Público destinatario

Esta guía está dirigida principalmente a educadores, profesores y formadores que deseen utilizar o adaptar los materiales de SHaKE en sus propias actividades docentes o formativas.

Los principales destinatarios son:

- profesores de educación superior en ingeniería, instalaciones de edificios, sistemas energéticos, calefacción y refrigeración urbanizadas, climatización y refrigeración;
- formadores que participan en la formación profesional o continua sobre sistemas de calefacción y refrigeración urbanizados;
- educadores que desarrollen actividades de aprendizaje mixtas, modulares u orientadas a la práctica;
- personal académico que busque recursos didácticos reutilizables sobre sistemas energéticos urbanos sostenibles;
- formadores y profesores que trabajen en temas relacionados con la refrigeración urbana, las bombas de calor, las enfriadoras, los refrigerantes, el almacenamiento de energía térmica, las infraestructuras energéticas urbanas y la eficiencia energética.

Los materiales también pueden ser utilizados por estudiantes, profesionales y personas que estudian por su cuenta y deseen profundizar en temas específicos de forma individual. Para su uso autónomo, se recomienda contar con conocimientos previos básicos en los campos de ingeniería pertinentes.



Uso recomendado para docentes y formadores

El módulo 4 puede utilizarse de forma flexible como unidad didáctica completa o como conjunto de recursos didácticos seleccionados. Los educadores pueden combinar los materiales en función del nivel del curso, el tiempo lectivo disponible y los resultados de aprendizaje previstos.

Necesidades docentes

Introducción al tema

Preparación de los alumnos antes de la clase

Apoyo a las clases magistrales o seminarios

Ampliación del debate sobre los casos prácticos

Comprobación de la comprensión

Desarrollo de habilidades de ingeniería aplicada

Apoyo a la evaluación medioambiental

Apoyo al análisis económico y de viabilidad

Trabajo de apoyo con casos prácticos

Apoyo a la revisión independiente

Adaptación a los contextos docentes locales

Recurso sugerido para el módulo 4

Utilice la descripción general del módulo y las diapositivas introductorias para presentar la relevancia de la refrigeración urbana, la producción combinada de calor y frío, y el papel de la refrigeración en los sistemas modernos de energía urbana.

Asigne secciones seleccionadas de la guía como lectura previa para actividades de aula invertida o de aprendizaje mixto.

Utilice las diapositivas principales de la presentación para explicar los principios de la refrigeración urbana, la calefacción y refrigeración simultáneas, las enfriadoras, la refrigeración por absorción, los refrigerantes, el almacenamiento de energía térmica, los aspectos económicos y medioambientales, y una selección de casos prácticos.

Utilice las diapositivas de ampliación de los casos prácticos para presentar proyectos adicionales ya realizados de refrigeración urbana y de calefacción y refrigeración urbanas en diferentes contextos.

Utilice preguntas seleccionadas del banco de preguntas para el debate, breves comprobaciones en clase, evaluación formativa o cuestionarios en la plataforma de aprendizaje (LMS).

Utilice el ejercicio práctico para realizar trabajos basados en cálculos o simulaciones sobre el rendimiento de los sistemas de refrigeración y las bombas de calor, la comparación de refrigerantes, el análisis del COP/EER y el impacto medioambiental.

Utilice las secciones y ejercicios relacionados con los refrigerantes para debatir sobre el GWP, los refrigerantes de bajo GWP, los refrigerantes naturales y las implicaciones medioambientales de la elección del refrigerante.

Utiliza las secciones dedicadas a la evaluación económica y medioambiental para analizar la densidad de la demanda de refrigeración, los costes de inversión, los costes operativos, las consideraciones tarifarias y la viabilidad a largo plazo.

Utilice los ejemplos de proyectos realizados para comparar cómo se adaptan las soluciones de refrigeración urbana a diferentes contextos climáticos, urbanos, técnicos y económicos.

Indique a los alumnos que realicen el cuestionario de autoevaluación del módulo una vez que hayan estudiado los materiales pertinentes.

Seleccione, combine o modifique las secciones de la guía, las diapositivas, las preguntas, los ejercicios prácticos y los materiales de los casos prácticos de acuerdo con el plan de estudios, el nivel de los participantes y el contexto profesional.

Itinerario recomendado para estudiantes autónomos



Los estudiantes y profesionales que utilicen el módulo de forma independiente pueden seguir la secuencia que se indica a continuación.

Paso

Revisa la presentación introductoria

Estudia los materiales de la guía

Repasa las secciones sobre la producción combinada de calor y frío

Estudia las tecnologías de producción de frío

Revisa las secciones sobre refrigerantes

Examinar los aspectos económicos y medioambientales

Vea el vídeo del módulo

Realiza el cuestionario de autoevaluación

Realiza el ejercicio práctico

Revisa los casos prácticos

Revisa el banco de preguntas

Actividad sugerida

Familiarízate con los conceptos principales, la terminología y la estructura del módulo.

Lea las explicaciones detalladas, los principios de ingeniería y los conceptos de refrigeración urbana que se presentan en la guía.

Comprenda cómo la calefacción y la refrigeración simultáneas pueden mejorar la eficiencia energética y favorecer la integración de la energía de red.

Compara las enfriadoras, las máquinas de refrigeración por absorción y las soluciones de almacenamiento de energía térmica.

Estudia la clasificación de los refrigerantes, su evolución histórica, su clasificación de seguridad, su impacto medioambiental y las tendencias futuras en materia de refrigerantes.

Analiza el papel de la densidad de la demanda de refrigeración, la viabilidad, los costes de inversión, el rendimiento medioambiental y la optimización.

Utiliza el vídeo del módulo y las preguntas de evaluación adjuntas para profundizar en un tema, concepto o aspecto práctico concreto del módulo.

Comprueba tu comprensión de los conceptos clave y los principios técnicos tratados en el módulo.

Aplica los conocimientos adquiridos analizando el rendimiento de los sistemas de refrigeración y las bombas de calor, la comparación de refrigerantes y el impacto medioambiental.

Compara proyectos reales de refrigeración urbana y de calefacción y refrigeración urbanas, y reflexiona sobre su aplicabilidad a otros contextos.

Utiliza las preguntas para repasar, debatir o prepararte para la evaluación.



Materiales de apoyo disponibles

Los recursos de aprendizaje y materiales de evaluación disponibles incluyen:

- diapositivas de presentación sobre los temas del módulo;
- diapositivas de casos prácticos ampliados que presentan proyectos adicionales ya realizados de refrigeración urbana y de calefacción y refrigeración urbanas;
- un banco de preguntas reutilizable y una clave de respuestas;
- un cuestionario de autoevaluación a nivel de módulo;
- un vídeo del módulo con preguntas de evaluación adjuntas;
- un ejercicio práctico basado en la simulación de sistemas de refrigeración y bombas de calor, la comparación de refrigerantes, el análisis del COP/EER y la evaluación del impacto medioambiental, que incluye soluciones sugeridas;
- una actividad de estudio de caso basada en proyectos ya realizados de refrigeración urbana y de calefacción y refrigeración urbanas;



Índice

Refrigeración urbana	12
1.1. Principios de calefacción y refrigeración	12
1.1.1. Refrigeración.....	12
1.1.2. Bombas de calor	13
1.2. Aplicaciones de calefacción y refrigeración simultáneas.....	14
1.2.1. Principio de calefacción y refrigeración simultáneas (SHC).....	14
1.2.2. Componentes clave en la calefacción y refrigeración simultáneas (SHC)	15
1.2.3. Ventajas del SHC.....	16
1.2.4. Retos del SHC	16
1.2.5. Aplicaciones del SHC en redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC)	16
1.3. Conexión de las tecnologías de bombas de calor y enfriadoras a las redes de calefacción y refrigeración de distrito (DHCN)	17
1.3.1. Tecnologías de bombas de calor: observaciones	17
1.3.2. Tecnologías emergentes y tendencias futuras.....	17
1.4. Conexión de las tecnologías de bombas de calor y enfriadoras a las redes de calefacción y refrigeración de distrito	18
1.4.1. Compresores.....	18
1.4.2. Intercambio de calor.....	19
1.4.3. Almacenamiento de energía térmica.....	20
1.5. Integración de bombas de calor, configuraciones y refrigerantes	20
1.5.1. Posibilidades de integración.....	21
1.5.2. Influencia de las temperaturas de funcionamiento	22
1.6. Calor residual y renovable.....	23
1.7. Calor residual y renovable.....	24
2. Tecnologías de producción de frío	25
2.1. Enfriadoras	25
2.1.1. Tipos de enfriadoras	25
2.1.2. Parámetros clave y eficiencia.....	27
2.1.3. Índice de eficiencia energética estacional (SEER).....	27
2.2. Máquinas de refrigeración por absorción	29
2.2.1. Tipos de Enfriadoras	29
2.2.2. Enfriadoras por absorción de vapor	29
2.2.3. Refrigeración por absorción	29
2.2.4. Tipos de sistemas de refrigeración por absorción.....	31



2.3.	Almacenamiento de energía térmica (TES)	33
2.3.1.	Principal ventaja del TES	33
2.3.2.	Tipo de TES (Tabla 3).....	33
2.4.	Combinación de sistemas de accionamiento mecánico y sistemas de absorción accionados por energía térmica.	36
2.5.	Conclusiones.....	38
3.	Refrigerantes.....	39
3.1.	Introducción.....	39
3.2.	Historia y evolución	43
3.3.	Denominación y propiedades	44
3.4.	Resumen de los indicadores medioambientales (fig. 23).....	48
3.5.	El futuro de los refrigerantes	55
3.6.	Conclusiones.....	56
4.	Aspectos económicos y medioambientales.....	56
4.1.	Introducción.....	57
4.2.	Demanda de densidad	57
4.3.	Viabilidad de la refrigeración urbana en comparación con otras tecnologías 59	
4.4.	Impacto medioambiental de la refrigeración urbana.....	63
4.5.	Optimización de las tecnologías de refrigeración urbana.....	65
4.6.	Conclusiones.....	67
5.	Estudios de casos de proyectos realizados.....	67
5.1.	Red de refrigeración urbana de la Universidad James Cook (Townsville, Australia) [38].....	68
5.2.	Barrio La Pinada.....	70
5.3.	Ampliación de la red de DHC de Bristol Redcliff.....	72
5.4.	DHC Parc de l'Alba	73
5.5.	DHC de Barcelona (España).....	74
5.6.	DHC Gran Estocolmo.....	77
5.7.	Recuperación de energía frigorífica (DCN) a partir de la vaporización del gas natural licuado	79
5.8.	DCN, ciudad de Estocolmo	83
5.9.	DCN combinado con electrolizadores de hidrógeno	84
5.10.	DCN para complejos hoteleros	86
5.11.	Conclusiones	87
	Referencias	89





Refrigeración urbana

1.1. Principios de calefacción y refrigeración

Introducción

La calefacción y la refrigeración son fundamentales para el confort tanto en invierno como en verano. La calefacción también es necesaria en los edificios para el suministro de agua caliente, normalmente a diferentes temperaturas. Sin embargo, los mayores consumidores de calefacción y refrigeración se encuentran en la industria, y esta última también se utiliza para el procesamiento, el almacenamiento y el transporte de alimentos. Los requisitos de temperatura para la calefacción y la refrigeración varían según las aplicaciones; la refrigeración puede alcanzar desde los $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la calefacción hasta los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los procesos de refrigeración se basan principalmente en sistemas de compresión de vapor, también conocidos como Enfriadoras, cuando se trata de enfriar agua a unos $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. La producción de calor se basa en bombas de calor, un concepto similar al de los Enfriadoras. Sin embargo, a temperaturas más altas o dependiendo de la aplicación, sigue basándose en calderas de combustibles fósiles, que acabarán siendo sustituidas, de forma progresiva, por procesos renovables [1].

Aspectos técnicos como la durabilidad, la facilidad de mantenimiento, la simplicidad, el volumen y la seguridad son esenciales en la calefacción y la refrigeración. Sin embargo, cada día cobra mayor importancia la eficiencia del sistema, ya que esta influye en los costes y en el impacto medioambiental. Las tecnologías tradicionales de calefacción y refrigeración pueden combinarse con redes de calefacción y refrigeración urbanas (Fig. 1) para mejorar, de diversas formas, la eficiencia y la rentabilidad económica. Las redes de calefacción urbana pueden utilizarse como vectores térmicos para la calefacción producida en centrales de producción de calefacción, ya sean centrales o distribuidas. Lo mismo es válido para las redes de refrigeración urbana y las máquinas de refrigeración. Además, las redes de calefacción y refrigeración urbanas pueden establecer condiciones de funcionamiento favorables para que las bombas de calor y las máquinas de refrigeración produzcan calefacción y refrigeración de forma más eficiente. También pueden utilizarse para precalentar o preenfriar el sumidero o la fuente de calor.

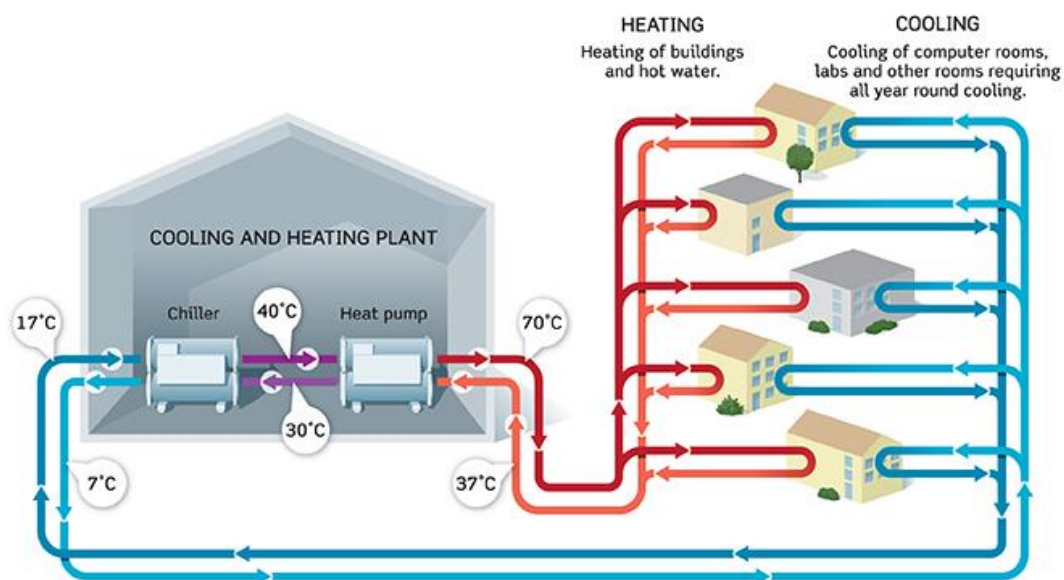


Fig. 1. Conexiones de las redes de refrigeración urbana (DCN) y de calefacción urbana (DHN)[2] .

1.1.1. de refrigeración



La refrigeración consiste en eliminar el calor de una sustancia o un espacio para reducir su temperatura. Es esencial para el confort térmico, la conservación de materiales y las aplicaciones industriales. Los procesos de refrigeración incluyen:

1. Extracción de calor.

El calor se elimina de un sistema mediante conducción, convección o radiación. Normalmente se consigue transfiriendo el calor a un fluido más frío (por ejemplo, aire o agua).

2. Evaporación.

Aprovecha el calor latente de vaporización, en el que se absorbe energía térmica para convertir un líquido en vapor. Se aplica ampliamente en sistemas de refrigeración por evaporación y ciclos de refrigeración.

3. Ciclos de refrigeración

Basados en sistemas de compresión de vapor, suelen requerir un aporte de electricidad. Alto rendimiento. Su límite máximo viene determinado por el ciclo inverso de Carnot.

Calefacción

La calefacción proporciona calor a una sustancia o un espacio para aumentar su temperatura. Es esencial para el confort térmico, los procesos industriales y el calentamiento de agua. Los procesos de calefacción incluyen:

1. Extracción de calor

El calor se aporta a un sistema mediante conducción, convección o radiación. Normalmente se consigue transfiriendo calor a un fluido más frío (por ejemplo, aire o agua). Puede incorporar calor renovable, paneles solares térmicos, calderas, recuperación de calor residual...

2. Condensación

Aprovecha el calor latente de vaporización, en el que se absorbe energía térmica para convertir el vapor en líquido.

3. Bomba de calor

Basada en sistemas de compresión de vapor, requiere principalmente un aporte de electricidad y ofrece un alto rendimiento.

Como se puede observar, los procesos son similares a los de la refrigeración, pero en sentido inverso. Por lo tanto, el estudio de la refrigeración puede ayudar a comprender la calefacción, y viceversa.

1.1.2. Bombas de calor

Además del calor residual o el calor renovable, que pueden inyectarse en las redes de calefacción urbana con un bajo coste operativo, la mayor parte de la calefacción se proporciona mediante calderas (que pueden considerarse renovables si se utiliza biomasa, biogás, etc.) o bombas de calor.

Las bombas de calor, basadas principalmente en sistemas de compresión de vapor, pueden funcionar para calefacción, refrigeración o ambas ([fig. 2](#)). Depende en gran medida de cuál sea el objetivo del proceso térmico que se considere, pero las bombas de calor siempre generan calefacción y refrigeración simultáneamente. Una vez dimensionada la instalación, la intensidad de la refrigeración y la calefacción depende de la frecuencia del compresor, que es controlada por un inversor en función de la necesidad principal. Sin embargo, ambas varían proporcionalmente.



Si la bomba de calor (término utilizado para la calefacción) está programada para elegir entre calefacción y refrigeración, se denomina bomba de calor reversible. Dependiendo de su finalidad, puede ser solo para refrigeración, aire acondicionado, sistema de refrigeración, congelador, enfriador, etc.

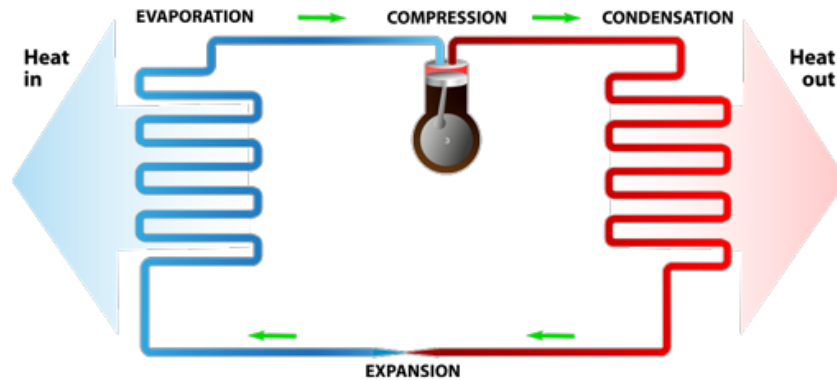


Fig. 2. Sistema de compresión de vapor (bomba de calor) [3].

1.2. Aplicaciones de calefacción y refrigeración simultáneas

1.2.1. Principio de calefacción y refrigeración simultáneas (SHC)

La calefacción y refrigeración simultáneas se producen principalmente en las bombas de calor (fig. 3), la tecnología más habitual para la refrigeración y la calefacción por debajo de los 100 °C. La calefacción y la refrigeración simultáneas no suelen tenerse en cuenta en sistemas pequeños, ya que existen muchos retos para que resulten rentables. Las redes de calefacción y refrigeración urbanas son beneficiosas para transportar el exceso de calefacción o refrigeración no utilizado en la misma planta donde se genera la calefacción o refrigeración principal, lo que aporta un beneficio económico adicional al propietario de la planta y reduce el consumo energético global. Las redes de calefacción y refrigeración urbanas evitan la necesidad de almacenamiento de energía térmica o incluso pueden combinarse con este.

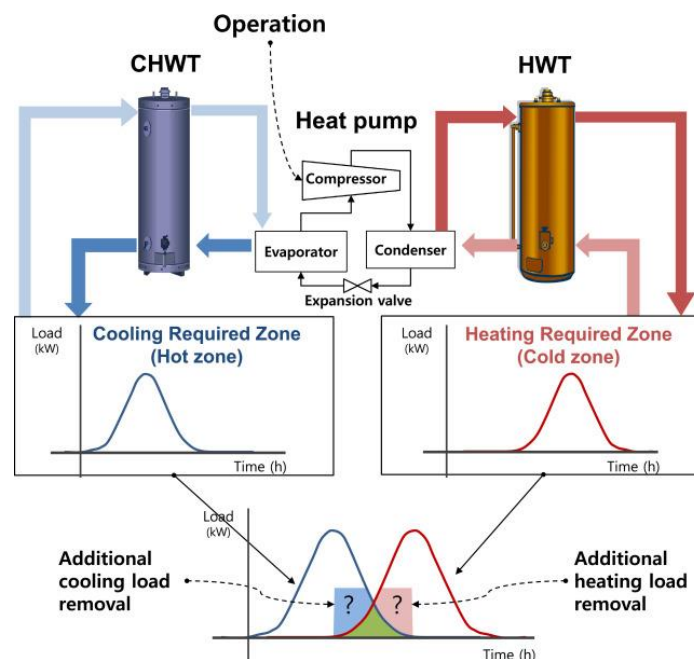


Fig. 3. Bomba de calor de calefacción y refrigeración simultáneas[4] .



Por ejemplo, los sistemas de refrigeración de los supermercados (fig. 4) pueden aprovechar el calor de un enfriador de gas o de un condensador —que normalmente se disipa al aire— e inyectarlo en una red de calefacción urbana.

La figura muestra un ejemplo en el que el sistema central de compresión de vapor (derecha) se utiliza para frigoríficos y congeladores, y el calor generado en la descarga del compresor se aprovecha para la calefacción de espacios. El calor restante se disipa, pero con un sistema de control adecuado, también puede inyectarse en la red de calefacción urbana o almacenarse.

El sistema auxiliar (izquierda) inyecta calor en la red de calefacción urbana y utiliza la refrigeración para subenfriar mecánicamente el sistema central (con el fin de aumentar el rendimiento energético).

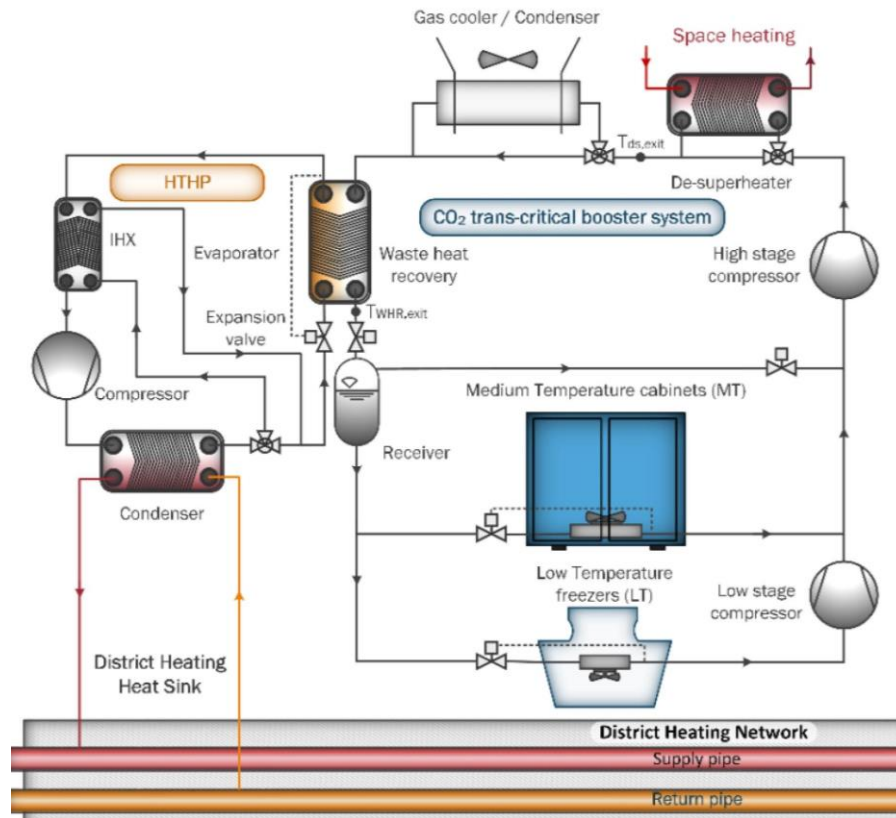


Fig. 4. Sistemas de refrigeración de supermercados con calefacción y refrigeración simultáneas[5] .

1.2.2. Componentes clave en la calefacción y refrigeración simultáneas (SHC)

En los sistemas de calefacción y refrigeración (DHC), la energía se transporta a los edificios a través de una red de tuberías aisladas que conducen agua caliente, vapor, agua refrigerada o refrigerantes. Sin embargo, se pueden considerar los siguientes componentes clave para diversificar las opciones y ampliar las posibilidades de aprovechamiento energético.

1. Bombas de calor/enfriadoras. Las bombas de calor son fundamentales en los sistemas SHC, ya que pueden extraer calor de un proceso de refrigeración y transferirlo simultáneamente a un sistema de calefacción, actuando como puente entre las necesidades de calefacción y refrigeración. Utilizan ciclos de compresión de vapor o de absorción para transferir energía entre sumideros y fuentes de calor.
2. Red de distribución de energía térmica. Las tuberías aisladas transportan la energía de calefacción y refrigeración hacia y desde los edificios. Los controles avanzados garantizan una distribución eficiente basada en la demanda en tiempo real.



3. Sistemas de recuperación de energía. Los intercambiadores de calor capturan y transfieren el calor residual (calor gratuito) de un lado del sistema (carga de refrigeración) a otro (carga de calefacción) para satisfacer las demandas de calefacción. Por ejemplo, el calor rechazado por los Enfriadoras o los sistemas de aire acondicionado durante la refrigeración puede capturarse y reutilizarse para la calefacción.
4. Cogeneración (CHP). Las unidades de cogeneración pueden integrarse en los sistemas de calefacción y refrigeración centralizados (DHC) para generar electricidad y producir calor, lo que mejora la eficiencia del sistema.
5. Almacenamiento de energía térmica (TES). Los sistemas TES (por ejemplo, depósitos de agua caliente o de agua refrigerada) suelen incorporarse para almacenar el exceso de energía térmica durante los periodos de baja demanda, lo que garantiza un funcionamiento eficiente en las horas punta.

1.2.3. Ventajas del SHC

1. Eficiencia energética: Al recuperar y reutilizar el calor residual, los sistemas de SHC reducen significativamente el consumo de energía en comparación con los sistemas independientes de calefacción y refrigeración.
2. Reducción de la huella de carbono: El aprovechamiento del calor residual minimiza la dependencia de los combustibles fósiles, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.
3. Ahorro económico: Compartir la infraestructura de calefacción y refrigeración reduce los costes de capital y de explotación de la red.
4. Flexibilidad: los sistemas SHC se adaptan a las diferentes demandas de calefacción y refrigeración, lo que los hace ideales para desarrollos de uso mixto (por ejemplo, zonas residenciales, comerciales e industriales).
5. Gestión de picos de carga: Los sistemas SHC suavizan los picos de demanda energética al satisfacer simultáneamente las necesidades tanto de calefacción como de refrigeración.

1.2.4. Retos de los sistemas SHC

1. Inversión inicial: Elevados costes iniciales de infraestructura y sistemas de bombas de calor.
2. Diseño complejo del sistema: Requiere una ingeniería y un dimensionamiento precisos para equilibrar las cargas simultáneas de calefacción y refrigeración.
3. Almacenamiento de energía: Es fundamental contar con sistemas TES eficaces para gestionar los desajustes entre las demandas de calefacción y refrigeración a lo largo del tiempo.
4. Integración con energías renovables: La combinación de los sistemas SHC con fuentes de energía renovables (por ejemplo, energía solar térmica o geotérmica) puede mejorar la sostenibilidad, pero requiere una planificación cuidadosa.
5. Control: La calefacción y la refrigeración deben consumirse, transportarse, almacenarse o disiparse en todo momento para lograr un control adecuado de las temperaturas.

1.2.5. Aplicaciones del SHC en redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC)

Concebido a la perfección para redes de calefacción y refrigeración distribuidas de quinta generación (5DG), aunque también puede adaptarse a las redes tradicionales de calefacción distribuida (DHN) y de refrigeración distribuida (CKN). En particular:

1. Desarrollos urbanos de uso mixto: Se puede dar servicio de manera eficiente a edificios residenciales, comerciales y de oficinas con demandas térmicas variables.
2. Parques industriales: Las industrias con grandes necesidades de refrigeración (por ejemplo, los centros de datos) pueden suministrar calor a procesos o comunidades cercanas.



3. Complejos hospitalarios: Los hospitales necesitan calefacción para la esterilización y refrigeración para la comodidad de los pacientes al mismo tiempo, lo que hace que el SHC sea muy adecuado.
4. Campus universitarios: Los grandes campus con necesidades térmicas diversas pueden optimizar el uso de la energía mediante sistemas centralizados de SHC.

Futuro:

1. Sistemas híbridos
2. : Integración de fuentes renovables y tecnologías avanzadas de bombas de calor.
3. Digitalización: Uso de redes inteligentes y el Internet de las cosas (IoT) para optimizar la distribución de la energía térmica.
4. Energía circular: Mayor énfasis en la recuperación de calor residual de diversas fuentes, como centros de datos y procesos industriales.

1.3. Conexión de las tecnologías de bombas de calor y enfriadoras a las redes de calefacción y refrigeración (DHCN)

1.3.1. Observaciones sobre las tecnologías de bombas de calor

Una vez analizadas estas tecnologías en la sección 3.5.5, cuando se conecten a una red de calefacción urbana (DHN) o a una red de refrigeración urbana (DCN), el funcionamiento cambiará: en lugar de disipar o absorber calor del ambiente, de las aguas subterráneas, del agua de mar o del agua conectada a una torre de refrigeración, etc., se conectarán a la red térmica.

En la mayoría de los casos se tratará de bombas de calor de fuente de agua o enfriadoras refrigeradas por agua, pero el calor también puede transferirse al aire como fluido caloportador o almacenarse en el suelo.

Las bombas de calor basadas en la compresión de vapor son actualmente los sistemas más eficientes, con coeficientes de rendimiento (COP) que oscilan entre 3 y 6. Por el contrario, los sistemas de absorción tienen COP más bajos, normalmente entre 0,5 y 1,5, pero pueden funcionar de forma económica cuando se alimentan de calor residual o de fuentes térmicas renovables, requiriendo electricidad únicamente para los componentes auxiliares. Los sistemas híbridos se encuentran en su mayoría en fases iniciales de desarrollo, limitándose principalmente a proyectos de investigación o estudios de casos. Por su parte, las tecnologías calóricas aún están a décadas de su comercialización, pero tienen potencial a largo plazo, ya que no dependen de refrigerantes, lo que elimina las fugas y reduce las necesidades de mantenimiento.

1.3.2. Tecnologías emergentes y tendencias futuras

1. Refrigerantes naturales:

- a) Uso creciente de refrigerantes como el amoníaco (NH_3), el dióxido de carbono (CO_2) y los hidrocarburos (p. ej., propano, isobutano) debido a su bajo potencial de calentamiento global y a su potencial nulo de agotamiento del ozono.
- b) Retos asociados a la inflamabilidad (hidrocarburos) y a las altas presiones de funcionamiento (CO_2).

2. Bombas de calor de alta temperatura:

- a) Capaces de suministrar calor a temperaturas superiores a 100 °C, adecuadas para aplicaciones industriales y para su integración en la red de calefacción urbana (DHN).
- b) Utilizan fluidos de trabajo avanzados como el R-1234ze(E) o el R-1336mzz(Z) para una mayor estabilidad térmica



3. Digitalización e IoT:

- a) Bombas de calor y enfriadoras inteligentes equipadas con sensores y conectividad IoT para la supervisión del rendimiento en tiempo real, la detección de averías y el mantenimiento predictivo.

Algoritmos avanzados para la respuesta a la demanda y la reducción de picos de consumo.

4. Refrigeración termoeléctrica y magnetocalórica:

- a) Bombas de calor termoeléctricas: utilizan el efecto Peltier para refrigerar o calentar sin piezas móviles.
- b) Refrigeración magnetocalórica: aprovecha los materiales magnetocalóricos para proporcionar refrigeración sin refrigerantes.
- c) Retos asociados a la escalabilidad limitada y a los altos costes.

5. Sistemas híbridos:

- a) Integración de bombas de calor y enfriadoras con fuentes de energía renovables (p. ej., energía solar térmica, energía geotérmica).
- b) Uso del almacenamiento de energía térmica para optimizar la gestión de la carga.

6. Integración con sistemas de energía de distrito:

- a) Redes de calefacción y refrigeración urbanas para aplicaciones simultáneas de calefacción y refrigeración con bombas de calor y enfriadoras, y sistemas de recuperación de energía para mejorar la eficiencia.

1.4. Conexión de las tecnologías de bombas de calor y enfriadoras a las redes de calefacción y refrigeración de distrito

1.4.1. Compresores

La tecnología de los Enfriadoras y las bombas de calor depende del tipo de compresores, que se seleccionan principalmente en función de la aplicación, la capacidad de calefacción o refrigeración (fig. 5) y la diferencia de temperatura entre el sumidero de calor y la fuente (relación de presión).

Esto influirá en la elección del refrigerante, el tamaño de la instalación, el coste, el control y otros componentes de seguridad o auxiliares. En función del dimensionamiento o la optimización, los compresores también pueden conectarse en paralelo. La denominación de la enfriadora depende del tipo de compresor y de la disipación o absorción de calor con el entorno (refrigerada por aire o por agua).

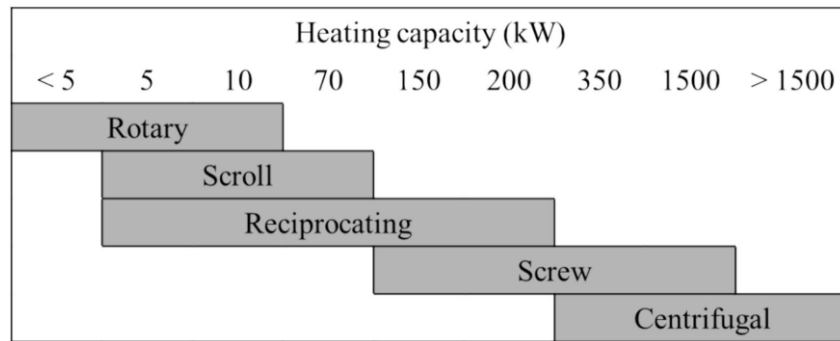


Fig. 5. Tipo de compresor en función del rango de potencia calorífica[6] .

- **Compresores avanzados**

En función del tipo de compresor, también se pueden denominar Enfriadoras avanzados y de alta capacidad:

1. Enfriadoras con cojinetes magnéticos:

- a) Utilizan cojinetes magnéticos para el compresor, lo que reduce la fricción mecánica.
- b) Ventajas: alta eficiencia, bajo nivel de ruido y menor mantenimiento.
- c) Limitaciones: alto coste inicial.

2. Enfriadoras centrífugas:

- a) Utilizan un compresor centrífugo para hacer circular los refrigerantes.
- b) Ventajas: alta capacidad y eficiencia para aplicaciones a gran escala.
- c) Limitaciones: No son ideales para sistemas más pequeños debido a sus elevados costes.

1.4.2. Intercambio de calor

La mayor parte de los intercambios de calor entre las bombas de calor y los Enfriadoras, así como entre las redes de calefacción central (DCN) y las redes de refrigeración central (DHN), se basan en intercambiadores de calor. Existen diferentes tipos de tecnologías, según diversas clasificaciones, tal y como se muestra en la sección 3.5.3.1. Los intercambiadores de calor más comunes son los de tipo carcasa y tubos, utilizados en procesos petroquímicos; los de microcanales, empleados en el aire acondicionado móvil; o los intercambiadores de calor refrigerados por aire, para la disipación del aire en los condensadores. Dado que resulta más eficiente, el intercambio de calor es convectivo o con cambio de fase. No obstante, puede basarse en la convección natural, como en el caso de los congeladores o frigoríficos domésticos. La tecnología más compacta y eficiente para el intercambio de calor de líquido a líquido son los intercambiadores de calor de placas.

Los intercambiadores de calor de placas son los más habituales para el intercambio de calor de agua a agua, en condensadores y evaporadores.

1. **Precisión en la transferencia de calor:** mejor aproximación de temperatura, flujo en contracorriente preciso, entre un 80 % y un 90 % menos de volumen retenido.
2. **Bajo coste:** baja inversión de capital, instalación, mantenimiento limitado y bajos costes de funcionamiento.
3. **Máxima fiabilidad:** menos incrustaciones, tensiones, desgaste y corrosión.
4. **Respetuosos con el medio ambiente:** menor consumo de energía para la mayoría de los procesos y menor necesidad de limpieza.
5. **Fácil ampliación de la capacidad:** placas ajustables en los bastidores existentes.



Limitaciones asociadas a las altas temperaturas, la presión, el sellado y la obstrucción por partículas. Esto se soluciona con un diseño y un mantenimiento adecuados.

1.4.3. Almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de energía térmica (TES) (fig. 6) es esencial para desplazar la carga máxima en calefacción o refrigeración. También se utiliza en redes en las que las temperaturas nocturnas o diurnas pueden aprovecharse para la refrigeración o calefacción gratuitas, y cuando se genera energía renovable o calor residual en momentos de máxima demanda. Las principales tecnologías de TES son el calor sensible, el calor latente (depósitos de agua), los materiales de cambio de fase o el almacenamiento en hielo, y el TES termoquímico. El TES incluye el almacenamiento de calefacción o refrigeración. El principal inconveniente es el volumen necesario por kWh. Los materiales para el TES de cambio de fase y el TES termoquímico se encuentran en una fase inicial de desarrollo, pero pueden contribuir a resolver este problema.

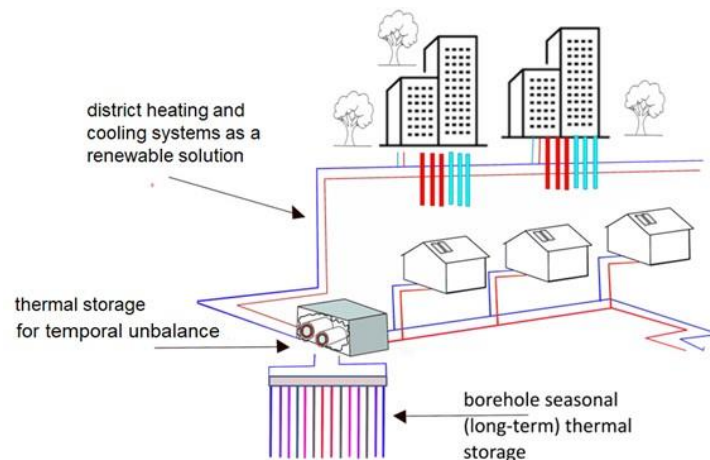


Fig. 6. Conexión del TES a la red de calefacción y refrigeración (DHC)[7] .

1.5. Integración de bombas de calor, configuraciones y refrigerantes

La información necesaria para el dimensionamiento, el diseño o la selección de la bomba de calor, incluidas la configuración y los refrigerantes, se basará en sus aplicaciones de disipación o absorción de calor. Es necesario responder a las siguientes preguntas.

1. ¿Qué tipo de bomba de calor se utilizará? Para fines exclusivamente térmicos (calefacción/refrigeración), un sistema híbrido con un sistema de absorción, un sistema híbrido con generación de electricidad o un TES, según disponibilidad...
2. ¿Cómo se utilizará la bomba de calor? Calefacción, refrigeración, ambas simultáneamente, ambas de forma alternativa...
3. ¿Se utiliza la red térmica para apoyar o para recibir la calefacción/refrigeración?
 - a) Red de calefacción urbana (DHN) de baja temperatura para la conexión del evaporador y producción de calefacción a alta temperatura en el condensador
 - b) Conexión a la red de refrigeración central (DCN) en el evaporador, con beneficio económico en el evaporador (refrigeración) y en el condensador (calefacción a alta temperatura)
4. ¿Cuál es el proceso previsto, la temperatura (fija o variable) y el medio de transferencia de calor? Red de calefacción urbana (DHN), red de refrigeración urbana (DCN), enfriadora, refrigeración comercial (baja o media temperatura), aire acondicionado, calefacción de confort, calentamiento de agua, calefacción industrial, etc.



1.5.1. Posibilidades de integración

Una combinación de consumos de calefacción y refrigeración urbanos e industriales mediante una bomba de calor con la posibilidad de producción simultánea (tabla 1 y fig. 7).

	Aplicación	Rango de temperaturas	Tecnología tradicional
Fuente de calor	Aire ambiente	0-30 °C (15 °C)	Varias tecnologías
	Centro de refrigeración de datos	20-50 °C (35 °C)	Tecnologías de refrigeración basadas en R-410A
	Calefacción urbana a baja temperatura	40-70 °C (55 °C)	Tecnologías mixtas (generación de calor a partir de residuos, caldera de gas, carbón, etc.)
Dissipador de calor	Calefacción de espacios a baja temperatura	45-50 °C	Caldera solar, eléctrica o de gas
	Agua caliente sanitaria	45-65 °C	Caldera eléctrica o de gas
	Procesos industriales/Radiadores de calefacción	75-90 °C	Sistema centralizado de combustión de gas

Tabla 1. Aplicación de la bomba de calor para calefacción y refrigeración simultáneas[8] .

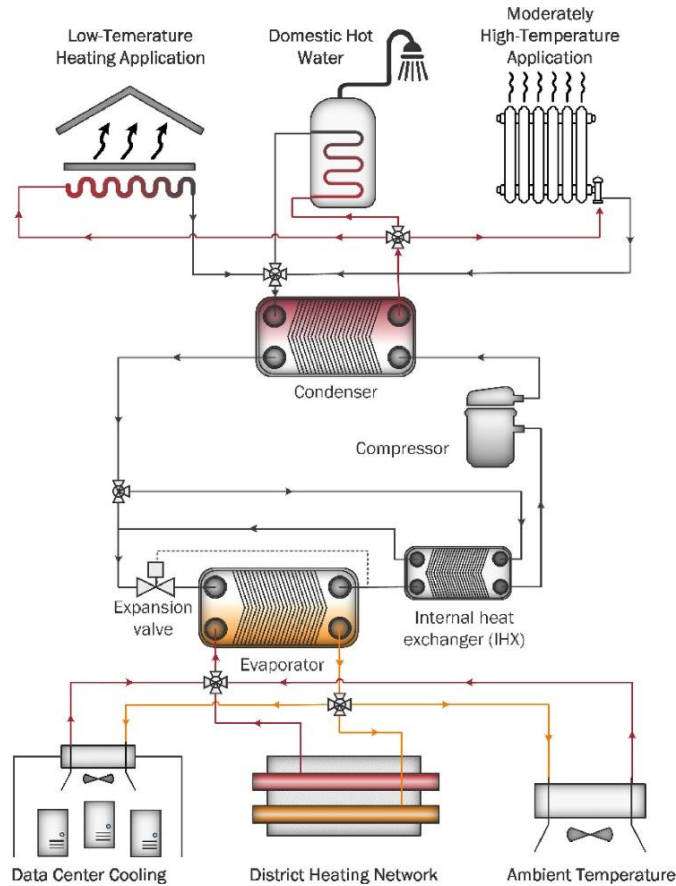


Fig. 7. Aplicación de la bomba de calor para calefacción y refrigeración simultáneas[8] .

1.5.2. Influencia de las temperaturas de funcionamiento

En función de la temperatura del sumidero de calor y de la fuente de calor, el COP variará significativamente (Fig. 8). El COP representa los kW de calefacción o refrigeración por cada kW de electricidad consumida. Un COP más alto supone un menor consumo energético, menores costes operativos y menores emisiones de CO_2 (un mayor potencial de descarbonización).

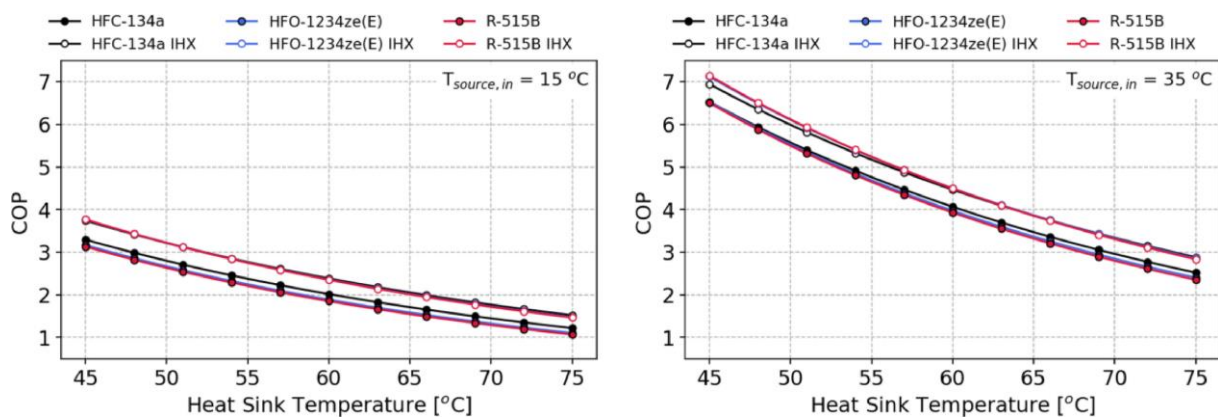


Fig. 8. Evolución del COP en función del sumidero de calor y la fuente de calor[8] .

Combinación con redes de calefacción urbana (DHN), redes de refrigeración urbana (DCN) y procesos industriales



En función de la temperatura y de la conexión entre la red de calefacción urbana (DHN) y la red de refrigeración urbana (DCN), pueden barajarse diferentes posibilidades para la bomba de calor (bomba de calor centralizada/local).

Combinación con la red de calefacción urbana (DHN), la red de refrigeración urbana (DCN) y los procesos industriales: perspectiva energética

Una mayor diferencia entre el sumidero de calor y la fuente de calor requerirá más de una etapa en el ciclo de compresión de vapor de la bomba de calor. Además, el intercambiador de calor interno puede mejorar el rendimiento energético, dependiendo del refrigerante y de la aplicación.

Combinación con la red de calefacción urbana (DHN), la red de refrigeración urbana (DCN) y los procesos industriales: perspectiva económica

Los costes operativos y de inversión dependen en gran medida de las aplicaciones consideradas, mientras que una caldera de combustibles fósiles se ve afectada principalmente por las necesidades de calefacción. Cada situación debe estudiarse en detalle para determinar qué combinación puede reducir los costes y hacer que la inversión resulte más atractiva.

Combinación con redes de calefacción urbana (DHN), redes de refrigeración urbana (DCN) y procesos industriales: perspectiva medioambiental

El COP obtenido influye claramente en la sostenibilidad de la solución, que resulta respetuosa con el medio ambiente si se eligen refrigerantes adecuados. Otro factor crítico es la red eléctrica y el factor de emisión de carbono (el origen de la electricidad generada).

COP combinado

El COP combinado o agregado tiene en cuenta que la potencia de transferencia de calor de la bomba de calor corresponde tanto a la refrigeración como a la calefacción (cuantificadas por el EER y el COP, respectivamente). Al mismo tiempo, la electricidad constituye la entrada, ya que se disipa del ambiente.

Comparación con las calderas de combustibles fósiles

La ventaja económica en comparación con las calderas de combustibles fósiles es significativa, pero depende de las temperaturas de funcionamiento

1.6. Calor residual y renovable

Introducción

El calor residual y el calor renovable pueden integrarse para complementar la capacidad de refrigeración o calefacción de la bomba de calor, o para ayudar durante las horas de mayor demanda.

Ciertos elementos de la bomba de calor también pueden combinarse con fuentes de calor residual y renovable para aumentar el COP global. Esto se aplicará a distintos niveles en función de la disponibilidad, la variabilidad y la temperatura de la fuente de calor renovable o residual.

1. Los paneles solares térmicos pueden conectarse a los evaporadores para aumentar la temperatura y el COP. Sin embargo, la temperatura y el rendimiento de los paneles térmicos serán muy variables.
2. El calor residual a baja temperatura también puede conectarse al evaporador. Este puede ser más constante. El calor residual puede presentarse a muchas temperaturas diferentes. Las aguas grises pueden ser otra valiosa fuente de calor en las ciudades inteligentes.



3. Los centros de datos requieren una refrigeración significativa a temperaturas constantes. No obstante, pueden utilizarse para fijar la temperatura de evaporación y producir refrigeración simultáneamente, con importantes beneficios energéticos y económicos.
4. La calefacción a temperaturas más elevadas puede conectarse a elementos que se combinan con eyectores, lo que aumenta el COP final. Sin embargo, los eyectores solo están disponibles para la refrigeración de supermercados_{con CO₂}, que se encuentra en una fase intermedia de desarrollo.
5. Las bombas de calor geotérmicas deben estudiarse en detalle para determinar las condiciones del suelo, que pueden hacer que la inversión no resulte rentable desde el punto de vista técnico.

Ejemplo 1. Una novedosa bomba de calor compuesta, impulsada por calor residual y energía solar, con eyector y asistencia solar, destinada a la calefacción y la refrigeración simultáneas. El sistema utiliza el calor residual de tres fuentes diferentes: PV/T (fotovoltaico-térmico) con colector de placa plana, el proceso de pasteurización de la leche y el calor de intercambio del condensador.

Ejemplo 2. Un novedoso sistema compuesto de bomba de calor con eyector impulsado por calor residual fotovoltaico-térmico (PV/T) para la refrigeración simultánea de centros de datos y la recuperación de calor residual para redes de calefacción urbana. El sistema utiliza el calor residual fotovoltaico-térmico (PV/T) con un condensador evaporativo como fuerza motriz para un eyector, al tiempo que aprovecha la energía eléctrica generada para hacer funcionar el compresor y las bombas de la bomba de calor.

Ejemplo 3. Sistema combinado de compresión de vapor con ciclo Rankine orgánico y eyector compuesto-multieaporador para dos niveles de refrigeración y calefacción, con generación de energía y aprovechamiento del calor residual geotérmico y del condensador. El sistema se ha diseñado para dos modos de funcionamiento: generación de energía y refrigeración con aprovechamiento del calor residual del condensador, y generación de energía y calefacción.

Ejemplo 4. Un sistema ORC combinado con un eyectora-VCC compuesto impulsado por calor residual de invernaderos para la generación de energía, refrigeración y calefacción de alta eficiencia energética. El sistema funciona con una amplia variedad de fuentes geotérmicas. Este sistema utiliza el calor residual de dos fuentes para la refrigeración, calefacción y generación de energía simultáneas y polivalentes (tres modos: generación de energía con refrigeración, generación de energía con calefacción por bomba de calor o generación de energía con calefacción geotérmica). También cuenta con una fuente geotérmica asociada que da soporte al sistema ORC.

1.7. Calor residual y renovable

1. La calefacción y la refrigeración simultáneas son posibles con bombas de calor/enfriadoras
2. Esto permite maximizar la producción energética de la bomba de calor. De lo contrario, se desperdiciaría.
3. Las redes de calefacción y refrigeración (DHN y DCN) son ideales para maximizar los beneficios y reducir la necesidad de costosas estrategias de desplazamiento de picos o de un mayor almacenamiento de energía térmica.
4. Las bombas de calor pueden utilizar varias tecnologías de compresores, dependiendo principalmente de la capacidad térmica de la unidad y de la relación de presión establecida por la aplicación.
5. La calefacción y la refrigeración simultáneas contribuyen a mejorar las condiciones de funcionamiento de la bomba de calor.
6. La eficiencia energética es fundamental para que las bombas de calor sean competitivas frente a las calderas.



7. Las bombas de calor son especialmente eficientes cuando sus componentes utilizan calor renovable o residual. Se puede considerar una amplia variedad de fuentes de calor.

2. Tecnologías de producción de frío

2.1. Enfriadoras

Introducción

Un enfriador extrae el calor de un proceso, una máquina o un edificio para mantener una temperatura controlada. Esto se consigue haciendo circular un fluido refrigerado (a menudo agua o una mezcla de agua y glicol) que absorbe el calor de la zona objetivo y lo transfiere al entorno.

Se utilizan habitualmente en sistemas industriales, comerciales y de climatización (calefacción, ventilación y aire acondicionado) para refrigerar equipos, procesos o edificios. Por lo tanto, su capacidad de refrigeración oscila entre cientos y miles de kW.

Los Enfriadoras se utilizan ampliamente en sectores como la industria manufacturera, las instalaciones médicas, los centros de datos y el procesamiento de alimentos para mantener temperaturas óptimas.

Funcionamiento

Como se observa en la fig. 9, la función del evaporador es producir agua refrigerada. El dispositivo libera el agua a unos 6 °C y la impulsa por toda la instalación con la ayuda de una bomba. El agua regresa al evaporador, donde el refrigerante, a unos 12 °C, absorbe el calor no deseado.

Existe otro circuito conectado al condensador, que se encuentra entre la torre de refrigeración y el propio condensador. Tras entrar en el condensador a unos 27 °C o a temperatura ambiente, el agua sale a una temperatura aproximadamente 5 grados superior. Cabe señalar que en ningún momento el refrigerante puede disipar calor directamente a través de un fan-coil exterior [9].

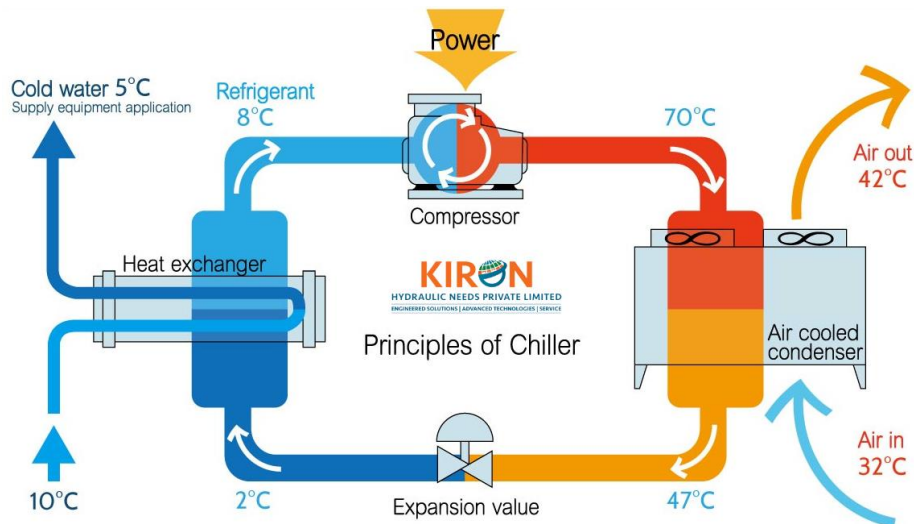


Fig. 9. Esquema de funcionamiento de un enfriador[10] .

2.1.1. Tipos de enfriadoras

Los Enfriadoras se clasifican en función de cómo disipan el calor:

1. Enfriadoras refrigeradas por aire:



- a) Utilizan ventiladores para hacer circular aire sobre la batería del condensador y liberar calor.
- b) Son ideales para sistemas de tamaño pequeño a mediano o en lugares donde el acceso al agua es limitado.
- c) Son habituales en los sistemas comerciales de climatización.

2. Enfriadoras refrigeradas por agua (centrífugas):

- a) Utilizan agua y torres de refrigeración para disipar el calor de forma más eficiente.
- b) Adecuados para aplicaciones industriales a gran escala en las que se requiere una mayor eficiencia.

Torre de refrigeración: es aquí donde acaba el calor disipado por el condensador en forma de agua. A continuación, el calor se disipa al aire ambiente. Utilizan una corriente de aire húmedo (corriente de aire ambiente + pulverización de agua). Estos dispositivos de techo abierto presentan diversos diseños en función de múltiples factores: flujo cruzado, contracorriente, tiro natural y tiro mecánico.

Enfriador refrigerado por agua: Cuentan con una torre de refrigeración, por lo que su eficiencia es mayor que la de los Enfriadoras refrigerados por aire, ya que la condensación se produce en función de la temperatura del bulbo húmedo ambiente, que es inferior a la temperatura del bulbo seco ambiente (fig. 10). Cuanto más baja sea la temperatura de condensación de un enfriador, mayor será su eficiencia. Este sistema cuenta con varios componentes esenciales:

1. Torres de refrigeración
2. Bombas de agua
3. Depósitos de almacenamiento de energía térmica

Tienen un tamaño más reducido, una vida útil más larga y pueden instalarse en interiores.

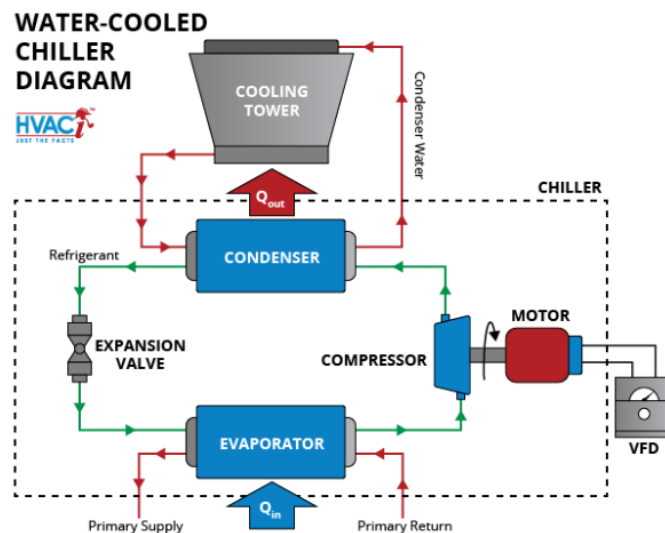


Fig. 10. Esquema de funcionamiento de un enfriador refrigerado por agua[11] .

Enfriador refrigerado por aire (Fig. 11)

Ventajas frente a los Enfriadoras de agua:

1. No consumen agua.
2. Cuando se utilizan en aplicaciones de carga parcial, estas enfriadoras son muy fiables.
3. Sin torres de refrigeración.



4. Mayor estabilidad ambiental.
5. Bajos costes de mantenimiento.
6. Más fáciles de manejar y controlar.
7. Se evitan los costes de productos químicos.
8. Se evitan los costes de agua, especialmente en las ciudades.
9. No hay que hacer frente a problemas de agua en caso de catástrofe.

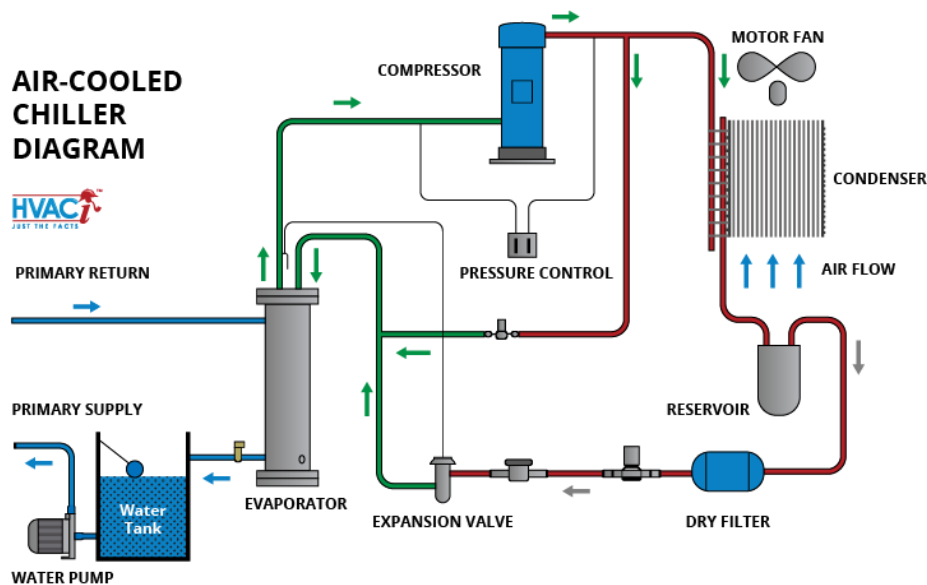


Fig. 11. Esquema de funcionamiento de un enfriador refrigerado por aire[11] .

2.1.2. Parámetros clave y eficiencia

1. Capacidad de refrigeración (Q_o): Se mide en toneladas de refrigeración o kilovatios (kW) e indica la cantidad de calor eliminado.
2. Consumo de energía (W_c): Los compresores son los que más electricidad consumen (kW) en el sistema, por lo que su diseño es fundamental para la eficiencia. Hay que tener en cuenta las bombas de agua y los ventiladores, ya que pueden representar el 10 % del consumo.
3. Índice de eficiencia energética (EER): Una medida de la eficiencia que se calcula como la relación entre la refrigeración proporcionada y la energía consumida (kW de refrigeración / kW de electricidad) (Ec. (1)).

$$EER = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c} \quad (1)$$

4. Índice de eficiencia energética estacional (SEER): similar al EER, pero referido a toda una temporada, calculando la potencia de refrigeración dividida por la energía eléctrica total consumida (kWh de refrigeración / kWh de electricidad).

2.1.3. Índice de eficiencia energética estacional (SEER)

1. El SEER utiliza una temperatura interior fija, junto con diferentes temperaturas exteriores y capacidades de carga, para simular condiciones reales.
2. La norma EN 14825 [12] define la metodología de ensayo (Tabla 2).



		Capacidad			
		100 %	74 %	47 %	21 %
Temperatura exterior	Fuente de aire	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C
	Fuente de agua	30 °C	26 °C	22 °C	18 °C

Tabla 2. Ejemplo de ajuste de temperatura y capacidades de carga para el SEER

3. La clase de eficiencia energética depende del SEER y del tipo de equipo. Va de A+++ a G, siendo la primera la clasificación más eficiente.

Rendimiento del sistema

Depende de:

1. Un buen diseño y una instalación profesional de todo el sistema.
2. Un mantenimiento regular.
3. El tamaño del edificio que se climatiza y su eficiencia energética.
4. El tamaño del sistema y su capacidad de tratamiento de aire.
5. El tiempo de uso diario del sistema.
6. La temperatura interior.
7. La temperatura del aire exterior.

Índice de eficiencia energética (EER)

Enfriadoras refrigeradas por aire:

1. EER típico: entre 9 y 12.
2. Estos sistemas suelen ser menos eficientes que los Enfriadoras refrigerados por agua, pero son más adecuados para aplicaciones de tamaño pequeño a mediano.

Enfriadoras refrigeradas por agua:

1. EER típico: entre 12 y 15, alcanzando valores superiores a 15 en los modelos de alta eficiencia.
2. Los Enfriadoras refrigerados por agua son más eficientes, especialmente en aplicaciones a gran escala o industriales, debido a la mayor capacidad de disipación de calor del agua en comparación con el aire.

Enfriadoras industriales de gran tamaño:

1. Los Enfriadoras industriales de alto rendimiento refrigerados por agua pueden alcanzar un EER superior a 15, dependiendo de su tamaño y aplicación.

Aplicaciones de los Enfriadoras

1. Sistemas de climatización



2. Procesos industriales (procesamiento de alimentos, procesamiento de plásticos, acabado de metales...)
3. Centros de datos
4. Refrigeración
5. Sector sanitario
6. Centrales eléctricas
7. Pistas de hielo
8. Refrigeración urbana

2.2. Máquinas de refrigeración por absorción

2.2.1. Tipos de Enfriadoras

Enfriadoras con compresor de vapor

Un compresor es la fuerza motriz que bombea el refrigerante por el sistema. Se necesita electricidad para activar el motor conectado mecánicamente al compresor.

2.2.2. Enfriadoras por absorción de vapor

Los Enfriadoras por absorción de vapor no tienen compresor en la unidad. En su lugar, utilizan una fuente de calor, por ejemplo, energía solar o calor residual, para impulsar el refrigerante a través del sistema. No se necesita electricidad. Además, son más silenciosos y resistentes a las fugas, ya que no contienen elementos vibratorios. Los gases utilizados son exclusivamente refrigerantes naturales.

En esta sección se explicará el funcionamiento de los Enfriadoras por absorción de vapor.

2.2.3. Refrigeración por absorción

Utilizan una fuente de calor para impulsar el ciclo de refrigeración (en lugar de energía mecánica, como los compresores). Estos sistemas suelen emplear un refrigerante y un fluido absorbente ([fig. 12](#)).

1. El proceso comienza con el refrigerante líquido en un evaporador, donde se convierte en gaseoso.
2. A continuación, el refrigerante gaseoso es absorbido por un absorbente concentrado, como el bromuro de litio o el amoníaco, suministrado por un generador.
3. Por último, la solución diluida absorbe el refrigerante, mientras que el agua de refrigeración absorbe el calor.
4. La solución diluida de refrigerante y absorbente fluye a través de un intercambiador de calor hasta el generador, donde se calienta.
5. El refrigerante se vaporiza de la solución, se condensa y se envía de nuevo para su refrigeración. El absorbente, ahora concentrado, también se recicla.

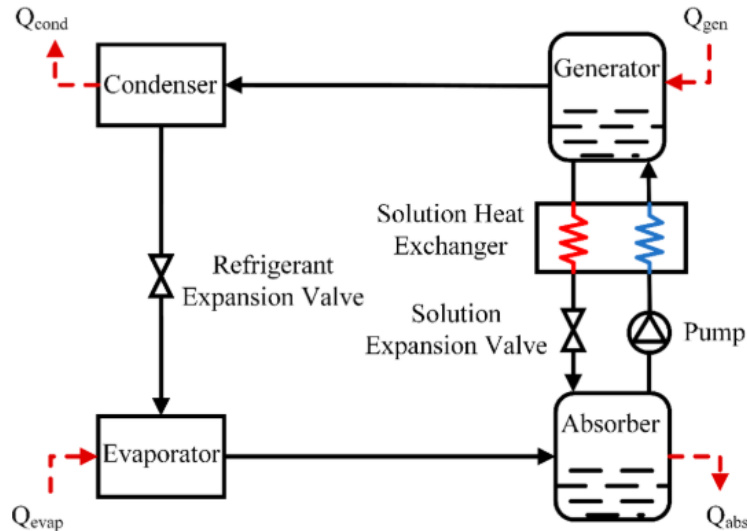


Fig. 12. Máquina de absorción[13] .

Componentes principales:

1. Evaporador: donde el refrigerante absorbe calor y se evapora.
2. Absorbente: donde el vapor del refrigerante es absorbido por el fluido absorbente.
3. Generador: donde el refrigerante se separa del absorbente mediante calor, regenerando así el refrigerante.
4. Condensador: donde el refrigerante libera calor y se condensa de nuevo en estado líquido.

Etapas de la refrigeración por absorción:

Evaporación: El evaporador del sistema es donde el refrigerante (normalmente amoníaco o agua) absorbe calor del espacio u objeto que se desea enfriar. El calor hace que el refrigerante se evapore, transformándolo de un líquido a baja presión en vapor.

Absorción: El vapor del refrigerante fluye hacia el absorbedor, donde es absorbido por una solución líquida absorbente (normalmente agua en los sistemas de amoníaco-agua o bromuro de litio en los sistemas de agua-bromuro de litio). Este proceso tiene lugar a una presión más baja.

Regeneración: Un generador utiliza una fuente de calor (por ejemplo, un quemador de gas, agua caliente, calor residual o calor renovable) para separar el refrigerante del absorbente. El calor aplicado al absorbedor hace que el refrigerante se vaporice y se separe del absorbente. Este paso regenera el refrigerante, que ahora vuelve al condensador.

Condensación: El vapor de refrigerante se desplaza entonces al condensador, liberando calor (procedente del generador) al entorno. Se condensa de nuevo en un refrigerante líquido a alta presión, que a continuación se devuelve al evaporador, y el ciclo se repite.

La solución absorbente: Una vez que el refrigerante se ha separado del absorbente en el generador, el absorbente concentrado (tras perder el refrigerante) se devuelve al absorbedor para iniciar el ciclo.

Propiedades de las sustancias utilizadas en los sistemas de refrigeración por absorción

1. El refrigerante debe ser más volátil que el absorbente, lo que significa que su punto de ebullición debe ser mucho más bajo que el del absorbente, de modo que la solución del generador solo tenga que calentarse hasta la temperatura de ebullición del refrigerante.



2. El refrigerante debe presentar una alta solubilidad en la solución del absorbente.
3. El absorbente debe tener una fuerte afinidad por el refrigerante, lo que minimizará la cantidad de refrigerante que circula.
4. La presión de funcionamiento debe ser baja, de modo que no sea necesario que las paredes de las carcasas y los tubos de conexión sean gruesas.
5. No debe producirse cristalización ni solidificación en el sistema, ya que la cristalización bloquearía el libre flujo de las soluciones en la tubería.
6. La mezcla debe ser segura, químicamente estable, no corrosiva, económica y de fácil obtención. El refrigerante debe tener un alto calor de vaporización.

2.2.4. Tipos de sistemas de refrigeración por absorción

Teniendo en cuenta los requisitos anteriores, existen dos mezclas (refrigerante/absorbente):

Para aplicaciones por debajo de 50 °C, amoníaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$): uno de los sistemas más comunes utilizados en aplicaciones a gran escala, como la refrigeración industrial, en las que el amoníaco es el refrigerante y el agua es el absorbente.

Como inconveniente, el agua es volátil y no se puede separar fácilmente del amoníaco. Un rectificador debería mejorar la eficiencia; el ciclo es más complejo que el de la otra mezcla. Dado que el amoníaco no es compatible con materiales como el cobre o el latón, todo el sistema se fabrica normalmente en acero. El amoníaco es inflamable y altamente tóxico.

Para aplicaciones a más de 50 °C (principalmente aire acondicionado): agua-bromuro de litio (LiBr): se utiliza habitualmente para el aire acondicionado y el agua caliente en grandes edificios y aplicaciones comerciales. En este caso, el agua es el refrigerante y el bromuro de litio es el absorbente. El principal problema de esta mezcla es la posibilidad de solidificación a 0 °C. El LiBr también cristaliza a concentraciones moderadas. Otros inconvenientes de la mezcla son la baja presión (vacío) y la alta viscosidad de la solución. El aire ambiente puede filtrarse en la máquina. Presenta ventajas como una alta seguridad, relación de volatilidad, afinidad, estabilidad y calor latente. Se adapta a la carga variando la tasa de reconcentración del absorbente.

Parámetros relevantes

1. Capacidad de refrigeración ($\dot{Q}_o$): La cantidad de calor extraída por el evaporador del espacio o proceso que se está refrigerando, medida normalmente en kW.
2. Aporte de calor ($\dot{Q}_g$): El calor necesario para impulsar el ciclo de absorción, que suele proceder de una fuente de calor como el gas natural, el calor residual o la energía solar. Se mide a menudo en kW.
3. Coeficiente de rendimiento (COP): La relación entre la capacidad de refrigeración (Q_o) y la entrada de calor (Q_g) (ecuación (2)).

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_g} \quad (2)$$

El COP es un indicador clave del rendimiento en materia de eficiencia energética. Un COP más alto indica un sistema más eficiente. En la refrigeración por absorción, los valores típicos del COP oscilan entre 0,5 y 1,5, significativamente más bajos en comparación con los sistemas de compresión de vapor.

Ventajas de la refrigeración por absorción:

1. Ausencia de piezas móviles: al no depender de compresores, la refrigeración por absorción es mecánicamente más sencilla y, a menudo, más fiable.



2. Flexibilidad en las fuentes de energía: puede funcionar con diferentes fuentes de energía, como el gas natural, la energía solar o el calor residual, lo que la hace adecuada para aplicaciones fuera de la red o con energías renovables.
3. Funcionamiento silencioso: al no haber compresores mecánicos, estos sistemas funcionan de forma silenciosa.

Desventajas de la refrigeración por absorción:

1. Eficiencia: los sistemas de refrigeración por absorción suelen ser menos eficientes que los sistemas convencionales basados en compresores, ya que requieren un aporte de calor significativo.
2. Mayor coste inicial: La instalación de esta tecnología puede resultar más cara, especialmente en el caso de unidades de mayor tamaño.
3. Respuesta lenta: Estos sistemas pueden tardar más en adaptarse a los cambios en la demanda de refrigeración que los sistemas basados en compresión.
4. Mantenimiento complejo: Requieren un mantenimiento minucioso, sobre todo en lo que respecta a la solución absorbente, cuya concentración y estado de contaminación deben comprobarse.

En comparación con los sistemas de compresión de vapor (fig. 13):

Compression systems	Absorption systems
Work operated	Heat operated
High COP	Low COP (currently maximum ≈ 1.4)
Performance (COP and capacity) very sensitive to evaporator temperatures	Performance not very sensitive to evaporator temperatures
System COP reduces considerably at part loads	COP does not reduce significantly with load
Liquid at the exit of evaporator may damage compressor	Presence of liquid at evaporator exit is not a serious problem
Performance is sensitive to evaporator superheat	Evaporator superheat is not very important
Many moving parts	Very few moving parts
Regular maintenance required	Very low maintenance required
Higher noise and vibration	Less noise and vibration
Small systems are compact and large systems are bulky	Small systems are bulky and large systems are compact
Economical when electricity is available	Economical where low-cost fuels or waste heat is available

Fig. 13. Comparación entre los sistemas de absorción y los de compresión[14] .

Aplicaciones

1. Climatización comercial
2. Refrigeración industrial
3. Centros de datos
4. Refrigeración
5. Climatización en ubicaciones remotas
6. Sistemas de recuperación de calor residual
7. Sanidad y hospitales
8. Aplicaciones solares térmicas
9. Plantas de cogeneración (CHP)
10. Redes de calefacción y refrigeración urbanas



2.3. Almacenamiento de energía térmica (TES)

El almacenamiento de energía térmica (TES) almacena calor o frío para su uso posterior, separando la generación del consumo. El concepto es similar al de las baterías eléctricas, pero en lugar de almacenar electricidad, se almacena calor o «frío», aumentando la temperatura de un fluido o mediante un cambio de fase (generalmente de sólido a líquido y viceversa). Esto significa que se puede generar calor o frío cuando se dispone de un excedente de electricidad, de energía renovable o de calor residual, y consumirlo posteriormente cuando sea necesario. Esto resulta especialmente interesante en las redes de calefacción y refrigeración de distrito (DCN), donde la refrigeración centralizada o a partir de residuos es independiente de los consumidores particulares o industriales.

Tipos de almacenamiento de energía

1. Mecánico: aire comprimido, bombeo hidráulico, volante de inercia...
2. Electroquímico: batería.
3. Eléctrico: supercondensadores, almacenamiento de energía magnética superconductora (SMES).
4. Químico: hidrógeno.
5. Térmico: sensible, latente, termoquímico.

2.3.1. Principal ventaja del TES

En las redes de distribución de corriente continua (DCN), el TES suele consistir en almacenar energía de refrigeración en un depósito de agua aislado. El depósito se enfría o se congela durante los periodos de menor demanda (noches o fines de semana) y se descongela o se calienta durante los periodos de mayor demanda (días laborables) (fig. 14).

Esto reduce la necesidad de utilizar grandes enfriadoras durante los picos de demanda, ya que se descarga el TES para cubrir parte o la totalidad de la carga. La capacidad adicional de las enfriadoras recarga el TES durante las horas de menor consumo, al tiempo que cubre las cargas de refrigeración fuera de las horas punta.

Las máquinas de refrigeración de menor capacidad reducen los costes de inversión y de explotación, y disminuyen la carga eléctrica sobre la red.

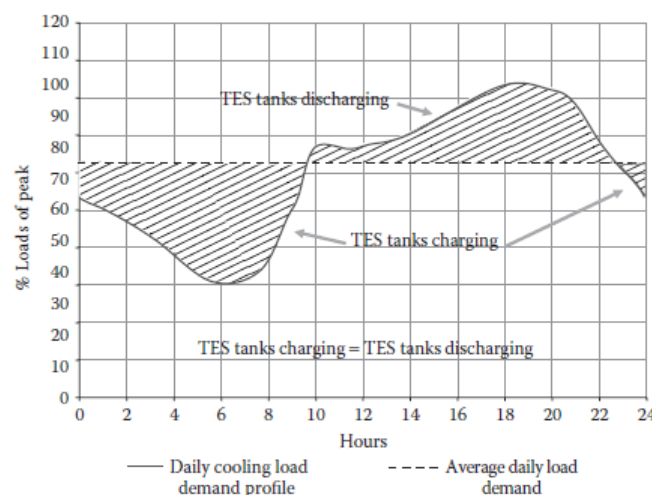


Fig. 14. Periodos de carga y descarga del depósito TES[15] .

2.3.2. Tipos de TES (Tabla 3)

En general, las tecnologías de TES para el almacenamiento de frío incluyen tres tipos distintos:



Los sistemas de almacenamiento de calor latente, como el TES de hielo o los materiales de cambio de fase (PCM), almacenan la energía térmica mediante un cambio de fase del medio de almacenamiento, normalmente entre los estados sólido y líquido. Los cambios moderados de temperatura no son relevantes para el almacenamiento de calor, sino que dependen más bien del cambio de estado del medio.

Los PCM se han desarrollado para almacenar calor en su masa en forma de calor latente a una temperatura específica. Estos materiales se utilizan habitualmente en aplicaciones solares y en materiales de construcción, donde absorben y almacenan el exceso de calor de los edificios.

Los sistemas de almacenamiento de calor sensible, basados en agua refrigerada y fluidos a baja temperatura, almacenan la energía térmica mediante un cambio de temperatura en el medio de almacenamiento. Utilizan agua o roca para almacenar y liberar energía térmica. Este tipo de almacenamiento de energía térmica es el más adecuado para edificios residenciales.

Sistemas de almacenamiento termoquímico de calor, basados en reacciones químicas.

Almacenamiento de energía térmica en pozos y almacenamiento de energía térmica en acuíferos, para el largo plazo.

	Depósito de almacenamiento de hielo	Depósito de almacenamiento de agua refrigerada	Depósito de almacenamiento de líquido a baja temperatura
Tipo de almacenamiento	Calor latente	Calor sensible	Calor latente
Temperatura de salida	De 1 °C a 7 °C	De 4 °C a 6 °C	De -1 °C a 2 °C
Temperatura de recarga	De -8 °C a -2 °C	De 4 °C a 6 °C	De -1 °C a 2 °C
Planta de refrigeración de recarga y potencia (kW de entrada eléctrica/kW de salida térmica)	De 0,8 a 1,1 kW/tonelada (0,23 a 0,31)	De 0,6 a 0,7 kW/tonelada (0,23 a 0,31)	0,7 a 0,8 kW/tonelada (0,23 a 0,31)

Tabla 3. Tipos de depósitos TES[16] .

Aplicaciones

1. Centros educativos: colegios, institutos y universidades.
2. Centros sanitarios: hospitales, clínicas, laboratorios e investigación médica.
3. Aeropuertos, museos y complejos deportivos y de ocio.
4. Instalaciones gubernamentales: institucionales, militares, de investigación, administrativas y penitenciarias, a nivel federal, estatal y local.
5. Sector privado: instalaciones comerciales e industriales (incluidos los sectores aeronáutico y aeroespacial, automovilístico, informático, de procesamiento de datos, electrónico, farmacéutico y de telecomunicaciones).
6. Servicios de refrigeración urbana: sistemas de refrigeración urbana que suministran refrigeración a múltiples clientes.
7. Servicios energéticos/contratos de rendimiento: proyectos financiados por terceros, financiados mediante el ahorro de costes derivado de la eficiencia energética.



8. Refrigeración de la entrada de la turbina: aumento de la potencia y la eficiencia de las centrales eléctricas de turbinas de combustión en climas cálidos.

TES de calor latente

Ventajas:

1. Mayor densidad energética: los sistemas de almacenamiento de calor latente pueden almacenar más energía en un volumen menor, ya que almacenan energía durante los cambios de fase (por ejemplo, de líquido a gas o de sólido a líquido), que se producen a temperatura constante.
2. Temperatura estable: la temperatura se mantiene constante durante el cambio de fase, lo que facilita la gestión de la potencia térmica.
3. Eficaz para sistemas a gran escala: debido a su mayor densidad energética, el almacenamiento de energía térmica por calor latente suele ser más eficiente en sistemas de refrigeración o calefacción centralizados de gran tamaño.

Desventajas:

1. Complejidad: Los sistemas TES de calor latente suelen ser más complejos y costosos de diseñar y operar debido a la necesidad de materiales especializados (como los materiales de cambio de fase o PCM).
2. Limitaciones de los materiales: El rendimiento del almacenamiento de calor latente depende en gran medida de la elección del material de cambio de fase, que puede presentar limitaciones en cuanto al rango de temperaturas, la estabilidad del ciclo y el coste.

Almacenamiento de calor sensible

Ventajas:

1. Diseño más sencillo: El almacenamiento de calor sensible consiste en calentar o enfriar un medio de almacenamiento (por ejemplo, agua o roca), lo cual es más sencillo y económico de implementar en comparación con los sistemas de calor latente.
2. Amplia variedad de materiales: El almacenamiento de calor sensible puede utilizar diversos materiales (como agua, aire o rocas), que son fáciles de conseguir y económicos.
3. Tecnología probada: Los sistemas de calor sensible se utilizan y se conocen ampliamente, y presentan características de rendimiento consolidadas.

Desventajas:

1. Menor densidad energética: Los sistemas de calor sensible almacenan menos energía en el mismo volumen en comparación con los sistemas de calor latente, ya que la energía se almacena mediante el cambio de temperatura del medio, y no mediante un cambio de fase.
2. Fluctuaciones de temperatura: La temperatura del medio de almacenamiento varía a medida que se carga y descarga, lo que puede dificultar su gestión y hacer que sea menos constante que los sistemas de calor latente.

Integración del TES en la DCN (fig. 15)

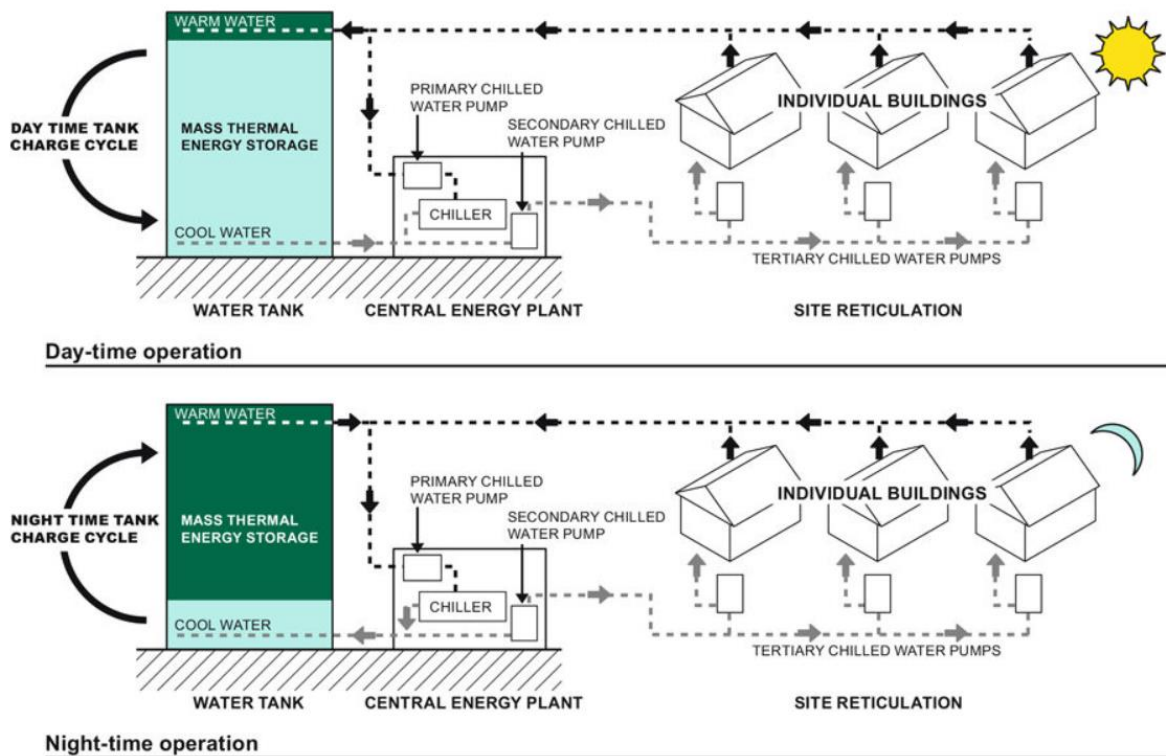


Fig. 15. Integración de un depósito TES en una DCN[17] .

Ventajas generales de la integración del TES en la DCN:

1. El coste total de la instalación es menor debido a la reducción de la capacidad instalada de la planta de refrigeración. El tamaño de los equipos de refrigeración es menor, ya que están diseñados para cargas medias en lugar de picos.
2. Los costes operativos se reducen en comparación con un sistema de refrigeración en línea, ya que se puede evitar el consumo en horas punta durante los periodos de tarifas eléctricas elevadas.
3. El impacto medioambiental se reduce gracias a la disminución de las emisiones de CO₂. El almacenamiento de energía y la mejora de la eficiencia operativa mediante el depósito de almacenamiento de energía térmica contribuyen a reducir aún más las emisiones de CO₂ de un sistema de refrigeración urbana.
4. Se podría reducir el tamaño de la planta del sistema de refrigeración. Esto se debe a que la capacidad de refrigeración de la energía producida por la planta será menor debido a la energía ya acumulada en el depósito. Por lo tanto, se puede utilizar un sistema de refrigeración más pequeño.

2.4. Combinación de sistemas de accionamiento mecánico y sistemas de absorción accionados por energía térmica.

Introducción

Una combinación de sistemas accionados mecánicamente (como la refrigeración por compresión de vapor) y sistemas de absorción accionados por energía térmica (fig. 16). Integra dos tecnologías de refrigeración distintas para mejorar el rendimiento general del sistema, la eficiencia energética y la sostenibilidad. Pueden combinarse a través del condensador, en el que el calor rechazado por el sistema de compresión de vapor se utiliza como calor útil en otro ciclo, como el sistema de



absorción. De lo contrario, este calor se disiparía al ambiente y se perdería. En consecuencia, se maximiza la eficiencia energética del sistema en su conjunto.

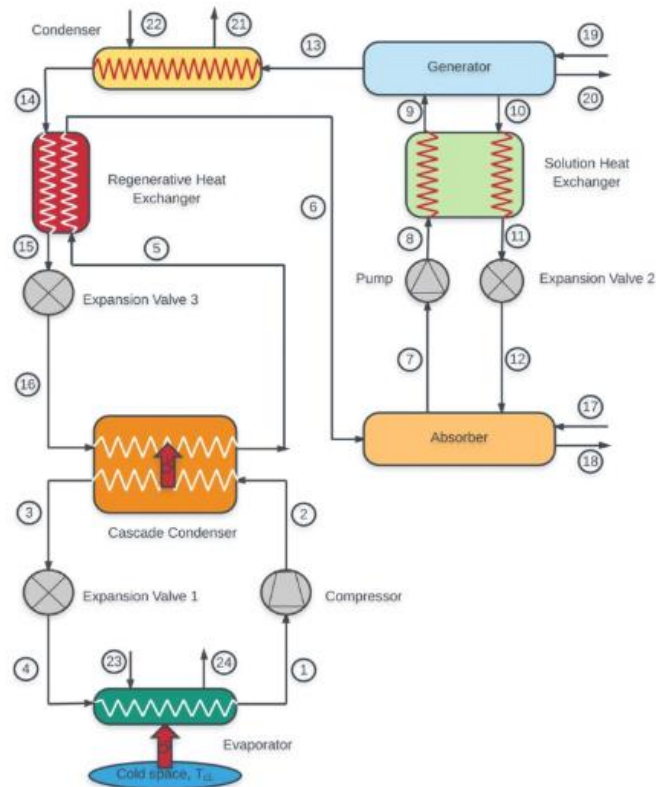


Fig. 16. Esquema de la combinación de sistemas accionados mecánicamente y sistemas de absorción impulsados por energía térmica [18].

Aplicaciones

Los sistemas de compresión de vapor y los sistemas de refrigeración por absorción, cuando se combinan, resultan especialmente adecuados para aplicaciones en áreas donde se requiere tanto refrigeración como calefacción, o donde existe la necesidad de aprovechar el exceso de calor, como en los sistemas de calefacción y refrigeración urbanos, las plantas industriales o los grandes edificios comerciales.

La combinación de estos sistemas permite que la configuración híbrida aproveche las ventajas de cada tecnología.

Por ejemplo, durante los periodos de baja demanda de refrigeración o cuando se dispone de calor residual, el sistema de absorción puede hacerse cargo, reduciendo así el consumo eléctrico.

Por otro lado, durante los periodos de alta demanda o cuando la energía térmica es insuficiente, se puede activar el sistema mecánico para proporcionar capacidad de refrigeración adicional.

Esta integración ayuda a optimizar el uso de la energía, a reducir los costes operativos y a contribuir a la sostenibilidad mediante el uso de fuentes térmicas renovables, como el calor residual o la energía solar. Además, el sistema puede funcionar en diversas condiciones de temperatura, lo que proporciona flexibilidad y adaptabilidad.

Parámetros clave



En este caso, el COP tiene en cuenta las entradas y salidas de todo el sistema (ecuación (3)):

COP_c : coeficiente de rendimiento combinado (sistema completo)

$\dot{Q}_{cas, cond}$: carga del condensador en cascada

$\dot{Q}_g$: entrada de carga térmica

$\dot{W}_c$: consumo de potencia del compresor

$\dot{W}_p$: consumo de energía de la bomba

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_{cas, cond}}{(\dot{Q}_g + \dot{W}_c + \dot{W}_p)} \quad (3)$$

Ventajas

1. Mayor eficiencia energética (COP mejorado).
2. Reducción de la huella de carbono.
3. Adaptabilidad a diversas fuentes de calor.
4. Funcionamiento a baja temperatura.
5. Bajo consumo energético en la parte de absorción.

Inconvenientes

1. Mayor complejidad y coste inicial
2. Mayores costes de mantenimiento
3. Eficiencia variable
4. Mayores dimensiones y requisitos de espacio
5. Limitaciones en la capacidad de refrigeración
6. Necesidad de calor adicional

Aplicaciones de este sistema

1. Refrigeración industrial
2. Sistemas de refrigeración urbana
3. Plantas de cogeneración (CHP)
4. Calefacción y refrigeración combinadas (CHC)
5. Industrias químicas y petroquímicas
6. Centros de datos

Calefacción y refrigeración urbanizadas con recuperación de calor residual

1. Transporte refrigerado
2. Pistas de hielo y recintos deportivos
3. Aplicaciones farmacéuticas y médicas
4. Sistema de refrigeración solar

Sin embargo, su uso no está muy extendido debido a los costes y a su complejidad. Para que se introduzcan en el mercado, se necesitan avances tecnológicos o normativas que fomenten su uso.

2.5. Conclusiones

Las enfriadoras refrigeradas por aire y por agua difieren significativamente en cuanto a sus ventajas e inconvenientes, lo que influye en la selección del sistema en función de la aplicación y el clima. El rendimiento de las bombas de calor y las enfriadoras se cuantifica habitualmente mediante su COP (coeficiente de rendimiento) y su EER (índice de eficiencia energética), que reflejan el funcionamiento nominal, mientras que el COP y el EER estacionales ofrecen una



evaluación más realista al tener en cuenta el rendimiento a lo largo de todo el año. Las enfriadoras de absorción, que funcionan utilizando calor en lugar de electricidad, pueden alimentarse con gas natural, pero su sostenibilidad mejora considerablemente cuando se alimentan con fuentes renovables, calor residual o redes de calefacción urbana. Estos sistemas se basan en dos fluidos de trabajo, cuya idoneidad debe evaluarse en función de la aplicación específica. Si bien el almacenamiento de energía térmica se consigue tradicionalmente mediante el calor sensible en depósitos de agua caliente, los materiales de cambio de fase y el almacenamiento termoquímico ofrecen alternativas prometedoras para el almacenamiento a medio y largo plazo. Por último, la combinación de las tecnologías de compresión de vapor y de absorción puede optimizar la producción de frío, especialmente en aplicaciones que requieren calefacción y refrigeración simultáneas, lo que permite una generación diversificada de energía térmica y una mejor gestión de las cargas máximas.

3. Refrigerantes

3.1. Introducción

Definición:

Según el Instituto Internacional de Refrigeración (IIR): un refrigerante es una sustancia o mezcla, normalmente fluida, utilizada en un ciclo de refrigeración para

1. absorber calor a baja temperatura y presión y
2. liberarlo a una temperatura y presión más elevadas.

Esta transferencia de calor se produce cuando el refrigerante cambia de fase, normalmente de líquido a gaseoso y viceversa, lo que permite enfriar o calentar en aplicaciones como la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor.

Refrigerante primario frente a refrigerante secundario ([fig. 17](#))

Refrigerante primario (tubos azules), también conocido como fluido de trabajo.

1. Rechaza el calor a una presión y temperatura más altas
2. Lo absorbe a una presión y temperatura más bajas

Refrigerante secundario (tubo rojo), también conocido como:

1. Fluido secundario.
2. Refrigerante secundario.
3. Fluido de transferencia de calor.

«Cualquier fluido utilizado para transferir el calor de los productos que se desean enfriar al refrigerante primario»

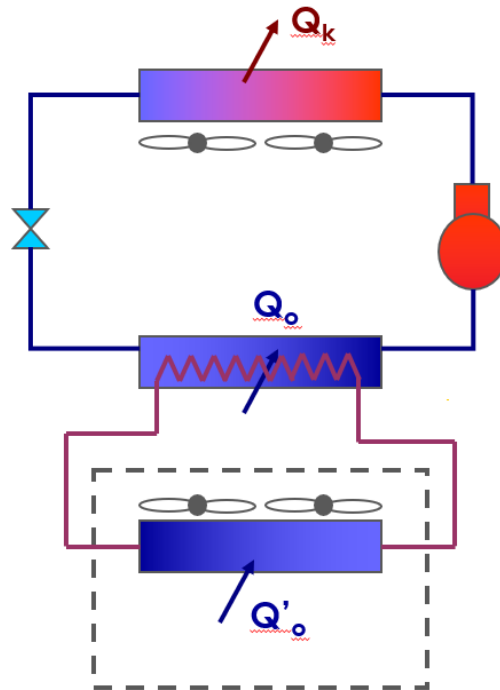


Fig. 17. Esquema del ciclo del refrigerante primario y del refrigerante secundario[3] .

Importancia de los refrigerantes

El valor del mercado mundial de productos refrigerantes alcanzó los 20 050 millones de dólares estadounidenses en 2022 y se prevé que crezca de forma significativa, hasta alcanzar aproximadamente los 36 770 millones de dólares estadounidenses en 2030. Se espera que la región de Asia-Pacífico lidere este crecimiento, con una contribución al mercado que pasará de 6.42 mil millones de dólares estadounidenses en 2022 a unos 12.85 mil millones de dólares estadounidenses en 2030 (Statista, 2025). Se trata de un mercado en evolución, en el que los refrigerantes más utilizados incluyen el R134a —principalmente para el aire acondicionado de automóviles, la refrigeración comercial y las máquinas de refrigeración—; el R32, para el aire acondicionado residencial; y el isobutano, para los frigoríficos domésticos. También están ganando terreno alternativas emergentes como el dióxido de carbono para la refrigeración comercial y el propano para aplicaciones residenciales. El uso y el desarrollo de los refrigerantes están estrictamente regulados por acuerdos internacionales como el Protocolo de Montreal y el Protocolo de Kioto, cuyo objetivo es minimizar el impacto medioambiental y eliminar progresivamente las sustancias con un alto potencial de calentamiento global [19].

El Instituto Internacional de Refrigeración estima lo siguiente:

El sector mundial de la refrigeración, el aire acondicionado y las bombas de calor comprende aproximadamente 3 000 millones de sistemas, incluidos unos 1 500 millones de frigoríficos domésticos. Esta industria da empleo a casi 12 millones de personas en todo el mundo y es responsable de alrededor del 17 % del consumo mundial de electricidad. El impacto medioambiental de estos sistemas es significativo: aproximadamente el 20 % de su contribución al calentamiento global proviene de las emisiones directas debidas a fugas de refrigerantes fluorocarbonados —que suelen oscilar entre el 5 % y el 30 %—, mientras que el 80 % restante se atribuye a las emisiones indirectas procedentes de la electricidad generada a partir de combustibles fósiles necesaria para su funcionamiento. Una reducción gradual y coordinada a nivel mundial de los refrigerantes de hidrofluorocarbonos (HFC) podría evitar potencialmente un aumento de la temperatura global de hasta 0,5 °C para 2100, lo que



pone de relieve el papel crucial de la gestión de los refrigerantes y la eficiencia energética en la mitigación del cambio climático [20].

Clasificación básica de los refrigerantes

Fluido puro: es una sustancia única con una composición química y unas propiedades constantes. En refrigeración, los fluidos puros experimentan cambios de fase (de líquido a gaseoso y viceversa) sin separarse en diferentes componentes.

Mezcla: Un refrigerante puede ser un compuesto puro o una mezcla (combinación) de dos o más refrigerantes (fig. 18):

- a) Mezcla zeotrópica (no azeotrópica). Al evaporarse, el componente más volátil se evapora primero, y el menos volátil es el último en hacerlo. En la condensación ocurre lo contrario. Esto da lugar a una evaporación y una temperatura de condensación variables a lo largo de la superficie de transferencia de calor.
- b) Mezcla azeotrópica. Las fases de vapor y líquido en equilibrio tienen composiciones idénticas (o casi idénticas) en determinadas condiciones de composición y presión.

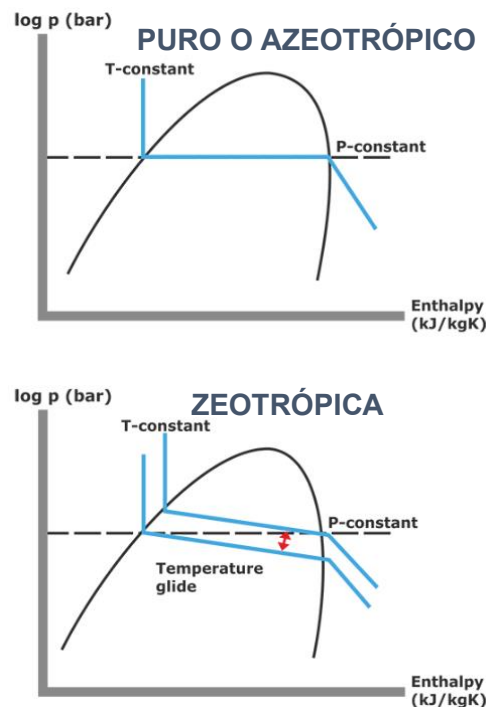


Fig. 18. Diagrama P-h de un fluido puro o azeotrópico y de una mezcla zeotrópica[21] .

Fluido puro: la presión y la temperatura son constantes durante el cambio de fase, por lo que una puede definirse a partir de la otra (fig. 19).

Durante el cambio de fase:

$$P \rightarrow T \text{ y } T \rightarrow P$$

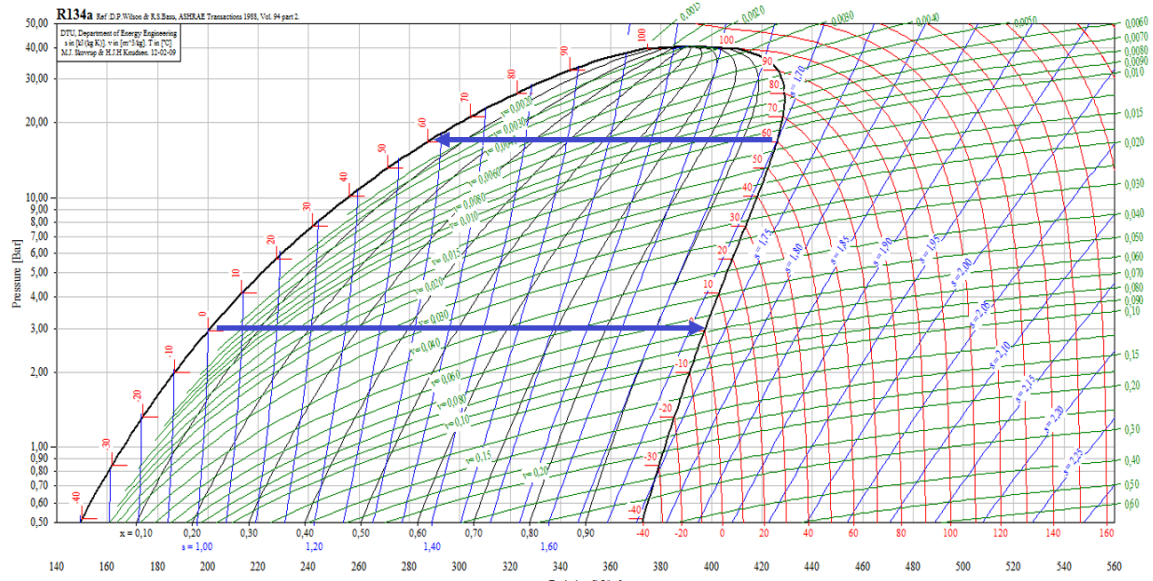


Fig. 19. Propiedades del diagrama P-h de un fluido puro[22] .

Mezcla azeotrópica: La composición y la temperatura del azeótropo no varían de forma apreciable a medida que el azeótropo se evapora o se condensa a presión constante (fig. 20).

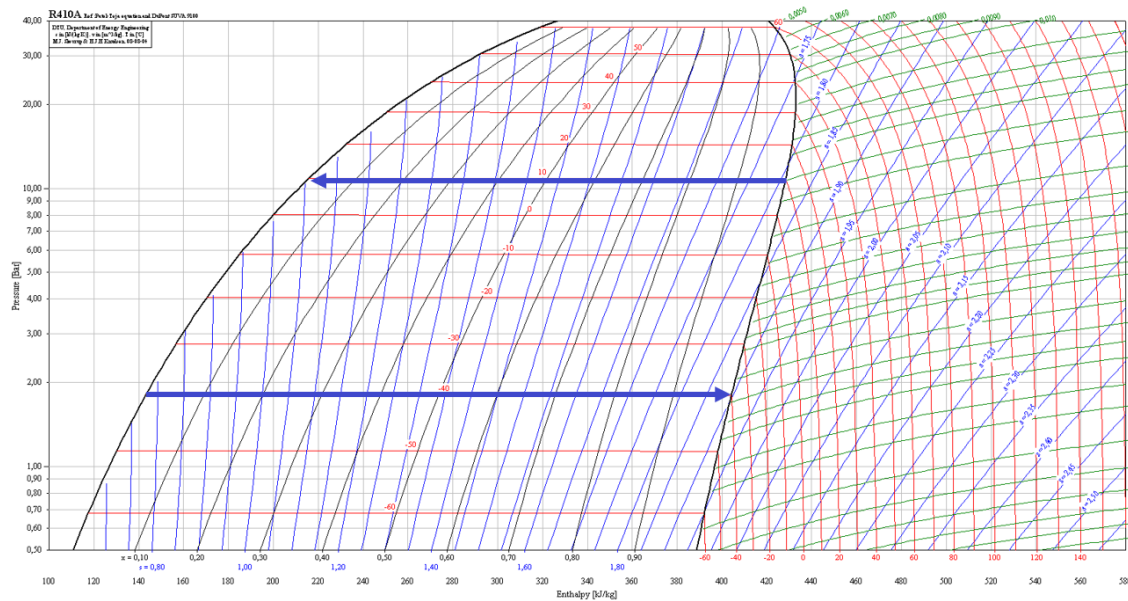


Fig. 20. Propiedades del diagrama P-h de una mezcla azeotrópica[22] .

Mezcla zeotrópica: A presión constante, durante el cambio de fase líquido-vapor, la temperatura y la composición de una mezcla zeotrópica varían. El diagrama P-T requiere la definición de otro parámetro (fig. 21).

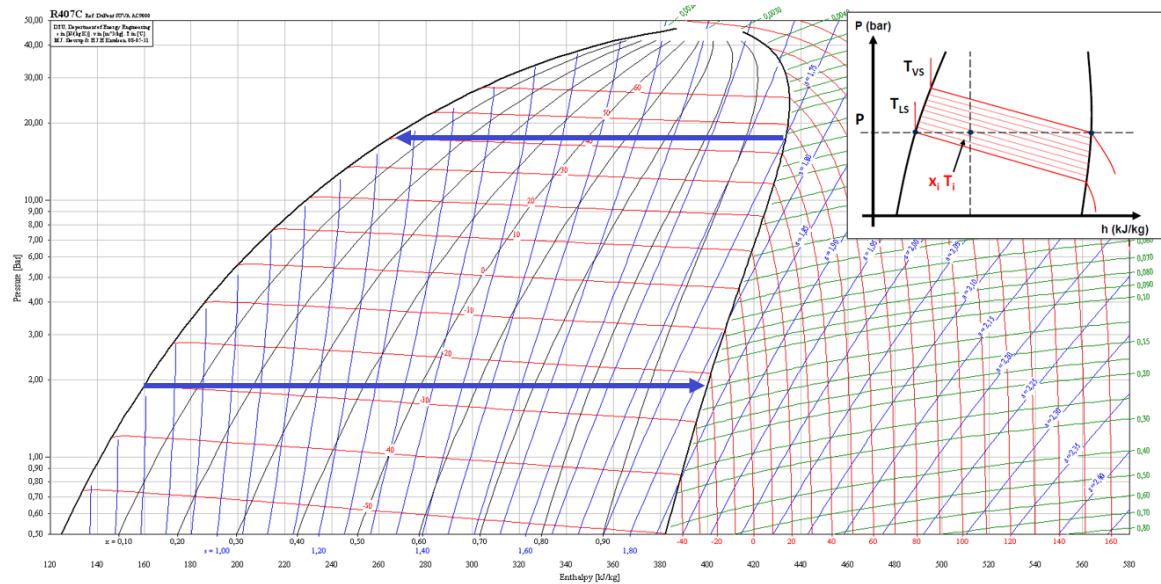


Fig. 21. Propiedades del diagrama P-h de una mezcla zeotrópica[22] .

Las mezclas zeotrópicas requieren medidas especiales para la determinación de propiedades, el cálculo de parámetros, la manipulación, etc. Una mezcla zeotrópica con un deslizamiento de temperatura inferior (por debajo de 0,5 a 1 K, según la fuente) se denomina casi-azeotrópica y puede considerarse una mezcla azeotrópica en la práctica.

3.2. Historia y evolución

La primera generación de refrigerantes surgió en el siglo XIX, mucho antes de la llegada de la química sintética. Durante este periodo, se utilizaban habitualmente sustancias naturales para la refrigeración debido a su disponibilidad y a sus propiedades termodinámicas favorables. Entre ellas se encontraban el amoníaco (NH_3), el dióxido de carbono (CO_2), el dióxido de azufre (SO_2), hidrocarburos como el propano y el butano, así como el agua (H_2O) y el aire. Aunque eficaces en términos de rendimiento, estos refrigerantes planteaban importantes retos técnicos y de seguridad: toxicidad en el caso del SO_2 y el NH_3 , inflamabilidad en el de hidrocarburos como el propano, y la necesidad de altas presiones de funcionamiento con el CO_2 . A pesar de estas limitaciones, esta generación sentó las bases de las tecnologías modernas de refrigeración [19].

Segunda generación (décadas de 1930 a 1990): el auge de los refrigerantes sintéticos

Impulsada por la necesidad de contar con sistemas de refrigeración más seguros y eficientes, la segunda generación vio la introducción de refrigerantes sintéticos, principalmente clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Entre los ejemplos más comunes se encontraban el CFC-12 (diclorodifluorometano) y el HCFC-22 (clorodifluorometano). Estas sustancias ganaron popularidad rápidamente debido a sus propiedades ventajosas: eran inflamables, no tóxicas, químicamente estables y proporcionaban una transferencia de calor eficiente. Sin embargo, en las décadas de 1970 y 1980, la investigación científica reveló que los CFC y los HCFC eran los principales responsables del agotamiento de la capa de ozono estratosférica. Este descubrimiento desencadenó una gran preocupación medioambiental y dio lugar a medidas reguladoras internacionales, entre las que destaca el Protocolo de Montreal, firmado en 1987, cuyo objetivo era eliminar progresivamente las sustancias que agotan la capa de ozono e iniciar la transición hacia alternativas más respetuosas con el medio ambiente [19].

Tercera generación (década de 1990–actualidad): Concienciación medioambiental y HFC



En respuesta a la eliminación gradual de las sustancias que agotan la capa de ozono, la tercera generación de refrigerantes introdujo los hidrofluorocarbonos (HFC) como alternativas. Entre los ejemplos más comunes se encuentran el R-134a (tetrafluoroetano), el R-404A y el R-410A. Estos refrigerantes no contienen cloro, por lo que son inocuos para la capa de ozono. Sin embargo, presentan un elevado potencial de calentamiento global (GWP), lo que contribuye de manera significativa al cambio climático. Por ejemplo, el R-134a tiene un GWP de 1 430, lo que significa que retiene 1 430 veces más calor que el CO₂ en un periodo de 100 años. A medida que crecía la concienciación medioambiental, se intensificaron las medidas reguladoras, sobre todo a través de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal (2016), que estableció una hoja de ruta global para la eliminación gradual de los HFC con el fin de mitigar su impacto climático. Esto supuso un cambio decisivo hacia la sostenibilidad en el sector de la refrigeración [19].

Cuarta generación (presente-futuro): alternativas naturales y con bajo GWP

La cuarta generación de refrigerantes se caracteriza por un firme compromiso con la sostenibilidad medioambiental, centrándose en sustancias con un potencial de agotamiento del ozono (ODP) nulo y un potencial de calentamiento global (GWP) bajo o ultrabajo. Un avance clave en esta fase es la aparición de las hidrofluoroolefinas (HFO), como el R-1234yf y el R-1234ze, que ofrecen un GWP inferior a 1. Aunque las HFO son menos estables químicamente que sus predecesoras, suelen ser seguras cuando se gestionan correctamente. Paralelamente, se ha producido un resurgimiento de los refrigerantes naturales como el amoníaco (NH₃), el dióxido de carbono (CO₂) y los hidrocarburos, que son respetuosos con el medio ambiente pero requieren una manipulación cuidadosa y un diseño avanzado de los sistemas debido a su toxicidad, inflamabilidad o altas presiones de funcionamiento. Además, se han desarrollado refrigerantes mezclados —combinaciones de HFC y HFO— para lograr un equilibrio entre rendimiento, seguridad e impacto medioambiental. Esta generación refleja el giro de la industria de la refrigeración hacia la responsabilidad climática a largo plazo y el cumplimiento de las normativas globales en constante evolución [19].

El futuro de los refrigerantes

El futuro de los refrigerantes está siendo marcado por tres tendencias principales. En primer lugar, las normativas medioambientales están acelerando la eliminación gradual de los refrigerantes con alto potencial de calentamiento global (GWP), impulsadas por marcos normativos como el Reglamento europeo sobre gases fluorados (F-Gas) y la Ley AIM de EE. UU. En segundo lugar, la innovación tecnológica se centra en mejorar la eficiencia de los sistemas, reducir la carga de refrigerante y las fugas, y promover sistemas de refrigeración inteligentes que optimicen el rendimiento y la monitorización. En tercer lugar, los principios de sostenibilidad y economía circular están cobrando protagonismo, haciendo hincapié en la recuperación, el reciclaje y la reutilización de los refrigerantes, junto con las evaluaciones del ciclo de vida y el diseño ecológico de los equipos de refrigeración. Paralelamente, los esfuerzos de investigación están explorando clases de refrigerantes totalmente nuevas, como los líquidos iónicos y los fluidos magnéticos, e investigando ciclos de refrigeración alternativos, entre los que se incluyen la refrigeración por absorción, termoelectrica y magnética. Estos avances tienen como objetivo reducir el impacto medioambiental al tiempo que satisfacen las crecientes demandas globales de refrigeración. En general, la evolución de los refrigerantes refleja un equilibrio dinámico entre el progreso tecnológico y la responsabilidad medioambiental. Desde las primeras sustancias naturales hasta los compuestos sintéticos y ahora de vuelta a soluciones sostenibles y de bajo impacto, el campo sigue evolucionando en respuesta a los retos climáticos. Comprender estas transiciones es fundamental para la próxima generación de ingenieros y científicos que trabajan en el desarrollo de tecnologías de refrigeración resilientes y respetuosas con el clima.

3.3. Denominación y propiedades

Denominación



La nomenclatura de los refrigerantes, en particular la de los refrigerantes halogenados (CFC, HCFC, HFC y HFO), sigue un sistema estandarizado desarrollado por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). Este sistema utiliza el prefijo «R-» seguido de un número que codifica la estructura molecular del refrigerante.

Formato general: R-xyz

Donde:

- x = Número de dobles enlaces (para compuestos insaturados como los HFO)
- y = número de átomos de carbono menos 1
- z = número de átomos de hidrógeno más 1
- w = número de átomos de flúor

El número de átomos de cloro viene determinado por los requisitos de valencia restantes. Este sistema funciona para los hidrocarburos totalmente halogenados y sigue esta lógica para R-xyz:

$R-(m-1)(n+1)p$

Donde:

- m = número de átomos de carbono
- n = número de átomos de hidrógeno
- p = número de átomos de flúor

Se supone que el resto de la valencia se completa con átomos de cloro o bromo (o ninguno).

Ejemplos

R-22 (HCFC-22)

Fórmula química: CHClF_2

Número de átomos de carbono: $1 \rightarrow (1 - 1) = 0$

Número de átomos de hidrógeno: $1 \rightarrow (1 + 1) = 2$

Número de átomos de flúor: 2

→ Por lo tanto: R-022 → simplificado como R-22

R-134a (HFC-134a)

Fórmula química: CH_2FCF_3

Número de átomos de carbono: $2 \rightarrow (2 - 1) = 1$

Número de átomos de hidrógeno: $2 \rightarrow (2 + 1) = 3$

Número de átomos de flúor: 4

→ Por lo tanto: R-134

El sufijo «a» indica que se trata de un isómero (una disposición estructural diferente de los mismos átomos).

R-1234yf (HFO-1234yf)

Compuesto insaturado (presencia de un doble enlace)

El primer dígito «1» indica un doble enlace

El resto sigue la misma regla de carbono-hidrógeno-flúor

«yf» indica un isómero específico

Prefijos especiales



CFC: clorofluorocarbono (sin hidrógeno)
HCFC: hidroclorofluorocarbono (contiene hidrógeno)
HFC: hidrofluorocarbono (sin cloro)
HFO: hidrofluoroolefina (contiene dobles enlaces)
Serie R-600: hidrocarburos (p. ej., R-600a = isobutano)

Mezclas y combinaciones

Mezclas zeotrópicas: etiquetadas como R-4xx (p. ej., R-404A)
Mezclas azeotrópicas: etiquetadas como R-5xx (p. ej., R-507)
Los sufijos A, B y C indican variaciones en la composición

Propiedades: Resumen

Propiedades termodinámicas y de transporte adecuadas

1. Temperaturas del punto crítico y del punto de ebullición adecuadas para la aplicación
2. Elevado calor latente de vaporización
3. Baja viscosidad
4. Alta conductividad térmica
5. No inflamable y no tóxico
6. Químicamente y térmicamente estable, inerte
7. Compatibilidad con materiales, miscibilidad con lubricantes

Otros

1. Solubilidad/miscibilidad satisfactoria en aceite
2. Alta rigidez dieléctrica del vapor
3. Bajo punto de congelación
4. Fácil detección de fugas
5. Bajo coste

Propiedades: termodinámicas y operativas

Punto de ebullición: la temperatura más baja en el cambio de fase (entrada del evaporador) debe estar por encima de este valor para no funcionar por debajo de 1 atm (en caso de fuga, la humedad entra en la instalación)

Punto crítico: Cuanto más alto sea el punto crítico, menor será la pérdida de eficiencia en condiciones ambientales (de condensación) más elevadas

Relación de compresión: Este parámetro (P_{disc}/P_{suc}) define el funcionamiento del compresor y, por lo tanto, las eficiencias. Cuanto menor sea, mejor

Presión de descarga: Una presión de descarga más baja permite utilizar componentes más ligeros y económicos

Temperatura de descarga: Normalmente, la temperatura de descarga de los sistemas de refrigeración debe ser inferior a 105 °C en funcionamiento normal y a 120 °C en picos.

Para que un refrigerante sea sustitutivo, debe tener una relación P-T similar ([fig. 22](#))

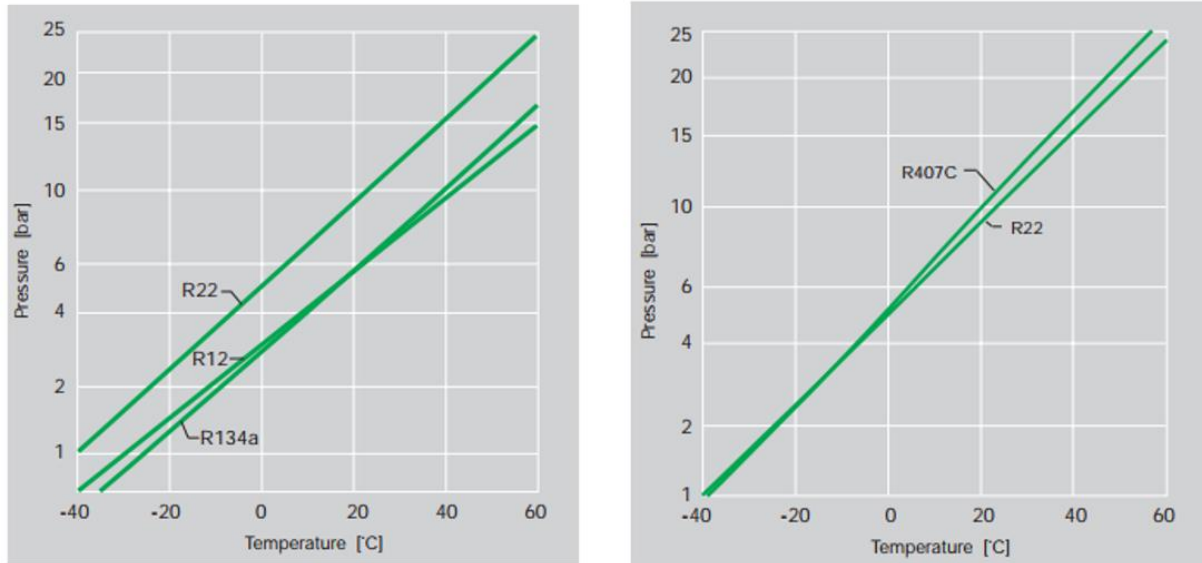


Fig. 22. Comparación de presión y temperatura entre refrigerantes[23] .

Propiedades: Rendimiento

Calor latente de vaporización: permite que un volumen de barrido menor del compresor alcance la misma capacidad de refrigeración.

Índice isentrópico de compresión: lo más bajo posible, de modo que el aumento de temperatura durante la compresión sea mínimo

Calor específico del líquido: bajo, para que el grado de subenfriamiento sea elevado, lo que da lugar a una menor cantidad de gas de flash en la entrada del evaporador

Calor específico del vapor: elevado, para que el grado de sobrecalentamiento sea reducido

Conductividad térmica: tanto en fase líquida como en fase de vapor, debe ser alta para obtener coeficientes de transferencia de calor más elevados

Viscosidad: baja tanto en la fase líquida como en la de vapor, para que las caídas de presión por fricción sean menores

Regla general: el valor óptimo del calor específico molar del vapor se sitúa en el intervalo de 40 a 100 kJ/mol·K.

Propiedades: Técnicas

Estabilidad química: propiedad básica, por lo que todos los refrigerantes comunes deben presentar esta característica.

Coste/disponibilidad: esta característica influye de manera decisiva en la elección de los refrigerantes, ahora más que nunca.

Compatibilidad:

1. Con los metales, tanto para los componentes como para las tuberías (el amoníaco y el dióxido de carbono presentan problemas)
2. Con el aceite lubricante: existen diferencias relevantes entre generaciones y tipos de refrigerantes
3. Con los elastómeros y los plásticos: uno de los requisitos que deben comprobarse antes de tomar una decisión en el caso de un nuevo refrigerante



Propiedades: Seguridad

La nomenclatura viene definida por la norma ASHRAE 34 (internacional), luego por la norma EN 378 (Europa) y, a continuación, depende del país (Tabla 4).

La clasificación influye en la cantidad máxima de carga de refrigerante para cada aplicación de refrigeración.

	Lower Toxicity	Higher Toxicity
Higher Flammability	A3	B3
Lower Flammability	A2	B2
	A2L	B2L
No Flame propagation	A1	B1

Tabla 4. Nomenclatura de seguridad[24] .

A: No se ha identificado toxicidad a concentraciones ≤ 400 ppm por volumen.

3.4. Resumen de indicadores medioambientales (fig. 23)

1. ODP: Mide la destrucción del ozono estratosférico en comparación con el R-11.
2. GWP: Mide el impacto relativo de un refrigerante en la retención de calor en comparación con el CO₂ durante un periodo de tiempo específico.
3. TEWI: Evalúa el efecto combinado de calentamiento de las fugas de refrigerante y el consumo de energía, pero no incluye la fabricación.
4. LCCP: tiene en cuenta el impacto climático total a lo largo de todo el ciclo de vida de un refrigerante, incluyendo la producción, el uso y la eliminación.
5. LCA: Evalúa de forma general los impactos medioambientales en múltiples categorías a lo largo de la vida útil de un producto.

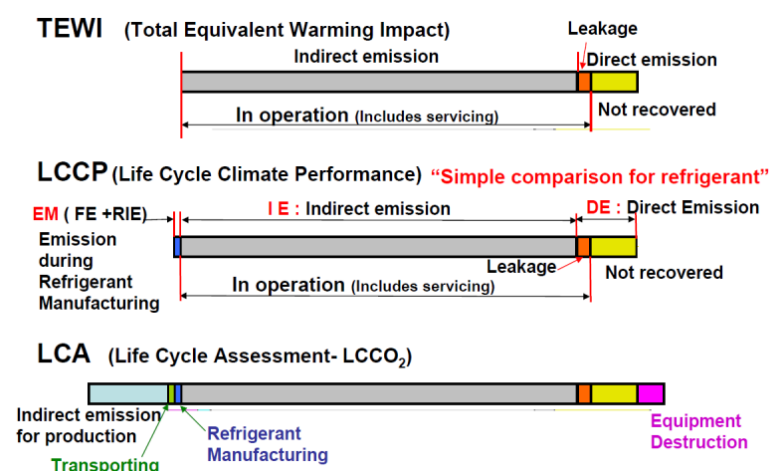


Fig. 23. Representación gráfica de las emisiones equivalentes de CO₂[25] .

GWP

El potencial de calentamiento global (GWP) mide el impacto relativo de un gas de efecto invernadero en términos de su capacidad para retener el calor durante un periodo de tiempo específico,



normalmente 20, 100 o 500 años (véase [la figura 24](#)), en comparación con el dióxido de carbono (CO_2), que tiene un GWP de 1 por definición. El GWP tiene en cuenta la cantidad de energía que absorbe un gas, su vida útil en la atmósfera y su concentración a lo largo del tiempo. El GWP de una sustancia durante un periodo de tiempo t viene dado por la [ecuación \(4\)](#) [19]:

$$\text{GWP}_{\text{gas},t} = \frac{\int_0^t a_{\text{gas}} \cdot C_{\text{gas}}(t) dt}{\int_0^t a_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2}(t) dt} \quad (4)$$

donde:

a_{gas} : Eficiencia radiativa del gas (la cantidad de calor que retiene por unidad de masa).

$C_{\text{gas}}(t)$: Concentración del gas en la atmósfera a lo largo del tiempo. t : Horizonte temporal (normalmente 20, 100 o 500 años).

a_{CO_2} : Eficiencia radiativa del CO_2 .

$C_{\text{CO}_2}(t)$: Concentración de CO_2 a lo largo del tiempo.

El GWP nos indica en qué medida una masa determinada de un refrigerante (u otros gases de efecto invernadero) contribuye al calentamiento global en comparación con la misma masa de CO_2 .

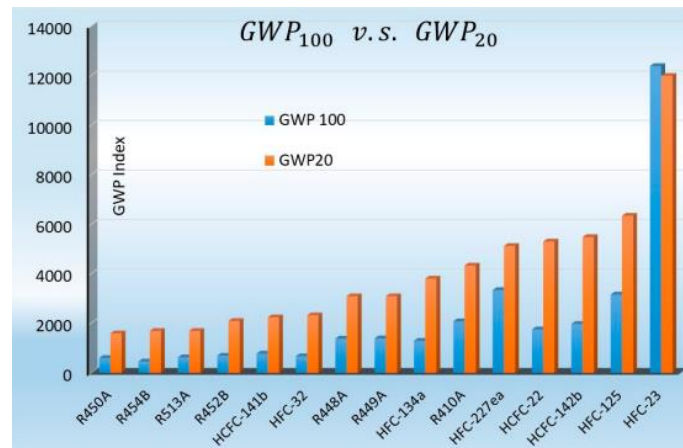


Fig. 24. GWP_{100} comparado con GWP_{20} [26] .

El Impacto Equivalente Total de Calentamiento (TEWI) (ejemplo [en la fig. 25](#)) estima el impacto global total sobre el calentamiento de un sistema de refrigeración o aire acondicionado durante sus fases de uso y eliminación. El TEWI tiene en cuenta tanto las emisiones directas como las indirectas. La fórmula del TEWI viene dada por: $\text{TEWI} = \text{Emisiones directas} + \text{Emisiones indirectas}$.

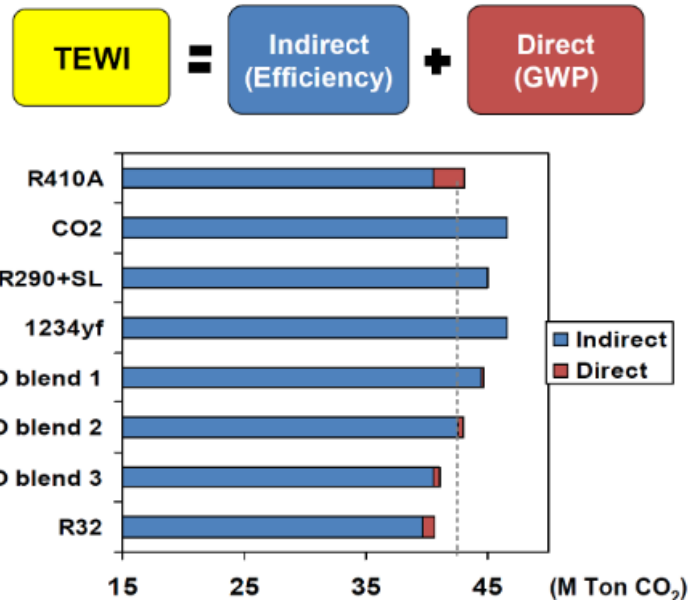


Fig. 25. Comparativa del TEWI entre los refrigerantes que se utilizan habitualmente en las bombas de calor[27] .

TEWI [19]

1) Emisiones directas: fugas accidentales de refrigerante y pérdidas durante las fases de funcionamiento, mantenimiento y eliminación al final de la vida útil. Se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Emisiones directas} = \text{Tasa de fuga} \times \text{Carga} \times \text{GWP} + \text{Emisiones al final de la vida útil} \times \text{Carga} \times \text{GWP}$$

Tasa de fuga: porcentaje anual de fuga del refrigerante.

Carga: Carga total de refrigerante (masa de refrigerante en el sistema).

Emisiones al final de la vida útil: porcentaje de refrigerante perdido o no recuperado en el momento de la eliminación.

2) Emisiones indirectas: Emisiones equivalentes de CO₂ resultantes del consumo energético del sistema a lo largo de su vida útil. Se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Emisiones indirectas} = \text{Consumo energético anual} \times \text{Vida útil} \times \text{Factor de emisión}$$

Consumo energético anual: la energía consumida por el sistema en un año.

Vida útil: Vida útil prevista del sistema.

Factor de emisión: Emisiones de CO₂ por unidad de energía consumida, en función de la combinación de fuentes de generación eléctrica.

LCCP

El rendimiento climático a lo largo del ciclo de vida (LCCP) evalúa el impacto climático total de un refrigerante a lo largo de su ciclo de vida, teniendo en cuenta tanto las emisiones directas como las indirectas. Las emisiones directas se producen cuando se libera el refrigerante (a través de fugas o su eliminación), mientras que las emisiones indirectas provienen de la energía necesaria para hacer funcionar los equipos de refrigeración [19]. La fórmula general para el LCCP es:

$$\text{LCCP} = E_{\text{directo}} + E_{\text{indirecto}} + E_{\text{fabricación}} + E_{\text{final-de la vida útil}}$$



E_{directo} : Emisiones directas procedentes de fugas o liberaciones de refrigerante durante el funcionamiento y el mantenimiento:

$$E_{\text{directas}} = \text{PCA} \times \text{cantidad fugada}$$

$E_{\text{indirecto}}$: Emisiones indirectas derivadas del consumo energético del sistema:

$$E_{\text{indirectas}} = \text{Consumo energético total} \times \text{factor de emisión de la fuente de energía}$$

$E_{\text{fabricación}}$: Emisiones procedentes de la producción y el transporte del refrigerante.

$E_{\text{final-de vida útil}}$: Emisiones derivadas de la eliminación o la recuperación al final de la vida útil del sistema.

ACV

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una evaluación sistemática de los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta la producción, el uso y la eliminación. A diferencia del LCCP, el ACV abarca diversas categorías de impacto más allá del cambio climático, como el agotamiento de los recursos, la acidificación y la eutrofización [19].

El impacto del ciclo de vida de un refrigerante o sistema puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$\text{LCA}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \text{Inventory}_i \times \text{Impact Factor}_i \quad (5)$$

Inventory_i : Cantidad de cada factor medioambiental (por ejemplo, emisiones de CO_2 , consumo de agua, consumo de energía) en cada etapa del ciclo de vida.

Factor de impacto: coeficiente que representa el impacto medioambiental por unidad de cada factor.

Los resultados del ACV suelen presentarse en varias categorías (fig. 26), tales como:

Potencial de calentamiento global (GWP) (kg de CO_2 equivalente).

Potencial de agotamiento del ozono (ODP) (kg de equivalente de CFC-11).

Potencial de acidificación (AP), que mide el potencial de lluvia ácida (kg de equivalente de SO_2).

Potencial de eutrofización (EP), que evalúa el enriquecimiento de nutrientes que provoca la contaminación del agua (kg de equivalente de PO_4^{3-}).

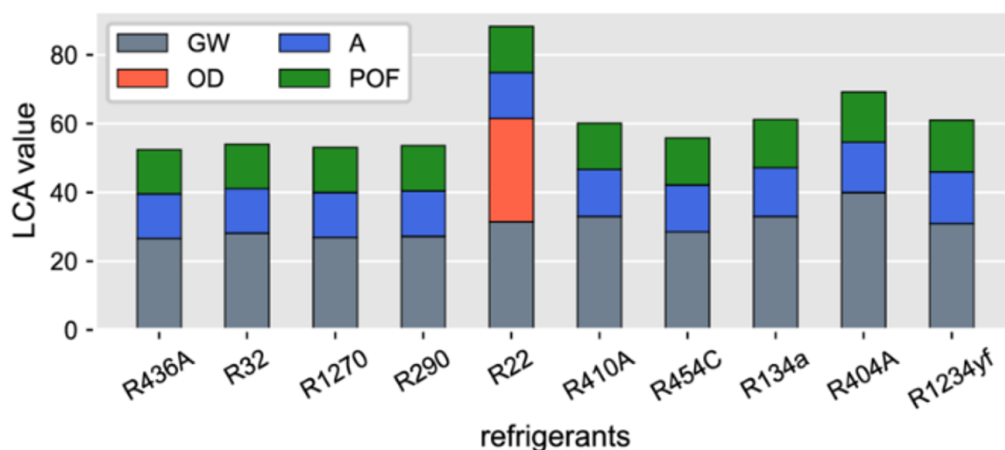




Fig. 26. Valores de ACV para los refrigerantes estudiados: GW: calentamiento global, A: acidificación, OD: agotamiento del ozono, POF: formación fotoquímica de ozono[28] .

Normativa sobre los HFC: a nivel mundial

2016 — Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal: la reducción gradual de los HFC podría reducir el calentamiento global en 0,5 °C para 2100 (fig. 27) [29].

El Protocolo de Montreal obliga a los países, incluidos los miembros de la UE, a reducir el consumo de HFC. La UE aplica este compromiso mediante normativas internas, como el Reglamento 517/2014. Los países desarrollados prestarán ayuda financiera y técnica a los países en desarrollo [30].

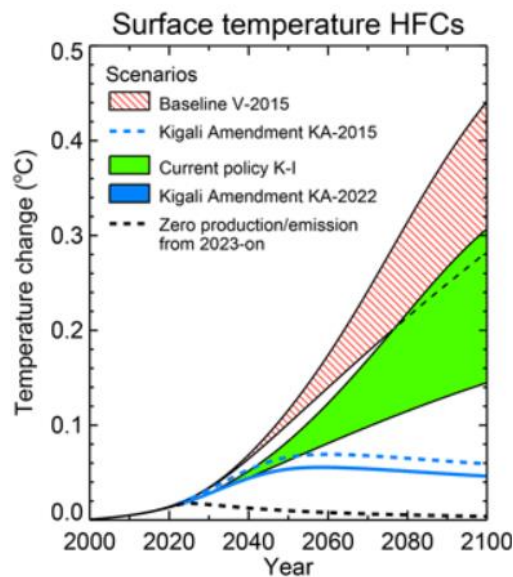


Fig. 27. Cambio de temperatura al reducir el uso de HFC[31] .

Normativa sobre los HFC: Europa

Reglamento (UE) n.º 517/2014 (Reglamento sobre gases fluorados) [32]

Este reglamento constituye el marco principal que regula el uso y la reducción de los gases fluorados en la UE, sustituyendo al Reglamento (CE) n.º 842/2006. Entre sus principales objetivos se incluyen:

1. Reducción gradual: establece una reducción progresiva de los HFC disponibles en el mercado europeo. Para 2030, se espera una reducción del 79 % de los HFC en comparación con los niveles de 2015.
2. Restricciones de uso: limita el uso de HFC en equipos nuevos, incluidos los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, y prohíbe su uso en determinadas aplicaciones en las que existen alternativas.
3. Mantenimiento y control de fugas: exige a los operadores que realicen comprobaciones periódicas de fugas, especialmente en sistemas con altos niveles de gases fluorados.
4. Requisitos de recuperación: Obliga a la recuperación de los gases al final de la vida útil de los equipos.

Reglamento (UE) n.º 2024/573 (Reglamento sobre gases fluorados) [33]

Medidas que mejoran, amplían y extienden las anteriores, entre las que se incluyen:

1. Un sistema de cuotas para los HFC, más allá de 2030 y cuya eliminación gradual está prevista para 2050.
2. Restricciones al uso y la eliminación de gases fluorados.



3. Establece normas más estrictas para prevenir las emisiones.
4. Facilita una mayor automatización de los controles para supervisar el comercio de gases fluorados.
5. Etiquetado de los equipos.

Refrigerantes actuales

Actualmente se barajan dos opciones:

1. Refrigerantes sintéticos, incluidos los HFO y las mezclas de HFC con HFC
2. Refrigerantes naturales

Son muy diferentes entre sí, por lo que a la hora de seleccionar el refrigerante hay que tener en cuenta varios requisitos.

HFO

Ventajas de los HFO

1. Bajo potencial de calentamiento global (GWP): los HFO, como el R-1234yf y el R-1234ze, tienen un GWP mucho más bajo (inferior a 1), lo que los convierte en una opción más respetuosa con el clima en comparación con los HFC.
2. Estabilidad térmica y química: los HFO son estables a las temperaturas y presiones típicas de funcionamiento de los sistemas de refrigeración, pero se descomponen más rápidamente en la atmósfera, lo que reduce su persistencia a largo plazo.
3. Baja toxicidad: muchos HFO presentan una baja toxicidad y no contienen cloro, lo que los hace más seguros para la capa de ozono en caso de fuga.
4. Menor inflamabilidad: en comparación con los hidrocarburos, su inflamabilidad es escasa.
5. Presiones más bajas: en comparación con el CO_2 , la presión de funcionamiento es menor.
6. Mayor facilidad de combinación con los HFC: lo que permite sustituciones directas (drop-in) de los HFC en las operaciones de mantenimiento.
7. Mezclas de HFC y HFO.

Características requeridas: Los HFC suelen ofrecer una mayor eficiencia, mejor transferencia de calor y menor inflamabilidad, aspectos fundamentales en muchas aplicaciones de refrigeración. Los HFO, por su parte, ofrecen un menor potencial de calentamiento global (GWP), pero pueden presentar una inflamabilidad ligeramente superior o una eficiencia menor en comparación con los HFC.

Aspectos medioambientales: La razón principal para desarrollar mezclas de HFC/HFO es reducir el potencial de calentamiento global (GWP) al tiempo que se mantienen la eficiencia termodinámica y las características operativas de los refrigerantes tradicionales. El GWP de la mezcla se calcula a menudo para garantizar que cumple con las normas reglamentarias.

Inflamabilidad: Este riesgo puede mitigarse ajustando la proporción de la mezcla o utilizando componentes ignífugos.

Eficiencia y rendimiento: Resulta complicado conseguir una mezcla que tenga una eficiencia y un rendimiento de refrigeración similares o mejores que los del HFC al que sustituye.

Propiedades termodinámicas: El refrigerante debe tener un rendimiento térmico (por ejemplo, capacidad calorífica, presión, cambios de entalpía) similar o superior al de los refrigerantes a los que sustituye.

Compatibilidad con los lubricantes: La mezcla debe ser compatible con los lubricantes utilizados en los sistemas existentes para garantizar el rendimiento a largo plazo y la fiabilidad del sistema.

Preocupaciones sobre los HFO



1. TFA
2. PFAS
3. Reglamento europeo que prohíbe los gases fluorados
4. «Greenwashing»
5. Presión de los gobiernos
6. Evolución de los costes y las cuotas de emisión
7. Natural frente a sintético

TFA

El ácido trifluoroacético (TFA), un compuesto organofluorado con la fórmula $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$, es un producto de degradación destacado que se forma en la atmósfera a partir de la descomposición de determinados refrigerantes. Según un informe de la Agencia Federal Alemana de Medio Ambiente, aproximadamente el 5 % del TFA detectado en el medio ambiente procede de actividades humanas, entre las que se incluyen la industria manufacturera, la agricultura, el tratamiento de aguas residuales y las emisiones de refrigerantes. Entre los refrigerantes, el R-1234yf se degrada completamente en TFA (100 %), mientras que el R-134a contribuye entre un 7 % y un 20 %. Otros refrigerantes presentan una producción de TFA menor: el R-1234ze(E) genera menos del 10 %, el R-1336mzz(Z) menos del 20 % y el R-1233zd(E) solo alrededor del 2 %. Es importante comprender la formación del TFA debido a su persistencia en el medio ambiente y a los posibles impactos ecológicos asociados al uso cada vez mayor de refrigerantes fluorados [34].

PFAS

Sustancias alquílicas perfluoradas y polifluoradas (PFAS): los PFAS constituyen un amplio grupo de más de 4 700 «sustancias químicas eternas» sintéticas, conocidas por su persistencia en el medio ambiente y su potencial nocivo para la salud humana. Esta familia incluye diversos gases fluorados utilizados en aplicaciones de climatización y refrigeración (HVAC&R), como ciertos HFC (por ejemplo, R-134a, R-125, R-143a y R-152a) y HFO (por ejemplo, R-1234yf, R-1234ze(E) y R-1233zd(E)). Cabe destacar que el ácido trifluoroacético (TFA), un producto de degradación de algunos refrigerantes, también se clasifica como PFAS debido a sus grupos químicos CF_3 y CF_2 . Como reflejo de la creciente preocupación, el estado de Maine, en EE. UU., se convertirá en la primera administración en prohibir la venta de productos que contengan PFAS a partir del 1 de enero de 2030. Para obtener información más detallada, consulte el informe de la Agencia Noruega de Medio Ambiente [35].

Refrigerantes naturales

Los refrigerantes naturales se consideran cada vez más como alternativas más seguras y sostenibles a los HFO. A diferencia de muchos refrigerantes sintéticos, los refrigerantes naturales no producen subproductos nocivos, como el ácido trifluoroacético (TFA) o el fluoruro de hidrógeno (HF), durante su descomposición en la atmósfera. Además, tienen un potencial de agotamiento del ozono (ODP) nulo y un potencial de calentamiento global (GWP) significativamente menor. Entre los refrigerantes naturales más utilizados se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el amoníaco (NH_3) y los hidrocarburos.

Dióxido de carbono (CO_2):

El dióxido de carbono (CO_2) tiene un potencial de calentamiento global (GWP) de 1, lo que lo convierte en un excelente refrigerante respetuoso con el medio ambiente con un impacto climático mínimo. No es tóxico ni inflamable, lo que garantiza la seguridad en condiciones normales de funcionamiento. Los sistemas de CO_2 funcionan de manera eficiente, especialmente en aplicaciones a baja temperatura, pero requieren presiones de funcionamiento más elevadas, lo que puede aumentar los costes y la complejidad de los equipos. Un reto clave es que la eficiencia del CO_2 disminuye a temperaturas



ambientales más elevadas, lo que limita su idoneidad para tales condiciones a menos que se implementen modificaciones significativas en el sistema.

Amoníaco (NH₃):

El amoníaco es un refrigerante natural con un potencial de calentamiento global (GWP) igual a cero, lo que significa que no contribuye al calentamiento global. Ofrece una alta eficiencia termodinámica, lo que lo hace especialmente adecuado para sistemas de refrigeración industrial a gran escala. Sin embargo, el principal inconveniente del amoníaco es su toxicidad, que plantea importantes problemas de seguridad en caso de fugas, a pesar de que no es inflamable. Esto requiere una manipulación cuidadosa, protocolos de seguridad rigurosos y sistemas avanzados de detección de fugas. A pesar de estos retos, el amoníaco está ampliamente reconocido como un refrigerante sostenible y sigue utilizándose de forma generalizada en aplicaciones industriales.

Hidrocarburos (HC) (por ejemplo, propano (R-290), butano (R-600a)):

Los hidrocarburos tienen un potencial de calentamiento global (GWP) muy bajo, de alrededor de 3, lo que los convierte en una alternativa rentable y respetuosa con el medio ambiente frente a los HFC y los HFO. Su principal inconveniente es su inflamabilidad, lo que requiere un diseño cuidadoso de los sistemas, medidas de seguridad estrictas y una detección eficaz de fugas para mitigar los riesgos. Los hidrocarburos son muy adecuados para aplicaciones de baja a media temperatura, como la refrigeración doméstica y los pequeños sistemas comerciales. Además, ofrecen una alta eficiencia termodinámica, lo que los convierte en una alternativa sólida para muchas aplicaciones de refrigeración residenciales y a pequeña escala.

Los refrigerantes naturales como alternativas

Ventajas

1. Sin subproductos nocivos: los refrigerantes naturales no se descomponen en compuestos nocivos como los TFA o el HF.
2. Sostenibilidad: tienen un potencial de calentamiento global (GWP) muy bajo o nulo y un potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) nulo.
3. Eficiencia: especialmente el amoníaco y el CO₂, ofrecen un alto rendimiento termodinámico y una gran eficiencia.
4. Disponibilidad y rentabilidad: Son abundantes y relativamente económicos, lo que los convierte en alternativas rentables a los refrigerantes sintéticos.

Retos

1. Modificaciones del sistema: El cambio a refrigerantes naturales puede requerir modificaciones en los sistemas existentes (nuevo sistema de compresión de vapor).
2. Consideraciones de seguridad: La inflamabilidad de los hidrocarburos y la toxicidad del amoníaco exigen una manipulación cuidadosa y medidas de seguridad. Esto puede aumentar los costes y la complejidad del sistema.
3. Infraestructura y formación: La gestión segura de los refrigerantes naturales puede suponer un reto para su adopción generalizada.

3.5. El futuro de los refrigerantes

Resumen

Tal y como se ha explicado en la sección anterior, se prevé que la tendencia futura en materia de refrigerantes se centre en la sostenibilidad y en la reducción del impacto medioambiental.



1. Refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global (GWP): La transición hacia refrigerantes con un GWP bajo o cercano a cero y que no generen subproductos nocivos, como los refrigerantes naturales (CO_2 , amoníaco, hidrocarburos), será una tendencia importante debido a una normativa más estricta.
2. Refrigerantes A2L y A3: Se producirá un aumento del uso de refrigerantes ligeramente inflamables (A2L) y más inflamables (A3), como el R-32, el R-290 y el R-1234ze(E), debido a su menor GWP y a su mayor eficiencia, aunque la seguridad en su manipulación supondrá un reto.
3. Eficiencia energética: Se dará prioridad a los refrigerantes que mejoren la eficiencia energética en los sistemas de refrigeración, a medida que las normativas sobre consumo energético se vuelvan más estrictas para reducir la huella de carbono global.
4. Refrigerantes sintéticos y mezclados: Se seguirá desarrollando nuevas mezclas que equilibren la reducción del potencial de calentamiento global (GWP), la eficiencia energética y la seguridad, al tiempo que satisfagan las necesidades del sector en diversas aplicaciones.
5. Normativa y acuerdos globales: Los acuerdos globales, como la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, impulsarán la eliminación gradual de sustancias con un alto potencial de calentamiento global (GWP), como los HFC, lo que propiciará un cambio hacia refrigerantes alternativos.

Consideraciones finales para máquinas conectadas a un sistema de calefacción y refrigeración centralizado (DHC)

¿Qué refrigerante debo cargar en mi máquina de refrigeración/calefacción? Debe tener en cuenta

1. La temperatura para producir calefacción o refrigeración (DHN, DCN, procesos industriales, agua caliente, etc.)
2. La temperatura de disipación o absorción del calor (ambiente, geotérmica, DHN, DCN, calor residual, etc.)
3. Tamaño de la máquina (capacidad de refrigeración/calefacción)
4. Ubicación de la máquina
5. La normativa local vigente
6. Tener en cuenta la normativa o las cuotas futuras
7. Coste de la máquina y del refrigerante
8. Normativa de seguridad
9. Consulte siempre a expertos o a los distribuidores locales

3.6. Conclusiones

La historia de los refrigerantes ofrece información esencial sobre las normas y requisitos actuales. Desde la comercialización de las tecnologías de refrigeración y bombas de calor, se han dedicado importantes esfuerzos a identificar los refrigerantes más sostenibles. Aunque existe un refrigerante óptimo para cada aplicación, ningún refrigerante perfecto cumple todos los criterios a la vez. Por lo tanto, siempre es necesario encontrar un equilibrio entre el rendimiento termodinámico, la viabilidad técnica, la seguridad, los factores económicos y el impacto medioambiental. Los refrigerantes alternativos para los sistemas existentes (de sustitución directa o de adaptación) difieren de los destinados a nuevas instalaciones, que pueden tener requisitos de seguridad u operativos distintos. De cara al futuro, la tendencia se inclina hacia los refrigerantes naturales para abordar de forma integral las preocupaciones medioambientales. Además, tecnologías como las redes de calefacción urbana (DHN) y las redes de refrigeración urbana (DCN) pueden facilitar la transferencia de calor y permitir el uso de refrigerantes con requisitos de seguridad más estrictos, al permitir el diseño de grandes sistemas de compresión de vapor aislados.

4. Aspectos económicos y medioambientales



4.1. Introducción

Las redes de refrigeración urbana (DCN) ofrecen una alternativa a los sistemas de aire acondicionado (multi-)split, las bombas de calor reversibles, las enfriadoras y los sistemas de flujo de refrigerante variable (VRF). A diferencia de estos sistemas descentralizados, en los que cada piso, planta o zona de confort de un edificio cuenta con su propia unidad, las DCN centralizan la producción de refrigeración para todo un distrito o un grupo de edificios.

Este enfoque centralizado mejora la eficiencia energética, reduce los costes de equipamiento y mejora la sostenibilidad, todo ello manteniendo el mismo nivel de confort interior.

Sin embargo, la implantación de una DCN requiere una inversión considerable en infraestructura de distribución, especialmente en la construcción de tuberías de refrigeración. La viabilidad económica de estos sistemas depende de varios factores clave, entre los que se incluyen la densidad de la demanda, las condiciones normativas y el apoyo político.

Las DCN comparten muchas de las ventajas y limitaciones de las redes de calefacción urbana. No obstante, los sistemas de refrigeración suelen funcionar con requisitos de temperatura más uniformes. Por otra parte, las fuentes de refrigeración residual son escasas, salvo cuando se utilizan bombas de calor capaces de calentar y refrigerar simultáneamente.

En este capítulo se analizan los principales factores que influyen en la viabilidad económica y la sostenibilidad de las DCN, incluidas las consideraciones legales, normativas y políticas.

4.2. Densidad de la demanda

Densidad de la demanda de refrigeración en las DCN

La densidad de la demanda de refrigeración se refiere a la energía térmica necesaria para la refrigeración por unidad de superficie en una zona específica. Se trata de un parámetro fundamental para evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema de red de refrigeración urbana (DCN). Cuanto mayor sea la densidad de la demanda de refrigeración, más viable será financieramente la red de refrigeración urbana en comparación con otros sistemas de refrigeración individuales o distribuidos.

La densidad de la demanda de refrigeración será mayor en zonas muy pobladas (ciudades frente a barrios residenciales de viviendas unifamiliares) y en climas más cálidos, o en zonas con grandes consumidores de refrigeración, como los centros de datos.

A la hora de estudiar la densidad de la demanda de refrigeración, deben tenerse en cuenta varios factores:

1. Evaluación de viabilidad: Las zonas con una alta densidad de demanda de refrigeración son más adecuadas para los sistemas DCN debido a los menores costes de distribución por unidad de energía suministrada.
2. Optimización de la red: contribuye a dimensionar adecuadamente los componentes del sistema, como las tuberías, las estaciones de intercambio de calor y las plantas de refrigeración.
3. Sostenibilidad: Las zonas de alta densidad permiten una distribución eficiente de la energía, lo que reduce el impacto medioambiental y fomenta la sostenibilidad.

Usuarios de refrigeración

La demanda de refrigeración suele proceder de



1. Zonas urbanas: para el confort térmico, se utiliza en sistemas de aire acondicionado, en fan-coils, techos radiantes o grandes sistemas como sustitución de las enfriadoras. Incluye aplicaciones domésticas, pero también oficinas, comercios, edificios públicos, etc. Rango de temperaturas similar.
2. Procesos industriales: en este caso, el rango de temperaturas es amplio, ya que incluye todos los procesos que requieren enfriar el producto fabricado o manipulado.
3. Centros de datos: Están presentes en ciudades y zonas industriales. Cada vez son más importantes.

Factores que influyen en la demanda de refrigeración

Factores que influyen en la densidad de la demanda de refrigeración:

1. Características urbanas: Los edificios de gran altura y las zonas urbanas densamente pobladas suelen presentar una mayor densidad de demanda de refrigeración.
2. Clima: Los climas más cálidos aumentan la demanda de refrigeración, lo que hace que los sistemas DCN resulten más atractivos.
3. Uso de los edificios: Las zonas comerciales e industriales suelen requerir más refrigeración que las zonas residenciales.

Análisis de la densidad de la demanda

Un análisis detallado de la demanda de refrigeración es fundamental para diseñar un sistema de red de refrigeración urbana (DCN) eficiente y rentable. Deben tenerse en cuenta los siguientes pasos:

1. Recopilación y preprocesamiento de datos

Datos de los edificios: Recopilar datos detallados sobre los tipos de edificios, su uso (residencial, comercial, industrial), su tamaño y sus índices de ocupación, e incluir datos históricos sobre la demanda de refrigeración (si están disponibles).

Datos climáticos: Utilizar conjuntos de datos meteorológicos para tener en cuenta la temperatura local, la humedad y la radiación solar, que influyen en las necesidades de refrigeración.

Patrones de consumo energético: Analizar los perfiles energéticos para comprender la demanda de refrigeración en horas punta y fuera de horas punta.

2. Estimación de la carga de refrigeración

Simulación dinámica: Utilizar herramientas de simulación energética (por ejemplo, TRNSYS, EnergyPlus) para calcular las cargas de refrigeración por hora de cada edificio en función de las propiedades de la envolvente, los sistemas de climatización y las cargas internas.

Identificación de la carga máxima: Identifique las cargas máximas de refrigeración, ya que influyen en el dimensionamiento de las instalaciones y las redes de distribución.

3. Cartografía espacial de la demanda

Sistemas de Información Geográfica (SIG): Cartografiar espacialmente la demanda de refrigeración para visualizar las zonas de alta demanda y evaluar la viabilidad de los trazados de la red. Superponer datos sobre la disponibilidad de infraestructuras (carreteras, servicios públicos, etc.).

Zonificación: Dividir el área de servicio en zonas en función de la densidad de la demanda y dar prioridad a las zonas con mayor potencial.

4. Perfiles de demanda y diversidad de la carga



Análisis temporal: Elaborar perfiles de demanda de refrigeración por hora, por día y por temporada para tener en cuenta las fluctuaciones. Utilizar factores de diversidad para tener en cuenta la falta de coincidencia de las demandas máximas entre los distintos edificios.

Factores de carga simultánea: Evaluar el funcionamiento simultáneo de los edificios para reducir los requisitos de capacidad de la planta.

5. Proyecciones de crecimiento de la demanda

Tendencias de desarrollo urbano: Incorporar los planes de crecimiento futuros para las zonas residenciales, comerciales e industriales.

Mejoras en la eficiencia energética: Tener en cuenta la evolución de la normativa de construcción y las medidas de rehabilitación que puedan reducir las cargas de refrigeración.

6. Análisis de viabilidad

Densidad umbral: Asegurarse de que la densidad de la demanda de refrigeración supere los umbrales (por ejemplo, 30-50 MWh/ha/año) para garantizar la viabilidad económica.

Análisis de coste-beneficio: Evaluar las compensaciones entre las inversiones en infraestructura y los costes operativos, comparando los sistemas de refrigeración centralizados con los individuales.

7. Integración y optimización del sistema

Análisis del lado de la fuente: Evaluar el potencial de integración de fuentes renovables, Enfriadoras de absorción alimentados por calor residual o sistemas de cogeneración (CHP) para la refrigeración.

Pérdidas en la red: Analizar y minimizar las pérdidas térmicas e hidráulicas en el sistema de distribución.

Flexibilidad: Diseñar sistemas con escalabilidad y modularidad para adaptarse a las variaciones de la demanda futura.

4.3. Viabilidad de la refrigeración urbana en comparación con otras tecnologías

Características generales

La refrigeración urbana presenta dos diferencias significativas en comparación con los sistemas distribuidos.

1. En primer lugar, la red de tuberías que hace circular el agua refrigerada desde la planta central hasta los edificios supone un coste adicional.
2. En segundo lugar, la refrigeración urbana consume agua. La cantidad de agua consumida es relativamente pequeña debido al funcionamiento en circuito cerrado.

Al compensar los costes de la red, la refrigeración urbana ofrece tres ventajas principales:

1. Bajo consumo energético.
2. Uso eficiente de la capacidad gracias a la diversidad de la carga y a la flexibilidad en el diseño y la instalación de la misma.
3. Potencial de ahorro en períodos de máxima demanda. La red de refrigeración urbana (DCN) puede almacenar hasta un 30 % de la producción potencial reteniendo agua refrigerada en depósitos.

Los sistemas de redes de refrigeración urbana (DCN) presentan ventajas y retos económicos específicos en comparación con las soluciones de refrigeración convencionales ([tabla 5](#)).



1. Inversión de capital	
DCN	CONVENCIONAL
Altos costes iniciales: los sistemas DCN requieren una importante inversión inicial para las plantas centralizadas, las redes de tuberías y la infraestructura de conexión. Las economías de escala pueden justificar estos costes en zonas con una alta densidad de demanda de refrigeración, ya que los costes fijos se distribuyen entre una base de usuarios más amplia.	Los sistemas de aire acondicionado independientes o las unidades de refrigeración de azotea tienen unos costes iniciales más bajos, ya que cada unidad se instala y funciona de forma independiente. Sin embargo, estos sistemas duplican el equipamiento en los distintos edificios, lo que da lugar a ineficiencias en la inversión de capital.
2. Costes operativos	
Las operaciones centralizadas permiten reducir los costes energéticos gracias al uso de Enfriadoras de alta eficiencia, al reparto optimizado de la carga y a la posibilidad de utilizar electricidad fuera de las horas punta para el almacenamiento térmico. Los costes de mantenimiento también son menores por unidad de refrigeración, ya que un único sistema da servicio a varios usuarios.	Los sistemas descentralizados suelen tener un mayor consumo energético debido a que cuentan con Enfriadoras más pequeños y menos eficientes, y a la falta de diversificación de la carga. El mantenimiento resulta más costoso, ya que cada unidad requiere una revisión individual.
3. Rentabilidad a largo plazo	
DCN	CONVENCIONAL
El ahorro de costes a largo plazo puede compensar la inversión inicial gracias a la reducción de las facturas de energía, los menores gastos de mantenimiento y las economías de escala. Estos sistemas resultan especialmente rentables en regiones con una elevada demanda de refrigeración y precios energéticos estables.	Aunque la inversión inicial es más barata, el coste total de propiedad aumenta con el tiempo debido a los mayores gastos operativos y de mantenimiento.
4. Potencial de ingresos	
Los proveedores de DCN pueden generar flujos de ingresos estables mediante contratos a largo plazo con los clientes, lo que garantiza flujos de caja predecibles. La venta del exceso de capacidad de refrigeración o la integración con sistemas de energía renovable pueden crear oportunidades de ingresos adicionales.	No existe un modelo de ingresos centralizado, ya que los sistemas individuales no generan ingresos más allá de su funcionamiento.
5. Riesgo y flexibilidad financiera	
DCN	CONVENCIONAL



El riesgo financiero es mayor durante la fase inicial debido a las grandes inversiones y a la dependencia de la densidad de la demanda. Una vez en funcionamiento, los sistemas de corriente continua se benefician de flujos de caja predecibles y de una menor volatilidad del mercado.	Menor riesgo financiero inicial, pero mayor exposición a las fluctuaciones de los precios de la energía y a los costes de mantenimiento a lo largo del tiempo.
6. Beneficios económicos externos	
Reduce las picos de demanda eléctrica en las zonas urbanas, lo que podría reducir las tarifas energéticas y los costes de mejora de las infraestructuras para las empresas de servicios públicos. Genera oportunidades de creación de empleo durante las fases de construcción y explotación.	Impacto limitado en factores económicos más amplios, ya que los beneficios se limitan a los fabricantes de equipos y a los proveedores de servicios.

Tabla 5. Ventajas y retos económicos de la tecnología DCN en comparación con las tecnologías de refrigeración convencionales.

Resumen

1. Costes de capital: los sistemas DCN tienen unos costes iniciales elevados, pero las economías de escala los hacen rentables en zonas densamente pobladas, a diferencia de los sistemas independientes más baratos que cuentan con equipos duplicados.
2. Costes operativos: los sistemas DCN son más eficientes energéticamente y su mantenimiento resulta más económico gracias a la centralización de las operaciones, mientras que los sistemas convencionales tienen unos costes a largo plazo más elevados.
3. Ahorro a largo plazo: La DCN ofrece un ahorro significativo de costes a lo largo del tiempo, mientras que los sistemas independientes conllevan unos costes totales de propiedad más elevados.
4. Ingresos: La DCN genera flujos de ingresos estables a través de contratos, a diferencia de los sistemas convencionales.
5. Riesgo: La DCN presenta un mayor riesgo financiero inicial, pero ofrece beneficios estables a largo plazo; los sistemas convencionales tienen menores riesgos de puesta en marcha, pero sus costes operativos son volátiles.
6. Beneficios externos: La DCN reduce las cargas máximas urbanas y apoya las economías locales, mientras que los sistemas autónomos tienen un impacto más amplio limitado.

Regulación tarifaria por parte del Gobierno

Al igual que la mayoría de los servicios públicos, la refrigeración urbana requiere un marco regulador adecuado que proteja a los promotores, los proveedores, los consumidores y la economía en general.

Singapur ha designado áreas de servicio específicas para la concesión de licencias de refrigeración urbana y somete las tarifas a una rentabilidad definida sobre los activos.

Los gobiernos de Dinamarca, los Países Bajos, Noruega y Polonia han fomentado la adopción de la calefacción urbana y emplean métodos como la regulación de precios, las zonas de aplicación obligatorias, el apoyo financiero y la propiedad estatal de las redes de distribución de calor.

Los gobiernos deberían establecer un marco tarifario coherente para la refrigeración urbana. Esto implica definir el modelo de asignación de los cargos iniciales, recurrentes y por consumo a los promotores inmobiliarios, los propietarios particulares y los inquilinos. Los gobiernos deben velar por



la aplicación coherente de dichos modelos de tarificación en todos los proyectos. Estos modelos deben proteger a los propietarios particulares y a los inquilinos frente al arbitraje en los precios inmobiliarios.

Los modelos de tarificación deben tratar de ajustar las tarifas pagadas por los usuarios al consumo real de refrigeración. En algunos casos, será necesaria la regulación de precios para ofrecer tarifas equitativas a los usuarios, al tiempo que se garantizan a las empresas de refrigeración urbana unos rendimientos acordes con los riesgos del sector.

Estudio de Alajmi y Zedan (2020) en Kuwait (fig. 28).

Este estudio demuestra las importantes ventajas operativas y de costes de los sistemas de refrigeración urbana (DC) en comparación con los métodos de refrigeración tradicionales. El coste total se reduce sustancialmente, pasando de 22 669 millones de dólares para las unidades de tejado (RTU) y 20 829 millones de dólares para los sistemas de flujo variable de refrigerante (VRF) a 17 395 millones de dólares para el sistema de refrigeración urbana. Además, el sistema RTU requiere 660 200 unidades de refrigeración, el sistema VRF 220 800 unidades, mientras que el sistema DC solo necesita 624 unidades. Esta drástica reducción influye en varios factores: disminuye las horas de mano de obra necesarias para el servicio, el mantenimiento y el funcionamiento; reduce el espacio en la azotea requerido para los equipos de refrigeración en los edificios residenciales; disminuye el número de piezas de recambio necesarias; y reduce significativamente el riesgo de fugas de refrigerante debido al menor número de unidades individuales en funcionamiento [36].

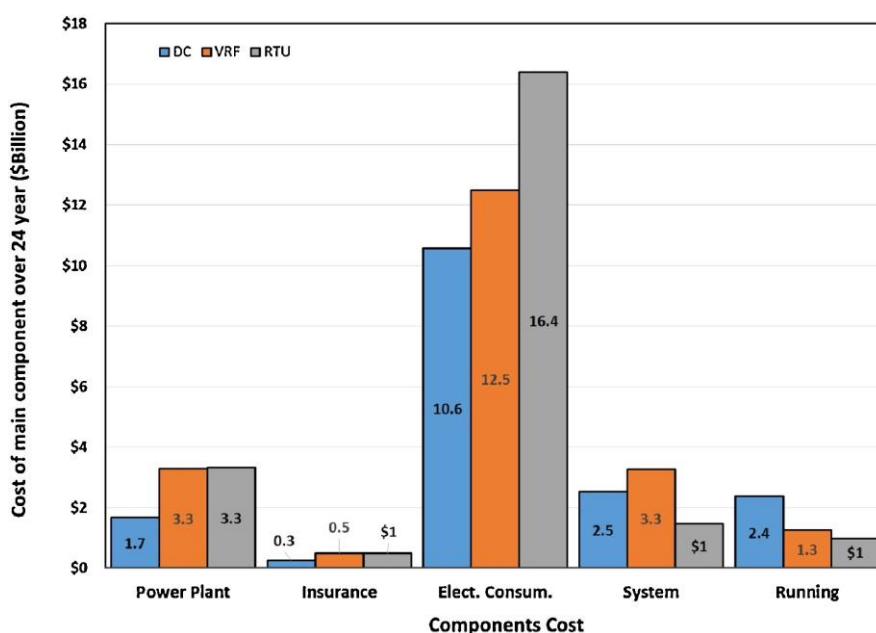


Fig. 28. Coste económico de las diferentes tecnologías en Alajmi y Zedan (2020) en Kuwait [36]

¿Cómo pueden contribuir las empresas, los gobiernos y los particulares a la calefacción y refrigeración centralizadas (DHC)?

Los gobiernos desempeñan un papel fundamental a la hora de sentar las bases para el progreso mediante el establecimiento de objetivos climáticos ambiciosos y la aplicación de políticas de apoyo. Al incentivar la adopción de tecnologías energéticamente eficientes, como la refrigeración urbana, no solo reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también estimulan el crecimiento económico en las industrias verdes.

Estas políticas pueden animar a las empresas a diversificar sus carteras, invirtiendo en proyectos de energía limpia y soluciones innovadoras. A medida que las empresas se adaptan y evolucionan,



contribuyen a una economía verde próspera que no solo crea empleo, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo.

Los ciudadanos pueden tomar decisiones conscientes sobre el consumo energético, desde utilizar electrodomésticos de bajo consumo hasta reducir el desperdicio de agua. Además, pueden participar en iniciativas comunitarias y sensibilizar sobre la importancia de la sostenibilidad.

En última instancia, es a través de un esfuerzo colaborativo, en el que gobiernos, empresas y ciudadanos trabajen en tándem, como se puede lograr el cambio transformador necesario para abordar los apremiantes retos del cambio climático y construir un mundo más sostenible para las generaciones venideras.

El caso de los países del Golfo

En muchos casos, los precios de la electricidad son excesivamente bajos, lo que hace que los sistemas de refrigeración urbana solo parezcan viables con niveles muy elevados de densidad de refrigeración. Los gobiernos deberían designar zonas adecuadas con la densidad suficiente para la refrigeración urbana e incluir esta tecnología en la planificación urbana.

La refrigeración representa el 50 % del consumo anual de electricidad, lo que supone un coste de oportunidad anual en combustible de aproximadamente 20 000 millones de dólares. Si se emplea adecuadamente, la refrigeración urbana podría cubrir alrededor del 30 % de las necesidades de refrigeración previstas para 2030. Esto evitaría que la región tuviera que construir 20 GW de nueva capacidad de generación eléctrica y supondría un ahorro de 200 000 barriles equivalentes de petróleo al día en combustible [37].

4.4. Impacto medioambiental de la refrigeración urbana

Emisiones de carbono

Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): La alta eficiencia y la integración con fuentes de energía renovables (por ejemplo, refrigeración solar, geotérmica) o la recuperación de calor residual pueden reducir significativamente las emisiones de CO₂ en comparación con los sistemas convencionales. El uso de fuentes de electricidad de bajas emisiones (por ejemplo, energía hidroeléctrica o eólica) amplía estos beneficios.

Gestión de los refrigerantes: Los sistemas centralizados permiten el uso de refrigerantes respetuosos con el medio ambiente, con un bajo potencial de calentamiento global (GWP) y una mejor contención para reducir las fugas.

Optimización de recursos

1. Consumo de agua: Los sistemas centralizados pueden optimizar el consumo de agua en los procesos de refrigeración, especialmente en los sistemas de refrigeración por evaporación. Sin embargo, los sistemas que consumen grandes cantidades de agua pueden suponer una carga para los recursos hídricos locales en regiones áridas, a menos que se utilicen fuentes de agua alternativas (por ejemplo, aguas residuales tratadas).
2. Uso del suelo: Los sistemas DCN reducen la necesidad de equipos mecánicos en los edificios individuales, liberando espacio en las azoteas y en el interior para otros usos, como paneles solares o cubiertas verdes.

Estudio de Alajmi y Zedan (2020) en Kuwait.

El elevado factor de emisión de CO₂ hace que la alta eficiencia energética sea aún más importante (Figs. 29, 30).

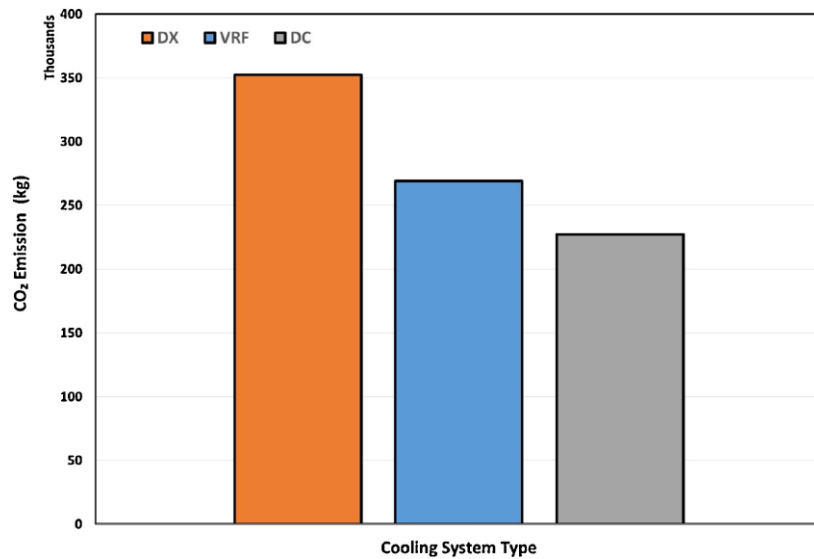


Fig. 29. Emisiones de CO₂ en función del tipo de sistema de refrigeración[37].

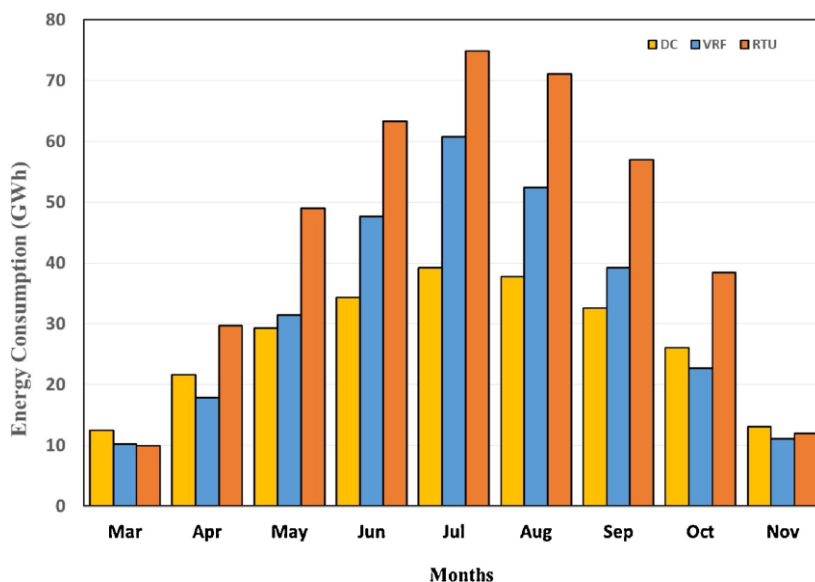


Fig. 30. Consumo energético de los diferentes sistemas de refrigeración[37].

Efecto de isla de calor urbana (UHI)

1. Evacuación centralizada del calor: al trasladar la evacuación del calor de múltiples edificios a una ubicación centralizada, los sistemas DCN reducen la generación localizada de calor que contribuye al efecto isla de calor urbana.
2. Diseño del sistema: Los sistemas DCN pueden utilizar masas de agua o sistemas subterráneos para la disipación del calor, minimizando así el impacto medioambiental sobre las temperaturas urbanas.

Integración con tecnologías sostenibles

1. Aprovechamiento del calor residual: Los sistemas DCN pueden integrarse con la recuperación de calor residual procedente de procesos industriales o centrales eléctricas, convirtiendo el exceso de calor en un recurso de refrigeración y mejorando el aprovechamiento energético global.



2. Energías renovables y fuentes con bajas emisiones de carbono: Los sistemas DCN pueden incorporar fuentes de energía renovables como la energía solar térmica, la geotérmica o el calor residual a baja temperatura, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles.

Gestión de residuos e impacto a lo largo del ciclo de vida

1. Reducción de la eliminación de equipos: Los sistemas centralizados reducen la necesidad de numerosas unidades de refrigeración pequeñas, lo que disminuye la producción y la eliminación de equipos a lo largo del tiempo.
2. Longevidad de la infraestructura: Los sistemas DCN suelen tener una vida útil más larga en comparación con los sistemas de refrigeración convencionales, lo que se traduce en un menor impacto medioambiental a lo largo del ciclo de vida.

Posibles inconvenientes

1. Dependencia de las fuentes de energía: si funcionan con combustibles fósiles, los sistemas DCN pueden generar mayores emisiones, especialmente en regiones con redes eléctricas con altas emisiones de carbono.
2. Impactos de la construcción: La construcción de una red DCN requiere importantes trabajos de excavación y desarrollo de infraestructuras, lo que puede alterar temporalmente los ecosistemas y los entornos urbanos.
3. Pérdidas térmicas: Un aislamiento ineficaz de las tuberías o la transferencia de calor a larga distancia pueden provocar pérdidas de energía, lo que reduce la eficiencia general del sistema.

4.5. Optimización de las tecnologías de refrigeración urbana

Optimización económica para la reducción de los costes operativos

Economías de escala:

En los sistemas de refrigeración urbana a gran escala, los costes de capital iniciales (por ejemplo, la construcción de la planta o la infraestructura de tuberías) pueden repartirse entre múltiples consumidores. Esto reduce el coste de capital por unidad en comparación con los sistemas descentralizados.

Un diseño cuidadoso y la estandarización de los equipos (por ejemplo, enfriadoras, bombas y tuberías) pueden reducir los costes de construcción y acelerar la puesta en marcha.

Diseño modular:

Los sistemas modulares permiten una implementación por fases, lo que reduce la carga de la inversión inicial. Esta flexibilidad permite a los operadores ampliar el sistema a medida que crece la demanda, garantizando un uso eficiente del capital.

Mantenimiento centralizado:

Las operaciones centralizadas simplifican el mantenimiento y reducen los costes, ya que se puede realizar el mantenimiento de todo el sistema de una sola vez, evitando la necesidad de realizar un mantenimiento por separado de las unidades individuales en los sistemas descentralizados.

El mantenimiento predictivo basado en el análisis de datos puede reducir aún más el tiempo de inactividad y los costes de reparación imprevistos, mejorando así la eficiencia operativa.

Eficiencia energética:



La optimización del uso de la energía mediante la integración de Enfriadoras de alta eficiencia, variadores de velocidad y sistemas de control avanzados puede reducir el consumo energético global de los sistemas DCN.

La implantación de sistemas centrales de almacenamiento de energía térmica permite la refrigeración fuera de las horas punta, lo que reduce los costes asociados a la demanda eléctrica en horas punta, que suele ser más cara.

Integración con el calor residual:

El aprovechamiento del calor residual de los procesos industriales o de las centrales eléctricas ofrece la oportunidad de reciclar el exceso de energía térmica mediante sistemas de sorción para la refrigeración de la red de refrigeración centralizada (DCN). El frío procedente de los evaporadores no utilizados en las bombas de calor también puede inyectarse en la red de refrigeración centralizada (DCN).

Integración de energías renovables:

La incorporación de fuentes de energía renovables, como la energía solar térmica, la geotérmica o la electricidad con bajas emisiones de carbono, combinadas con sistemas de sorción que proporcionan refrigeración a la red de refrigeración centralizada (DCN), reduce aún más los costes operativos al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y estabilizar los precios de la energía.

La refrigeración solar, por ejemplo, puede integrarse directamente en la red de la DCN para reducir los costes operativos, especialmente en regiones soleadas. La tecnología aún necesita un mayor desarrollo.

Uso de refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global (GWP):

Optimizar la elección de refrigerantes para utilizar fluidos con bajo potencial de calentamiento global (GWP), como los refrigerantes naturales o las alternativas sintéticas de bajo GWP, reduce el impacto medioambiental del sistema de refrigeración.

Los avances en la gestión de los refrigerantes (por ejemplo, los sistemas de detección de fugas y un mantenimiento adecuado) garantizan unas pérdidas mínimas de refrigerante, lo que reduce la huella de carbono global del sistema.

Descarbonización del suministro energético:

Conectar los sistemas DCN a una red descarbonizada, alimentada por fuentes renovables como la energía eólica, solar o hidroeléctrica, reduce significativamente las emisiones asociadas a la refrigeración.

Cuando los sistemas DCN se combinan con la generación de energía renovable (por ejemplo, energía solar fotovoltaica para la alimentación auxiliar), mejora el rendimiento medioambiental global del sistema.

Gestión eficiente del agua:

Los sistemas de refrigeración por agua que utilizan agua en los procesos de refrigeración pueden optimizar el consumo de agua mediante la implantación de sistemas de circuito cerrado o el uso de fuentes de agua no potable, como las aguas residuales tratadas.

Redes inteligentes e Internet de las cosas (IoT):

La integración de la tecnología de redes inteligentes y de sensores del Internet de las cosas (IoT) en el sistema de CC permite la monitorización en tiempo real, el equilibrio dinámico de la carga y el análisis predictivo, lo que optimiza el uso de la energía y la eficiencia operativa.



Los algoritmos inteligentes pueden ajustar los parámetros del sistema en función de la demanda, las previsiones meteorológicas y los precios de la energía, lo que reduce el desperdicio energético y optimiza el rendimiento.

Respuesta a la demanda:

La incorporación de estrategias de respuesta a la demanda, en las que la demanda de refrigeración se desplaza a horas de menor consumo, reduce el coste energético global y alivia la carga sobre la red. Además, favorece la integración de fuentes de energía renovables variables.

Sistemas de respaldo:

Incluir redundancia en el diseño del sistema (por ejemplo, Enfriadoras de reserva o almacenamiento térmico) garantiza que se satisfagan las necesidades de refrigeración incluso durante picos de demanda o fallos en los equipos, lo que evita interrupciones operativas y reduce los costes de reparaciones de emergencia.

Los sistemas resilientes minimizan el tiempo de inactividad del sistema, que, de otro modo, podría acarrear altos costes y consecuencias medioambientales debido a la necesidad de soluciones temporales como la refrigeración de emergencia.

4.6. Conclusiones

Para determinar la idoneidad de una red de refrigeración urbana (DCN), es esencial realizar un estudio exhaustivo de la densidad de demanda, teniendo en cuenta los edificios, los consumidores industriales y los centros de datos. Este análisis va más allá de los proyectos convencionales de climatización y refrigeración al incorporar disciplinas adicionales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Cuando la densidad de demanda está debidamente justificada y los riesgos se minimizan, una DCN bien diseñada puede superar en rendimiento a los sistemas de refrigeración tradicionales, ofreciendo períodos de amortización atractivos. A diferencia de las soluciones de refrigeración convencionales, la participación de las administraciones públicas es crucial para desarrollar y regular las DCN, promoviéndolas desde perspectivas económicas, medioambientales y de planificación urbana. Más allá de la eficiencia energética, las DCN contribuyen a reducir el efecto isla de calor urbano, minimizar los residuos y facilitar la integración con tecnologías sostenibles. Sin embargo, las DCN requieren estrategias de control y optimización más sofisticadas para garantizar la rentabilidad y la eficiencia energética, ámbito en el que los avances en el Internet de las cosas (IoT) y las tecnologías de la comunicación desempeñan un papel fundamental.

5. Estudios de casos de proyectos realizados

En este tema se presentan diez casos prácticos representativos, cada uno con sus propias condiciones y particularidades. El objetivo es comprender los siguientes aspectos:

1. Proyectos exitosos de calefacción y refrigeración urbanísticas que utilizan enfriadoras en diferentes climas
2. Rendimiento y ahorro energético mediante el uso de enfriadoras en las redes de calefacción y refrigeración de distrito
3. Diseño, instalación y funcionamiento de bombas de calor en proyectos de calefacción y refrigeración urbanísticas
4. Buenas prácticas para integrar bombas de calor en la infraestructura de refrigeración urbana, incluyendo consideraciones sobre el dimensionamiento del sistema, el almacenamiento térmico y las estrategias de control

Los casos prácticos se centrarán exclusivamente en redes de calefacción urbana y en redes combinadas de calefacción y refrigeración urbanas.



Se pueden encontrar más casos prácticos en la bibliografía.

5.1. Red de refrigeración urbana de la Universidad James Cook (Townsville, Australia) [38]

Descripción general (Fig. 31)

La Universidad James Cook de Townsville ocupa un campus distribuido de unas 255 hectáreas con 28 edificios académicos. La superficie total climatizada es de 69 000 m². El campus se amplió por etapas, y cada nuevo edificio se equipó con su propia instalación de aire acondicionado independiente. Muchas de las unidades de refrigeración están envejeciendo —algunas tienen hasta 35 años— y se prevé que la mayoría deba sustituirse en los próximos cinco años, con un coste estimado de 9 millones de dólares. Actualmente, la capacidad total de las instalaciones repartidas en 29 ubicaciones del recinto es de aproximadamente 11,5 MW de refrigeración. El campus tiene previsto seguir ampliándose, añadiendo 25 200 m² de superficie climatizada para 2010 y otros 25 000 m² para 2015.

Diseño (Fig. 32)

El almacenamiento de energía térmica (TES) aprovecha los momentos del día o de la noche en los que la demanda de refrigeración supera la media, poniendo en funcionamiento la planta central de agua refrigerada para volver a enfriar el agua de retorno (a 15 °C) hasta alcanzar una temperatura de 6 °C. El edificio de la Planta Central de Energía (CEP) alberga tres enfriadoras centrífugas de alta eficiencia, cada una con una potencia nominal de 4,2 MW, y cuenta con espacio previsto para dos enfriadoras adicionales en el futuro. La planta también incluye bombas de agua refrigerada primarias y secundarias equipadas con variadores de velocidad, bombas de agua del condensador también con variadores de velocidad y cuatro torres de refrigeración con una potencia nominal de 5,1 MW cada una, con espacio previsto para una quinta torre. Los ventiladores de las torres de refrigeración están equipados con variadores de velocidad para mejorar la eficiencia.

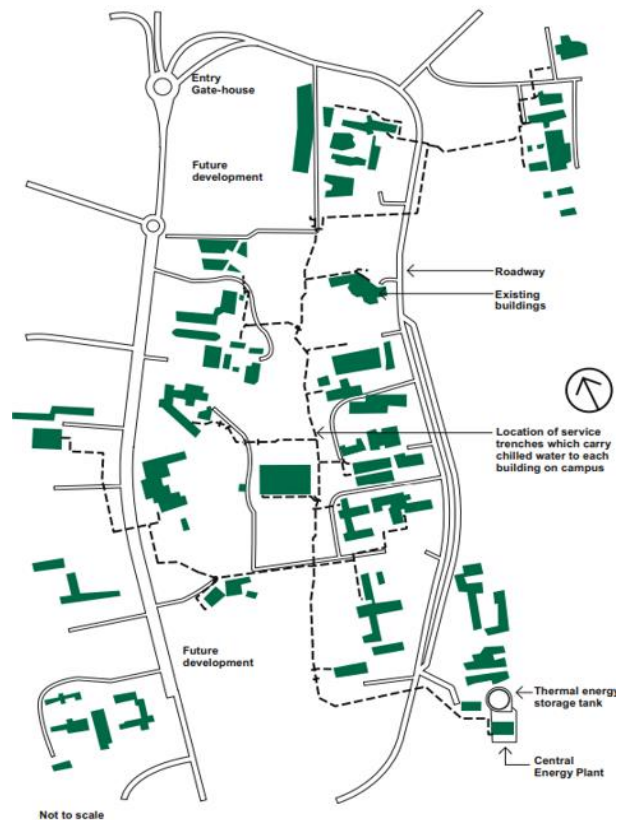




Fig. 31. Plano de la instalación del campus de Townsville de la Universidad James Cook[38] .

El depósito TES de 12 megalitros contiene difusores de agua superiores e inferiores de diseño especial, que permiten que el agua salga o entre en el depósito sin turbulencias.

La instalación de refrigeración y almacenamiento de agua se encuentra en la parte sureste del campus, a una altura suficiente para garantizar que el nivel del agua en el depósito de almacenamiento térmico sea el punto más alto de la red de agua refrigerada, asegurando así la altura estática.

La planta central de energía **tiene un coeficiente de rendimiento (COP, una medida de eficiencia) de diseño de 6 en condiciones estivales de 33 °C de bulbo seco y 27 °C de bulbo húmedo.**

El agua se distribuye a través de 7,8 km de tuberías subterráneas sin aislamiento, que abastecen a cada edificio.

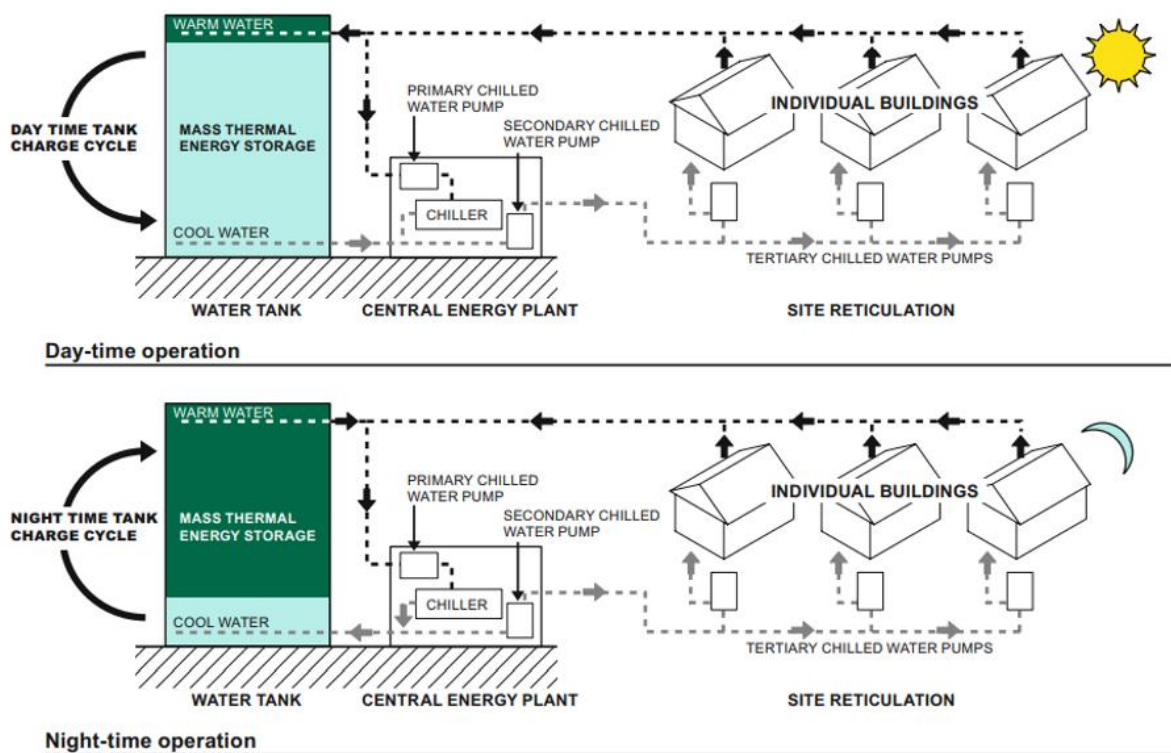


Fig. 32. Diagrama de flujo del proceso [38].

Principales conclusiones

1. Mejoras en la eficiencia del sistema: Entre las características clave que mejoran la eficiencia se incluyen la estrategia de control de la planta central, los motores de alta tensión de las enfriadoras, la disposición optimizada de las tuberías del CEP y el uso de tuberías subterráneas de agua refrigerada, todo lo cual contribuye al ahorro de costes y a la flexibilidad del sistema.
2. Ahorro en costes de inversión: El uso de motores de alta tensión y la eliminación de los transformadores de baja tensión evitan las pérdidas en los transformadores y la necesidad de infraestructura adicional, lo que supone un ahorro de 800 000 dólares en costes de inversión.
3. Red de distribución de agua refrigerada: El uso de tuberías de MDPE en lugar de tuberías aisladas reduce los costes, minimiza las uniones y ofrece flexibilidad para futuras ampliaciones.



4. Ahorro energético y mejora de la eficiencia: un mayor diferencial de temperatura (9 °C) reduce la energía necesaria para el bombeo y el tamaño de las tuberías, lo que se traduce en un menor consumo energético y en un ahorro a largo plazo.
5. Impacto medioambiental y económico: El proyecto reducirá los costes energéticos en 990 000 dólares, disminuirá la demanda máxima de la instalación en 4,5 MW y reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero en 12 000 toneladas de CO₂e.

5.2. Barrio la Pinada [39]

Descripción general

El Barrio La Pinada es una urbanización privada situada en Paterna, cerca de la ciudad de Valencia, que se prevé que abarque 320 000m².

El Barrio La Pinada es una nueva urbanización cuya construcción aún no ha comenzado. Esto brinda la oportunidad de crear la red desde cero, lo que se ajusta a las características de un caso práctico de red nueva.

La demanda total que hay que satisfacer es de 9,4 GWh (7,52 residencial y 1,88 comercial).

El suministro también es de nueva construcción y utiliza un sistema de energía renovable (SER) como fuente. Concretamente, el 60 % de la demanda se cubrirá mediante energía geotérmica (carga de refrigeración de diseño, DCL) y el 40 % restante mediante bombas de calor aerotérmicas. Aunque se tiene en cuenta esta división, para realizar un estudio de caso conservador, los costes considerados serán los de una central geotérmica, que son más elevados y, por lo tanto, más restrictivos.

Las principales características del suministro se presentan en la [tabla 6](#).

	Suministro
Tecnología	Geotérmica/Aerotérmica
Combustible utilizado	Electricidad
Capacidad máxima	5 MW
Costes fijos	200 000 €
Costes de capacidad	500 €/kW
Costes anuales de operación y mantenimiento	30 €/kW
Costes de suministro	1,4 c€/kWh

Tabla 6. Características de la red[39].

Topología de la red

Barrio La Pinada tiene previsto conectar toda la demanda del barrio a la red de calefacción y **refrigeración** urbana, por lo que se han incluido casi todos los edificios según lo requerido.

Los únicos que quedaron fuera del estudio de caso fueron dos situados en el extremo más meridional de la urbanización, que corresponden a un colegio. Esta decisión se debe a que esos edificios ya se han construido y, por lo tanto, no formarán parte de la futura urbanización. Se conectaron 73 edificios, lo que cubre el 100 % de la demanda propuesta y solo deja fuera al colegio.



La optimización determina que solo se necesitarían 3,3 MW de la capacidad disponible (5 MW) para cubrir la demanda del proyecto. La inversión de capital asociada, de 2,14 millones de euros, está en línea con otros proyectos de energía geotérmica.

Solución de red (Tabla 7)

Solución de tuberías		Solución de producción		Solución de demanda	
Longitud	6,76 km	Capacidad total necesaria	3,88 MWp	Demanda máxima total	6,16 MW
Coste total	1,35 M€	Producción	11,05 GWh/año	Demanda	9,2 GWh/año
Coste lineal	200 €/m	Coste de capital	2,14 M€	Ingresos	0,405 M€/año
Pérdidas	1,85 GWh/año	Costes de explotación: O&M	0,12 M€/año	-	-
Capacidad	3,88 MW	Coste de explotación: producción de calor	0,15 M€/año	-	-

Tabla 7. Solución de red del Barrio la Pinada[39] .

Análisis (Tabla 8)

El aspecto más importante a tener en cuenta al analizar los aspectos financieros del proyecto es la decisión de no considerar la rentabilidad económica como el principal motor del desarrollo. En su lugar, Barrio La Pinada tiene como objetivo proporcionar a sus habitantes una tecnología limpia e innovadora, manteniendo al mismo tiempo un precio que no resulte prohibitivo para viviendas modestas.

Para lograrlo, se ha modificado la metodología del estudio de caso. En lugar de fijar la tarifa y dejar que la herramienta decidiera qué demandas conectar para que el proyecto fuera rentable, se definió una tarifa inicial y luego se redujo hasta alcanzar el VAN positivo mínimo (considerando un horizonte temporal de 50 años y una tasa de descuento del 3 %). De este modo, se obtuvo la tarifa mínima rentable (15 €/kW + 3,4 c€/kWh), lo que explica el bajo VAN del proyecto.

	Coste de capital	Coste explotación	Ingresos explotación	VAN
Tuberías	-1,35 M€	-	-	-1,35 M€
Suministro de calefacción	-2,14 M€	-0,27 M€/año	-	-9,35 M€
Demandas	-	-	0,41 millones de euros al año	-10,74 M€



Emisiones	No se incluyen en esta fase			
Red	-3,49 millones de euros	-0,27 millones de euros al año	0,41 M€/año	0,06 M€

Tabla 8. Análisis de la red del Barrio la Pinada[39] .

5.3. Ampliación de la red DHC Bristol Redcliff [40]

Resumen

El Ayuntamiento de Bristol (fig. 33) lleva más de 10 años planificando activamente redes de calefacción para ayudar a suministrar calefacción asequible y con bajas emisiones de carbono en toda la ciudad y contribuir a su objetivo de alcanzar las cero emisiones netas de carbono para 2030.

El Ayuntamiento ha venido desarrollando inicialmente una red en el centro de la ciudad que espera ampliar en el futuro. Utilizará fuentes de calor con bajas o nulas emisiones de carbono, como el calor residual, los cursos de agua locales y las antiguas explotaciones mineras.

Este estudio de caso analiza la ampliación de la red en desarrollo, compuesta por ocho edificios nuevos, mediante la incorporación de uno o más edificios. El plan de red más amplio conectará, en última instancia, unos 60 edificios, en su mayoría ya existentes.

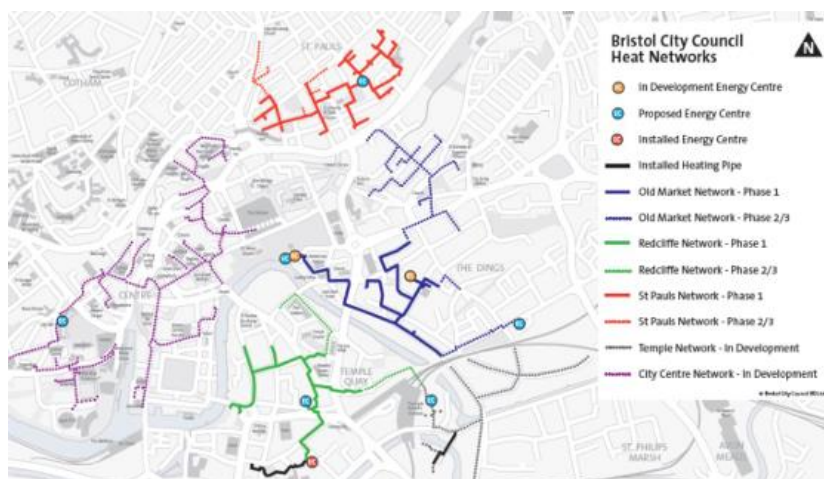


Fig. 33. Plan de la red de calefacción y refrigeración centralizada (DHC) de Bristol Redcliff[40] .

Conclusiones principales

1. Precisión del modelado con THERMOS

El diseño final de la red de calefacción, modelizado con THERMOS, se validó comparándolo con un modelo hidráulico detallado. El análisis abarcó 47 tuberías, con un total de 1 365 metros de los 5 969 metros que conforma la red completa. Los resultados mostraron que el 70 % de los segmentos de tubería coincidían exactamente en tamaño entre ambos modelos, y que el 97 % presentaban una diferencia de tamaño de no más de un calibre. Estos resultados indican que THERMOS proporciona una aproximación fiable y puede servir eficazmente como sustituto de un modelado hidráulico más detallado

2. Ampliación de la carga y evaluación de la capacidad

Para evaluar la capacidad disponible en la red, se introdujeron cargas adicionales en dos ramales. Dado que no se disponía de datos de capacidad térmica según obra, el tamaño de la tubería sirvió como parámetro de referencia principal. El método consistió en aumentar de forma incremental las cargas



de los edificios al final de las líneas de la red hasta superar el límite del tamaño de tubería existente. Este enfoque permite una estimación rápida de la capacidad disponible, lo que facilita evaluaciones rápidas para dar cabida a nuevas solicitudes de carga.

3. Dimensionamiento de las tuberías y análisis del impacto de la carga

Se analizó un tramo específico de la red con una tubería instalada de 160 mm. Los cálculos de THERMOS indicaron que, inicialmente, solo se necesitaba una tubería de 100 mm, lo que confirmaba que había capacidad suficiente para nuevas conexiones. Sin embargo, al añadir dos nuevas cargas de 1,75 MW y 2 MW, el diámetro de tubería necesario aumentó a 150 mm. Dado que el diámetro de la tubería instalada es de 160 mm, esto sugiere que el tramo se está acercando a su capacidad máxima.

4. Revisión de la capacidad del centro energético

La carga máxima diversificada en el centro energético era inicialmente de 5,05 MW. Tras añadir las cargas adicionales, la carga máxima aumentó a 7,37 MW.

5.4. DHC Parc de l'Alba [41]

Visión general y motivos de la ampliación de la red (fig. 34)

Parc de l'Alba ya gestiona una red de energía de distrito rentable y tiene como objetivo ampliarla progresivamente en consonancia con el desarrollo urbano.

Inicialmente, la atención se centra en los edificios comerciales y educativos, con la posibilidad de ampliarla a zonas residenciales.

La expansión a clientes residenciales individuales plantea retos de gestión debido al gran número de usuarios finales. La expansión se estructura en diferentes fases



Fig. 34. Expansión de la red de calefacción y refrigeración del Parc de l'Alba[41] .

Escenarios considerados



a) Escenario base (edificios que ya están incluidos en los planes de construcción y las parcelas destinadas a instalaciones públicas situadas en su trazado)

Demanda de calor: 63 GWh/año

Demanda de frío: 165 GWh/año

b) Escenario 1 (incluye, además de lo que se ha incluido en el escenario base, todas las instalaciones públicas adicionales y las parcelas residenciales)

Demanda de calefacción: 77 GWh/año

Demanda de frío: 170 GWh/año

C) Escenario 2

Este escenario incluye los mismos edificios que el Escenario Alternativo 1. En este caso, se incluirán todas las parcelas destinadas a instalaciones públicas según sea necesario, lo que obligará a su conexión a la red, mientras que los edificios residenciales seguirán siendo opcionales.

Consideraciones

Las emisiones consideradas en este estudio de caso fueron las siguientes:

CO₂ Emisiones: 0,202 kg/kWh.

Coste de las emisiones: 40 €/tCO₂.

Los costes de construcción de la red y las tarifas de venta de energía se han elaborado y validado mediante conversaciones con Parc de l'Alba. Para el estudio se han utilizado las siguientes tarifas:

Tarifa unitaria: 3,3 céntimos de euro/kWh.

Tarifa de potencia: 28 €/kWp/año.

En el cargo por capacidad, también se han incluido los costes únicos de conexión de 152 EUR/kW, que se han repartido a lo largo del horizonte temporal considerado para el proyecto.

Comparación entre el escenario base y sus dos alternativas (Tabla 9)

	Capacidad total de suministro (MW)	Edificios conectados	Demanda satisfecha (GWh/año)	Longitud total de la red (km)	Costes de capital (M€)	VAL (millones de euros)
Escenario base	60,5	82	140,88	8,9	27,42	14,95
Alternativa 1	60,5	97	140,87	10,34	28,76	13,61
Alternativa 2	60,5	102	141,43	12,89	31,01	11,50

Tabla 9. Comparación de escenarios del DHC Parc de l'Alba[41].

5.5. DHC Barcelona (España) [42]



Desarrollo modular por fases

El sistema de calefacción y refrigeración urbana (DHC) entró en funcionamiento en 2012 y sigue un plan de expansión en tres fases.

Fase 1 (2011-2012) – Infraestructura inicial

El sistema incluye una central de biomasa, calderas de gas, enfriadoras convencionales e industriales, junto con una red de distribución parcial. Da servicio a las zonas de «La Marina» y «Zona Franca», que originalmente eran zonas industriales pero que están pasando a ser desarrollos de uso mixto con nuevos proyectos residenciales.

Fase 2 (2017-2019) – Integración de la recuperación del frío excedente

El sistema aprovecha el frío excedente generado por el proceso de regasificación del GNL. Cuenta con instalaciones de almacenamiento de hielo y una red de transporte diseñada para distribuir el frío recuperado, que abastece principalmente a la zona portuaria.

Fase 3 (2017-2024) – Ampliación de la red

Su objetivo es conectar 15 millones de m² de superficie con calefacción.

Datos clave y ubicación (tabla 10)

Cuota de mercado de la calefacción urbana	N.d.
Capacidad de calefacción y refrigeración	Calefacción urbana: 23 MW (objetivo: 40 MW) DC: 14 MW (objetivo: 70 MW + 36 MW de almacenamiento en hielo)
Producción de calor y frío	Calefacción urbana: 12 GWh/año (objetivo: 59 GWh/año) CC: 7,6 GWh/año (objetivo: 54 GWh)
Km de red (doble tubería)	12 km (objetivo: 36 km)
CO ₂ de emisiones	Telecalor: 94,9 kg/MWh Centrales de calor: 0 kg/MWh (emisiones netas, compensadas con la producción de electricidad mediante cogeneración)

Tabla 10. Características de la red de calefacción y refrigeración de Barcelona[42] .

1. Expansión gradual y combinación energética adaptativa

El sistema está diseñado para un crecimiento por fases, integrando diversas fuentes de energía y estrategias operativas a lo largo del tiempo.

2. Principales instalaciones de producción y almacenamiento de energía

El sistema cuenta con una central de biomasa con una capacidad de 10 MWth y 2 MWe, alimentada con biomasa procedente de jardines y bosques de la región para proporcionar energía de carga base. Se utilizan calderas de gas para cubrir los periodos de máxima demanda. La recuperación de frío excedente captura la energía térmica procedente de la regasificación de GNL en la terminal de GNL de Enagas en Barcelona, aprovechando el frío que antes se desperdiciaba. Los depósitos de almacenamiento de frío están situados en la Zona Franca para almacenar esta energía. Un sistema de



control inteligente basado en SCADA, conectado mediante fibra óptica, permite la supervisión y optimización en tiempo real, aplicando un enfoque de red inteligente.

3. Integración de la terminal de GNL

La terminal de Enagas cuenta con una capacidad de almacenamiento de GNL de 760 000 m³ y una capacidad de emisión de 1,95 millones de m³(n)/h. El enfoque de Ecoenergías se centra en la recuperación del frío del GNL a -160 °C, lo que reduce eficazmente el desperdicio de energía. Aunque los términos contractuales aún se están negociando, se prevé que Enagas proporcione el frío excedente sin coste alguno.

Oferta y demanda en el mercado energético de Barcelona

1. Clima y demanda energética

a) Barcelona tiene un clima subtropical mediterráneo, con inviernos suaves (~1150 HDD) y una elevada demanda de refrigeración.

c) La demanda de calefacción es relativamente baja, mientras que la demanda de refrigeración sigue creciendo.

2. Fuentes de energía y consumo actuales

a) Calefacción: soluciones individuales basadas principalmente en el gas natural.

b) Refrigeración: Sistemas basados principalmente en la electricidad.

c) Integración de la energía solar térmica: En virtud de la Ordenanza sobre Energía Solar Térmica (1999), los edificios nuevos y rehabilitados deben incorporar sistemas de energía solar térmica para el agua caliente sanitaria (ACS).

d) Consumo energético:

Edificios existentes: ~80 kWh/m²/año.

Edificios nuevos: ~45 kWh/m²/año.

3. Estructura del mercado

a) Los consumidores pueden elegir libremente a sus proveedores de gas y electricidad.

b) El mercado presenta un grado moderado de concentración, con entre 5 y 6 proveedores que cubren el 90 % del suministro energético total.

Mercado y tarificación de la calefacción y refrigeración urbanas (DHC)

1. Regulación y gestión de tarifas

La calefacción y refrigeración urbanas (DHC) están reguladas por el Ayuntamiento de Barcelona a través de la empresa pública TERSA, que supervisa los contratos de concesión. Los operadores están obligados a ofrecer precios competitivos en relación con las fuentes de energía convencionales.

2. Competitividad de los precios de la DHC

Calefacción urbana (DH):

a) 42 EUR/MWh (sin IVA ni costes de conexión).

b) Aproximadamente un 10 % más barato que el gas natural (incluidos los costes de combustible, operación y mantenimiento, y equipamiento).



- c) Refrigeración urbana (DC): 38 EUR/MWh, entre un 5 % y un 12 % más barato que la electricidad.
- d) Consumidores industriales (modelo B2B): precios negociados caso por caso.

3. Demostración de la competitividad: caso práctico de Mercabarna

- a) Campaña de medición de electricidad a gran escala llevada a cabo por Ecoenergies.
- b) Se ha identificado la posibilidad de sustituir 32 GWh/año de demanda eléctrica por refrigeración urbana.
- c) Ahorro estimado:
- d) Reducción del 20 % en los costes de electricidad.
- e) Reducción de las emisiones de 8 730 tCO₂.

5.6. [DHC del Gran Estocolmo \[43\]](#)

Visión general de la red de calefacción urbana (DHN)

La calefacción urbana (DH) como estrategia clave para la descarbonización: Suecia tiene como objetivo alcanzar la neutralidad en carbono para 2045 y considera que la calefacción urbana es un factor clave para lograrlo. El país ha pasado de depender por completo de los combustibles fósiles —principalmente el petróleo— en la década de 1970 a un 6 % en la actualidad, principalmente gas natural. Esta transición energética se vio impulsada inicialmente por la crisis del petróleo de la década de 1970, que propició el abandono de los combustibles fósiles, y se ha acelerado recientemente con una mayor adopción de fuentes de energía sostenibles.

Fuentes de energía actuales en la calefacción urbana

- 1. Biomasa (principalmente a través de plantas de cogeneración).
- 2. Valorización energética de residuos.
- 3. Recuperación de calor residual.
- 4. Electricidad renovable (mediante bombas de calor y calderas eléctricas).

Impacto en las emisiones de CO₂ ([fig. 35](#))

- 1. La evolución de la combinación de combustibles entre 2003 y 2013 muestra una reducción significativa de las emisiones de CO₂.
- 2. La calefacción urbana ha sido fundamental para la descarbonización del suministro de calor en Suecia.

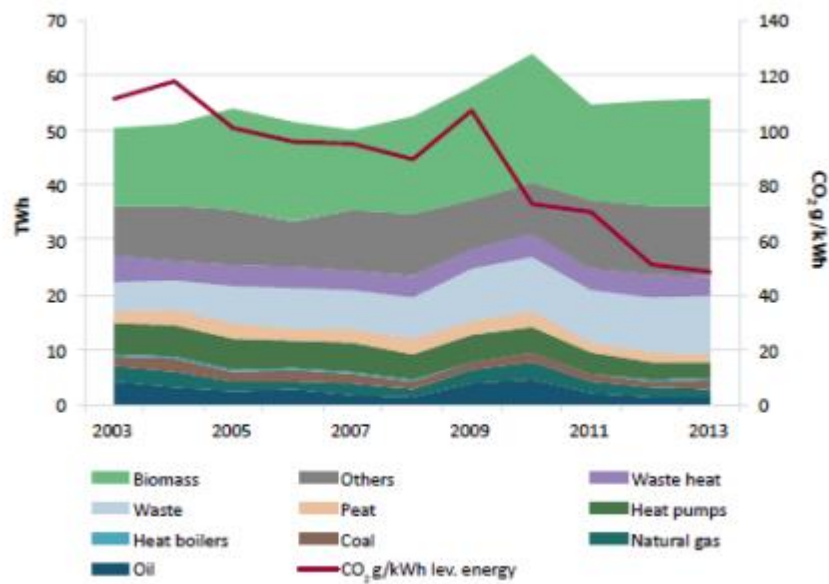


Fig. 35. Evolución de la combinación de combustibles entre 2003 y 2013 en la red de calefacción y refrigeración de Estocolmo[43] .

La refrigeración urbana (DC) en Suecia ha experimentado una rápida expansión (Fig. 36), creciendo a una tasa anual aproximada del 20 % desde la creación de la primera red de refrigeración urbana en Västerås en 1992, con un aumento significativo del suministro a partir de entonces. Entre los principales factores que impulsan este crecimiento se encuentran el aumento de la demanda de refrigeración, impulsado por unos estándares de confort más elevados, y el potencial de ahorro de costes que atrae a grandes consumidores, como edificios de oficinas, centros de datos y supermercados. Muchas redes de refrigeración urbana aprovechan la refrigeración libre utilizando fuentes de frío naturales, como el agua de mar y los lagos, lo que reduce el consumo de energía y mejora la eficiencia del sistema. Los principales clientes son, sobre todo, oficinas, centros de datos y supermercados. Se espera que esta tendencia al alza continúe a medida que aumenten tanto la demanda como los objetivos de sostenibilidad.

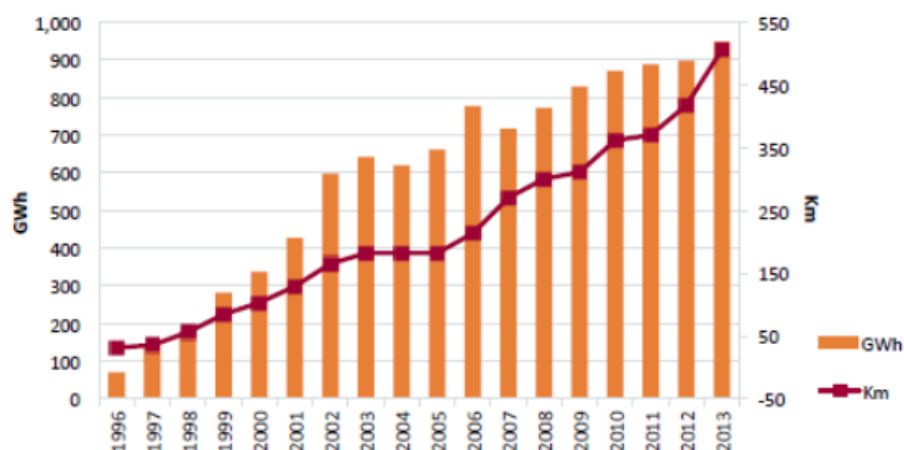


Fig. 36. Evolución del consumo energético y del crecimiento de la red a lo largo de los años en DHC Estocolmo[43] .

Datos clave



1. Sistema de gran envergadura: una media de 8 TWh/año, unos 10 000 clientes, suministro directo a 6 municipios
2. Asociación público-privada: el sistema de calefacción urbana es propiedad de Fortum Värme AB, que también se encarga de su gestión (50 % Ayuntamiento de Estocolmo, 50 % Fortum Heat & Power)
3. Producción de calefacción urbana flexible y optimizada:
 - a) 7 centrales de cogeneración (alimentadas con biocombustibles, residuos o combustibles fósiles)
 - b) Bombas de calor
 - c) Calderas eléctricas
 - d) Varias calderas de agua caliente (alimentadas con bioaceites o combustibles fósiles)
4. Refrigeración urbana: un sistema principal en el centro de la ciudad y varios más pequeños en los alrededores.
5. Más del 50 % de la producción se obtiene mediante refrigeración libre procedente del mar y otras masas de agua

La [tabla 11](#) muestra las características de las redes

Cuota de mercado de la calefacción urbana	80 % (área cubierta por la calefacción urbana)
Capacidad de calefacción y refrigeración	Calefacción y refrigeración: 3600 MW Calefacción centralizada: 220 MW
Producción de calor y frío	Calefacción urbana: 7,4-10,8 TWh/año DC: 380-440 GWh/año
Km de red (doble tubería)	DH: 1 330 km Frescor: 200 km
CO ₂ Emisiones	DH: 0,136 kg/MWh DC: 0 kg/MWh (electricidad renovable certificada)

Tabla 11. Características del sistema de calefacción y refrigeración de Estocolmo[43] .

5.7. [Recuperación de energía frigorífica de la vaporización del gas natural licuado en la red DCN \[44\]](#)

Antecedentes

Los edificios representan aproximadamente el 40 % del consumo energético mundial, y la demanda de refrigeración aumenta de forma constante. Se prevé que la demanda mundial de refrigeración residencial aumente drásticamente, pasando de 300 TWh en 2000 a 4.000 TWh en 2050, hasta alcanzar los 10.000 TWh en 2100. A diferencia de la demanda de calefacción, la demanda de refrigeración es más difícil de predecir debido a su sensibilidad a factores como la radiación solar, las entradas de calor internas y los efectos de isla de calor urbano.

Sistemas de refrigeración urbana (DCS)

Los sistemas de refrigeración urbana (DCS) ofrecen una solución de refrigeración centralizada que da servicio a múltiples edificios ([fig. 37](#)). Constan de componentes clave, entre los que se incluyen la unidad de generación, la red de distribución, los clientes y el sistema de disipación de calor. Los DCS están reconocidos como la mejor tecnología disponible (MTD) en la Unión Europea.

Energía frigorífica residual del GNL



La regasificación del GNL libera una cantidad significativa de energía frigorífica —aproximadamente 1 245 MWh al año en Italia— procedente de las estaciones de L-GNC, lo que ofrece un potencial de refrigeración gratuita capaz de reducir la demanda eléctrica en los sistemas de aire acondicionado. Sin embargo, no se han realizado estudios previos que exploren la integración de los sistemas de refrigeración urbana (DCS) con la recuperación de energía frigorífica del L-GNC.

Estudio de caso

Potencial de energía fría (Fig. 38)

1. Consumo anual de GNL en estaciones de L-CNG: 5 400 t/año
2. Energía frigorífica desperdiciada durante la regasificación: 830 kJ/kg de GNL
3. Energía frigorífica recuperable:

~380 kWh/día (si se opera 365 días al año)

~550 kWh/día (si se excluyen los fines de semana, 253 días al año)

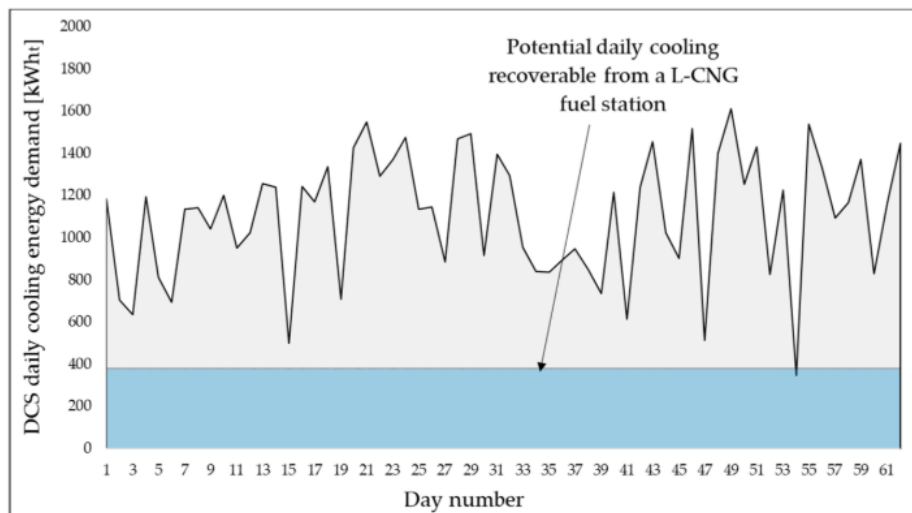


Fig. 37. Potencial diario de refrigeración recuperable de una estación de servicio de L-GNC para el sistema DCS[44] .

Perfiles de potencia de refrigeración

P1: Suministro constante (10 h/día, 365 días/año).

P2: Suministro constante (excepto fines de semana y pausas para comer).

P3: Perfil variable con pico entre las 18:00 y las 19:00 horas.

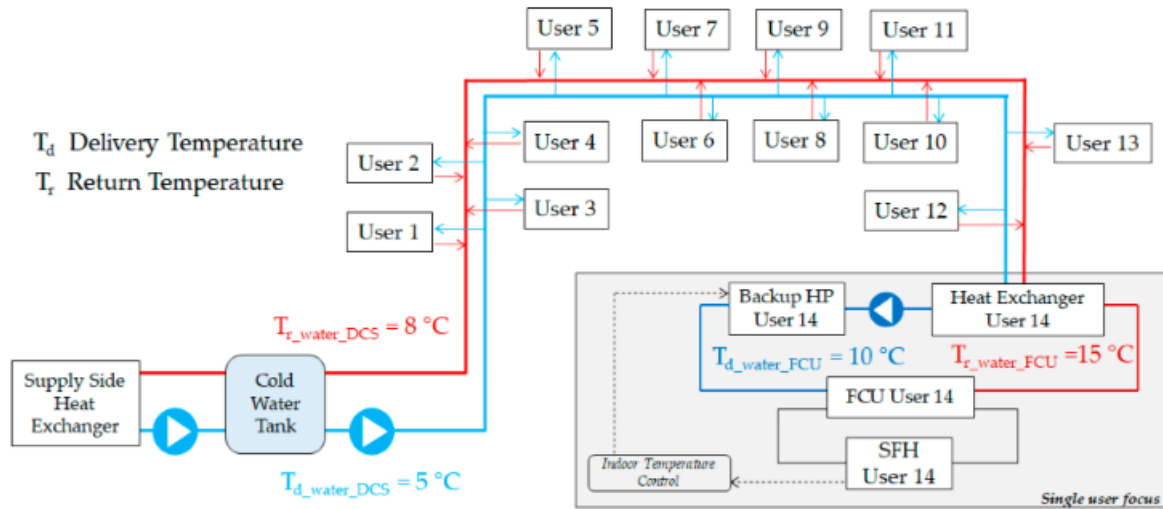


Fig. 38. Esquema del DCS para el GNL[44] .

Resultados de la simulación

Demanda del sistema de refrigeración urbana (fig. 39)

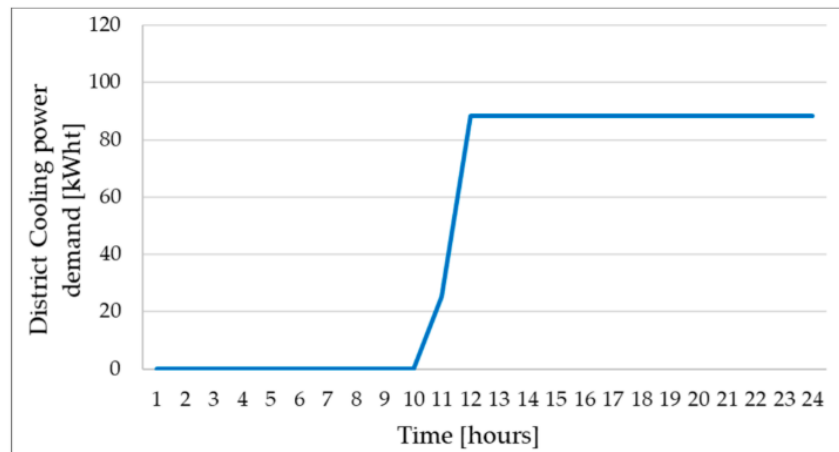


Fig. 39. Demanda del sistema de refrigeración urbana a partir de GNL[44] .

Consumo de energía (Fig. 40)

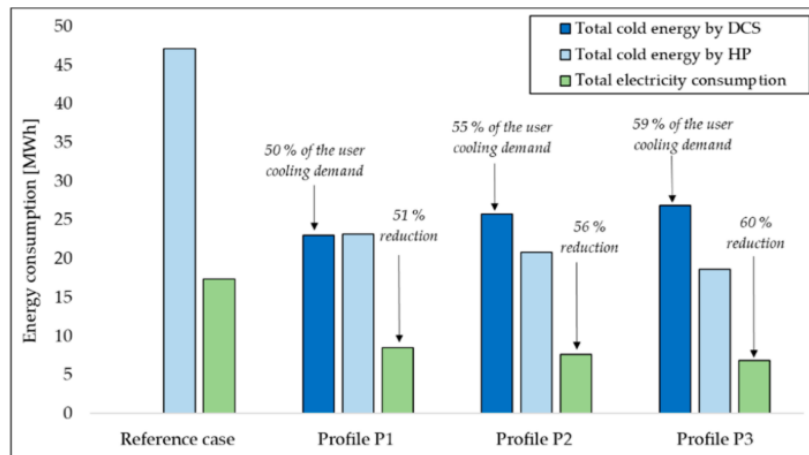


Fig. 40. Consumo de energía [44].

Caso de referencia

1. Sistemas de refrigeración independientes: unidades fan coil alimentadas por una bomba de calor
2. Demanda de refrigeración (julio-agosto): 47 MWht
3. Consumo de electricidad: 17 MWh

Análisis de la potencia de refrigeración libre

DCS conectado directamente al intercambiador de calor (sin TES):

P1 (suministro constante): se cubre el 50 % de la demanda de refrigeración, ahorro de electricidad del 52 %

P2 (ajuste entre semana): ahorro de electricidad del 58 %

P3 (suministro variable): Menor eficiencia debido al desajuste entre la demanda y el suministro

Impacto del almacenamiento de energía térmica (TES)

Introducción de un depósito de 60 m³:

Caso P3: se cubre el 59 % de la demanda de refrigeración, ahorro de electricidad del 60 %

Casos P1 y P2: impacto mínimo debido al suministro regular

Permite un mejor equilibrio entre la demanda y la oferta

Consideraciones sobre el dimensionamiento del TES

1. Rango óptimo: 30–90 m³
2. Depósitos más pequeños: inercia térmica insuficiente
3. Depósitos más grandes: mayores pérdidas de calor y respuesta más lenta del sistema

Conclusiones

Los sistemas de refrigeración urbana (DCS) ofrecen importantes ventajas, entre las que se incluyen un suministro de energía frigorífica a bajo coste con menores emisiones de CO₂, la integración con energías renovables, la trigeneración y el almacenamiento térmico, así como la recuperación eficiente de la energía frigorífica residual, como la procedente de las estaciones de repostaje de GNC-L. Un



estudio de caso demostró que una estación de GNL-GNC que suministraba refrigeración a un barrio residencial logró un ahorro de electricidad de hasta el 60 % utilizando un perfil de carga P3 combinado con un almacenamiento de energía térmica de 60 m³, con un ahorro general superior al 50 % en todos los escenarios. Sin embargo, los resultados dependen de las hipótesis sobre la disponibilidad de la energía del vaporizador de GNL, lo que indica la necesidad de realizar más estudios sobre el dimensionamiento óptimo de los DCS y las estrategias de conexión de los usuarios. En general, la vaporización de GNL presenta un gran potencial para abastecer de forma eficaz la refrigeración urbana residencial, y la integración de los sistemas de transporte y de refrigeración residencial puede mejorar la sostenibilidad urbana.

5.8. Red de refrigeración urbana de Estocolmo [45]

Resumen (Tabla 12)

Un estudio preliminar señaló la posibilidad de utilizar una planta de bombas de calor existente que utiliza agua de mar como recurso para la producción simultánea de calor y refrigeración para la red de refrigeración urbana de la ciudad de Estocolmo.

La ciudad de Estocolmo está formada por diversos inmuebles destinados a diferentes fines, como oficinas y centros comerciales. La demanda de refrigeración de la ciudad es elevada y va en aumento debido al incremento del comercio, a unos requisitos de confort más exigentes y a la informatización. La ciudad de Estocolmo fue la primera zona en ofrecer refrigeración urbana respetuosa con el medio ambiente, producida mediante bombas de calor y refrigeración libre a partir del agua de mar fría. Los datos clave se recogen en la Tabla 13.

	kW/contrato	MWh/contrato	Número de contratos
Edificios públicos	300	300	35
Hospitales	1000	1500	5
Universidades y centros educativos	2000	3000	5
Centros de negocios	1500	1500	15
Industria y productos farmacéuticos	500	500	10
Oficinas	500	500	330

Tabla 12. Características de la red DCN de la ciudad de Estocolmo[45] .

Datos clave

Potencia instalada	170 MW
Energía	240 GWh/año
Red eléctrica	8,6 km
Red de distribución	12 km
Presión de funcionamiento	10 bar



Temperatura de alimentación	+6 °C
Temperatura de retorno	+16 °C
Número de clientes	300

Tabla 13. Datos clave de la red de calefacción urbana de Estocolmo[45] .

Distribución

La refrigeración urbana se transporta a la zona de la ciudad a través de una red principal de 8,6 km de longitud y 800 mm de diámetro. La red principal está instalada en túneles de tuberías ya existentes y bajo tierra. En la zona de la ciudad se ha establecido una red de distribución con una longitud total de 12 km. La red de distribución también está instalada en túneles y bajo tierra.

Principales conclusiones

El sistema de refrigeración urbana de Estocolmo se puso en marcha en 1995 con una planta de refrigeración de 60 MW situada junto a una bomba de calor ya existente en Värtan. El sistema combina la refrigeración natural y la recuperación de calor, lo que le confiere un excelente rendimiento medioambiental y económico. En 1998 se introdujo un sistema de almacenamiento de energía en acuíferos, alimentado principalmente con agua de mar fría, que proporciona 25 MW durante los periodos de máxima demanda. En el año 2000 se añadió una nueva central de excedentes de energía de 50 MW con recuperación de calor, que da respuesta tanto a las necesidades de calefacción urbana como a las de refrigeración en los picos de verano. La red de distribución se diseñó y construyó cuidadosamente utilizando métodos especializados para minimizar las molestias al tráfico rodado.

5.9. DCN combinado con electrolizadores de hidrógeno [46]

Resumen

En este estudio de caso, un distrito con una red de calefacción y refrigeración urbana se abastece parcialmente mediante tecnologías de hidrógeno. Se planifica el suministro energético para un distrito ejemplar con seis edificios (el centro energético se encuentra en el edificio A) (fig. 41). Se supone que el distrito está situado en Berlín (Alemania), con un perfil de demanda representado en la tabla 14.

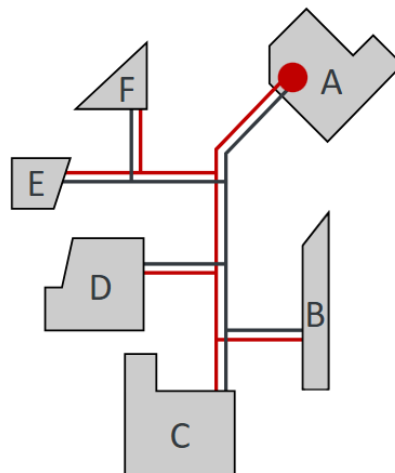


Fig. 41. Red de calefacción y refrigeración de distrito con electrolizadores de hidrógeno, Alemania[46]

Perfil de demanda



Edificio	Uso	Superficie construida (m ²)	Calefacción de espacios (MWh)	Agua caliente sanitaria (MWh)	Refrigeración de espacios (MWh)	Electricidad (MWh)
A	hotel	20 000	1 700	640	980	3 000
B	Oficina	18 000	1 170	144	1062	936
C	Venta al por menor	24 500	1593	74	784	2352
D	Museo	16 500	1073	83	578	859
E	Teatro	6 700	503	40	101	563
F	Restaurante	2 500	188	125	50	358

Tabla 14. Características de la red de distribución de corriente continua (DCN) para cada edificio (caso de los electrolizadores de hidrógeno)[46] .

La fig. 42 muestra la demanda de calor y la fig. 43, la demanda de electricidad

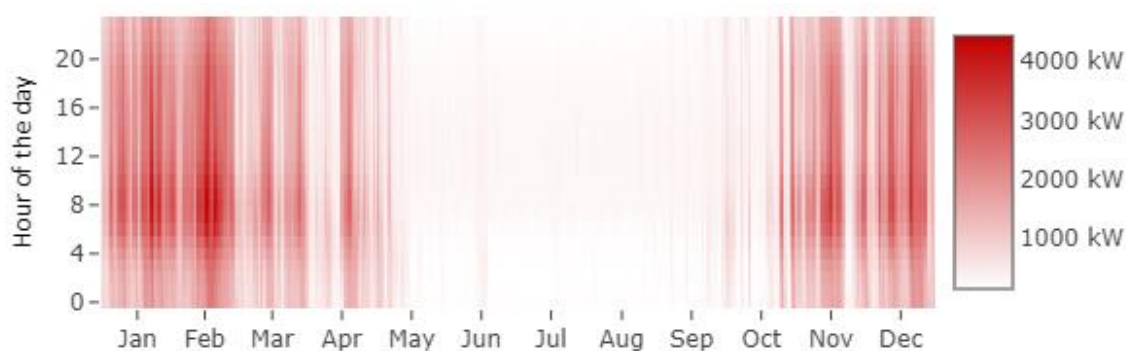


Fig. 42. Demanda de calor (caso de los electrolizadores de hidrógeno)[46] .

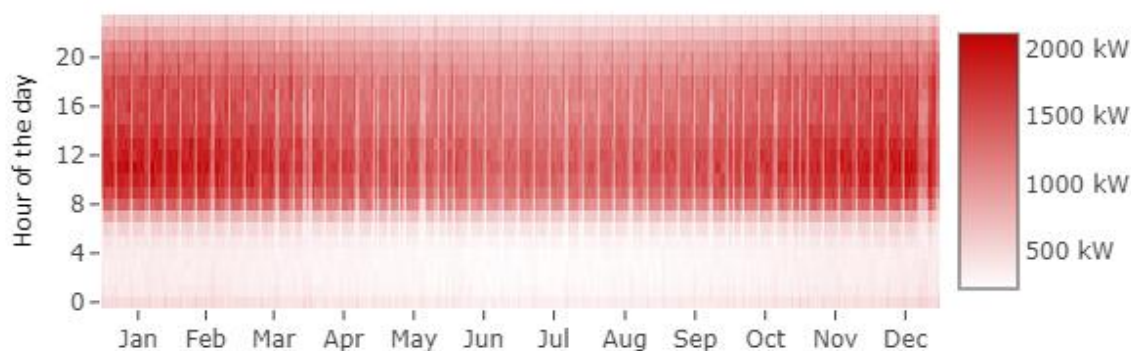


Fig. 43. Demanda de electricidad (caso de los electrolizadores de hidrógeno)[46] .

Diseño del centro energético

1. Las tecnologías de hidrógeno dan soporte a la calefacción y la refrigeración del distrito, con una conexión de 3 MW a una red de calefacción urbana ya existente.
2. Un electrolizador utiliza el excedente de electricidad fotovoltaica para producir hidrógeno, que se inyecta en la red de gas natural, recuperándose el calor residual para la calefacción urbana (fig. 44).



3. Los Enfriadoras de compresión proporcionan la refrigeración, y la capacidad óptima del sistema fotovoltaico es de 58 800 m², lo que cubre el 62 % de las necesidades eléctricas del distrito (fig. 45).
4. El 92,1 % del suministro de calor procede de la red de calefacción urbana, mientras que el 7,9 % se cubre con el calor residual de la electrólisis.
5. Las emisiones de CO₂ del distrito ascienden a 4 370 toneladas métricas al año.

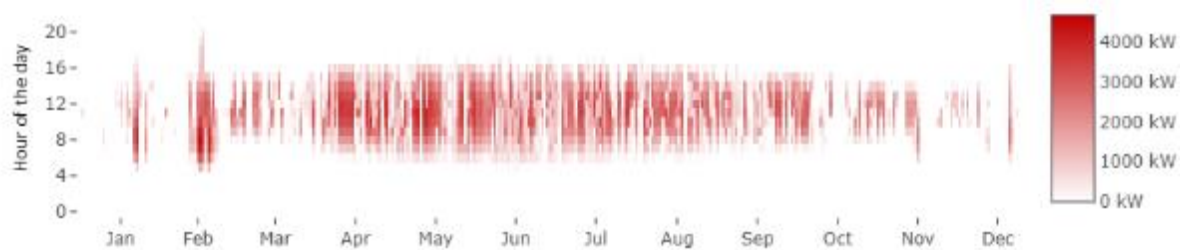


Fig. 44. Suministro de hidrógeno (caso de electrolizadores de hidrógeno)[46] .

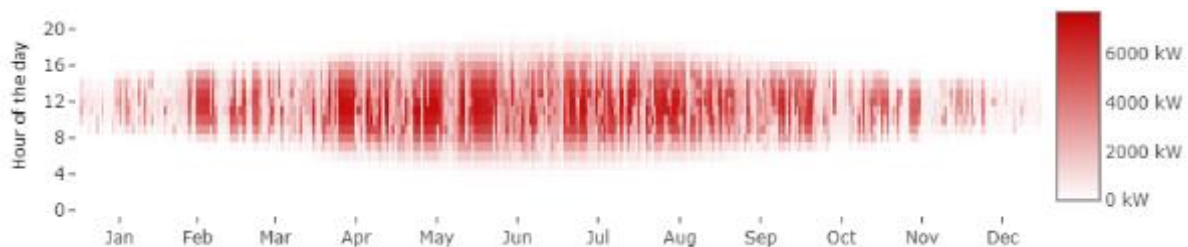


Fig. 45. Generación de electricidad fotovoltaica (caso de los electrolizadores de hidrógeno)[46] .

5.10. DCN para complejos hoteleros [47]

Antecedentes

Este proyecto de energía de distrito en Punta Cana, República Dominicana, goza de un amplio reconocimiento, especialmente en la zona turística del este. BROAD suministró ocho Enfriadoras de agua caliente de una sola etapa que aprovechan el calor residual de los generadores Wartsila de una central eléctrica de fuelóleo pesado. El sistema proporciona 19 MW de refrigeración mediante la transferencia de agua caliente a presión a 120 °C a lo largo de una distancia de 4 km hasta las unidades de aire acondicionado que dan servicio a cinco hoteles. La refrigeración continua es esencial debido al clima tropical, que además exige estrictos estándares de rendimiento y estabilidad. El éxito del proyecto ha merecido el reconocimiento de la CEPM y ha despertado el interés de empresas energéticas de EE. UU. y Latinoamérica, lo que ha abierto nuevas oportunidades de colaboración.

Concepto de diseño del sistema (fig. 46)

1. El sistema suministra 17,58 MW de agua refrigerada y agua caliente sanitaria (ACS) a los hoteles cercanos.
2. El calor residual de los gases de escape del motor diésel y del agua de refrigeración (6 MWe cada uno) se utiliza para calefacción y refrigeración.
3. En la central eléctrica se produce agua caliente de alta temperatura (HTHW) a 248 °F (120 °C), que se envía a los hoteles para accionar Enfriadoras de absorción de una sola etapa.
4. Tras el enfriamiento, el agua caliente a alta temperatura a 158 °F (70 °C) se utiliza posteriormente para generar agua caliente sanitaria antes de volver a la central eléctrica.
5. Una caída de temperatura de 50 °C optimiza el aprovechamiento del calor, lo que permite que un único circuito cubra tanto las necesidades de refrigeración como las de agua caliente sanitaria.

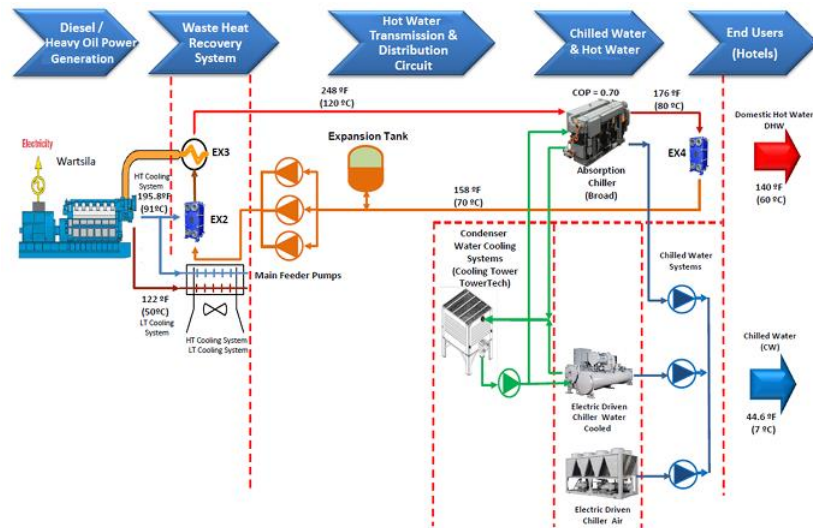


Fig. 46. Concepto de diseño del sistema para los complejos hoteleros de DCN[47] .

Aspectos económicos y medioambientales

1. Reducción del 25 % en el consumo de energía eléctrica en los complejos turísticos en comparación con los métodos de refrigeración tradicionales.
2. Anteriormente, el 34 % de la factura eléctrica de los complejos turísticos correspondía a la refrigeración, pero la cogeneración redujo la dependencia de la red eléctrica.
3. El proyecto eliminó la necesidad de calderas de agua caliente sanitaria, reduciendo el consumo de combustible a cero.
4. La energía residual se reutilizó de manera eficiente, cubriendo tanto las necesidades de refrigeración como las de agua caliente sanitaria, lo que benefició tanto a los complejos turísticos como a las empresas de servicios públicos.
5. Se recuperó el 25 % de la energía térmica, lo que redujo el consumo de combustible en 35 740 barriles de fuelóleo pesado y 32 881 barriles de GLP al año.
6. Las emisiones de CO₂ se redujeron en más de 28 872 toneladas métricas al año, lo que pone de manifiesto importantes beneficios medioambientales.

Este proyecto representa la solución energética más innovadora del Caribe, ya que aprovecha eficazmente la energía térmica residual y el uso en cascada de la energía. Los hoteles se benefician de una reducción de los costes operativos, una mayor competitividad y un consumo energético más sostenible. Al optimizar el aprovechamiento de la energía térmica, el sistema libera capacidad eléctrica para dar soporte a futuros desarrollos y nuevas instalaciones. En general, el proyecto contribuye al crecimiento económico regional al tiempo que promueve la sostenibilidad a largo plazo.

5.11. Conclusiones

La tabla 15 muestra los factores clave de éxito externos de la DCN basados en los estudios de caso, y la tabla 16 los factores clave de éxito internos.

Factores clave de éxito (externos)	Descripción
Política nacional y marco normativo adecuados	La política energética nacional y el marco normativo proporcionan una base adecuada e



	incentivos para el desarrollo de los sistemas de calefacción y refrigeración centralizados
Apoyo financiero directo o indirecto	Los proyectos de DHC se benefician de las subvenciones directas e indirectas existentes
Políticas locales específicas y coherencia con la planificación urbana	Las autoridades locales promueven la calefacción y el agua caliente combinadas (DHC) como parte de su estrategia de suministro energético y climática, e integran la planificación de la calefacción en sus proyectos de desarrollo urbano
Alineación de intereses / Madurez de la cooperación	Las autoridades públicas a nivel nacional y local, los organismos reguladores, los usuarios finales, la empresa de DHC y otros actores locales cooperan de manera eficiente para lograr un servicio de buena calidad y un suministro de calefacción y refrigeración sostenible y rentable

Tabla 15. Factores clave externos de éxito de la red de calefacción y refrigeración distribuida (DCN) .

Factores clave de éxito (internos)	Descripción
Disponibilidad y relevancia de los recursos locales	El sistema de calefacción y refrigeración centralizados (DHC) depende en gran medida de los recursos locales disponibles, como las fuentes de energía renovables
Desarrollo integral del proyecto	El sistema de calefacción y refrigeración centralizada (DHC) se concibió, desarrolló y puso en marcha siguiendo un enfoque integral y coherente, con el objetivo de lograr un suministro de calefacción y refrigeración de alta calidad, rentable y sostenible.
Competitividad de precios frente a soluciones energéticas alternativas	Los precios de la red de calefacción y refrigeración son competitivos frente a las soluciones energéticas alternativas disponibles en el mercado. Esta competitividad de precios puede potenciarse mediante un diseño optimizado del sistema, a través de procedimientos de licitación o permitiendo la competencia entre diferentes soluciones de suministro de calefacción y refrigeración.
Producción flexible de calor y frío	Una producción flexible permite una mayor rentabilidad, principalmente mediante una optimización dinámica del suministro. Esto puede lograrse mediante una combinación energética diversificada y complementaria, el uso de la cogeneración y la mejora de las prácticas de aceleración y ciclado, la conexión de



	los mercados de la electricidad y la calefacción, etc.
Combinación de innovación técnica y no técnica	El sistema DHC integra y potencia la innovación a todos los niveles: desde el uso de tecnologías de vanguardia hasta nuevos modos de gobernanza, manteniendo un enfoque a largo plazo a la hora de tomar decisiones estratégicas.

Tabla 16. Factores clave internos de éxito de la DCN .

Referencias

- [1] Marina, A., Bak-Jensen, B., Schaltz, E. y Floristeanu, D. (2021). Tecnologías de bombas de calor para aplicaciones industriales. *Energy*, 231, artículo 120822. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120822>
- [2] Euroheat & Power. (2023). Calefacción y refrigeración urbanas: una clave para la transición energética. <https://www.euroheat.org/knowledge-hub.html>
- [3] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. y Bailey, M. B. (2018). *Fundamentos de termodinámica de ingeniería* (9.ª ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Engineering+Thermodynamics%2C+9th+Edition-p-9781119391388>
- [4] Shin, M. S., Jang, D. S., Jung, D. y Kim, Y. (2019). *Análisis de energía y exergía de un sistema de bomba de calor con recuperación de calor residual para aplicaciones industriales*. *Applied Thermal Engineering*, 151, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.096>
- [5] Mateu-Royo, J., Arpagaus, C., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J. y Bless, F. (2020). *Estrategia avanzada para integrar bombas de calor de alta temperatura en sistemas de refrigeración con CO₂ transcrito*. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116154. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116154>
- [6] El Samad, T., Żabnieńska-Góra, A., Jouhara, H. y Sayma, A. I. (2024). *Una revisión de los compresores para bombas de calor de alta temperatura*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 51, 102603. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603>
- [7] Geotrainer. (2013). *Sistemas geotérmicos superficiales: el plan de estudios europeo como base para la empresa y la educación*. <https://geotrainer.eu/>
- [8] Mateu-Royo, J., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Molés, F. y Amat-Albuixech, M. (2021). *Optimización multiobjetivo de una bomba de calor de alta temperatura (HTHP) para la recuperación de calor residual industrial*. *Energy Conversion and Management*, 245, 114540. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114540>
- [9] Stanford, H. W. (2020). *Análisis y diseño de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado* (2.ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429451157>
- [10] Kiron Hydraulic Needs. (2024). *Soluciones hidráulicas y componentes industriales para sistemas de alta presión*. <https://kironhydraulic.com/>
- [11] Alpine Intel. (13 de julio de 2019). *Diagrama de un enfriador refrigerado por agua*. <https://www.alpineintel.com/resources/chiller-basics-water-cooled-vs-air-cooled/>



- [12] Comité Europeo de Normalización. (2022). *Aparatos de aire acondicionado, unidades de refrigeración de líquidos y bombas de calor, con compresores accionados eléctricamente, para calefacción y refrigeración de espacios, refrigeración comercial y de procesos: ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional* (EN 14825:2022). <https://www.en-standard.eu/une-en-14825-2022-aparatos-de-aire-acondicionado-unidades-de-refrigeración-de-líquidos-y-bombas-de-calor-con-compresores-accionados-eléctricamente-para-la-climatización-de-espacios-y-la-refrigeración-comercial-y-de-procesos-ensayos-y-clasificación-en-condiciones-de-carga-parcial-y-cálculo-del-rendimiento-estacional/>
- [13] Wang, J., Wang, R. Z. y Zhai, X. Q. (2024). *Avances en las tecnologías de refrigeración por absorción y bombas de calor para el aprovechamiento de energía térmica de baja temperatura*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192, 114210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114210>
- [14] Instituto Indio de Tecnología de Kharagpur. (2024). *Comparación entre los sistemas de refrigeración por compresión de vapor y por absorción*. NPTEL - Ingeniería Mecánica. <https://www.iitkgp.ac.in/>
- [15] Dincer, I., y Rosen, M. A. (2021). *Almacenamiento de energía térmica: sistemas y aplicaciones* (3.^a ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Energy+Storage%3A+Systems+and+Applications%2C+3rd+Edition-p-9781119713098>
- [16] ASHRAE. (2013). *Manual de ASHRAE: Fundamentos* (ed. I-P). Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- [17] Kiron Hydraulic Needs. (2024). *Funcionamiento de una central energética: Ciclos de carga de los depósitos diurnos y nocturnos en sistemas de almacenamiento de energía térmica en masa*. <https://kironhydraulic.com/>
- [18] Turgut, M. S. y Turgut, E. T. (2019). *Diseño térmico y optimización de un sistema de bomba de calor mediante un nuevo algoritmo*. International Journal of Refrigeration, 106, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.027>
- [19] Alpine Intel. (23 de junio de 2022). *La evolución de los refrigerantes: pasado, presente y futuro*. <https://www.alpineintel.com/resources/the-evolution-of-refrigerants-past-present-and-future/>
- [20] Instituto Internacional de Refrigeración. (2019). *El papel de la refrigeración en la economía mundial*. <https://iifiir.org/en/resources/notes-informatives/the-role-of-refrigeration-in-the-global-economy>
- [21] Kuo, C. P. y Chien, C. H. (2021). *Análisis del efecto del deslizamiento de temperatura en el rendimiento de los sistemas de bomba de calor que utilizan mezclas de refrigerantes zeotrópicos*. Energies, 14(11), 3124. <https://doi.org/10.3390/en14113124>
- [22] Universidad Técnica de Dinamarca (DTU). (2024). *Departamento de Ingeniería Energética: Investigación e innovación en sistemas de energía térmica y bombas de calor*. <https://www.energy.dtu.dk/>
- [23] Bitzer. (2024). *Informe sobre refrigerantes 21*. Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH. https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-501-21.pdf



- [24] ASHRAE. (2022). *Norma ANSI/ASHRAE 34-2022: Designación y clasificación de seguridad de los refrigerantes*. Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-34>
- [25] Instituto Internacional de Refrigeración (IIR). (2024). *Directrices sobre el rendimiento climático a lo largo del ciclo de vida*. <https://iifiir.org/en/resources/scientific-and-technical-publications/guidelines>
- [26] Programa de Colaboración Tecnológica de la AIE sobre Tecnologías de Bombas de Calor (HPT). (2024). *Potencial de calentamiento global (GWP) de los refrigerantes: una comparación entre horizontes temporales de 100 y 20 años*. <https://heatpumpingtechnologies.org/>
- [27] GlobalSpec. (2024). *Cálculo y análisis del impacto equivalente total de calentamiento (TEWI) para refrigerantes modernos*. Engineering360. <https://www.globalspec.com/>
- [28] Höges, C., Müller, D. y Bardow, A. (2023). *Evaluación del ciclo de vida de los refrigerantes: una comparación exhaustiva de los impactos medioambientales más allá del calentamiento global*. International Journal of Refrigeration, 149, 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.018>
- [29] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2016). *La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal: reducción gradual de los HFC*. <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016>
- [30] Comisión Europea. (2014). *Reglamento (UE) n.º 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los gases fluorados de efecto invernadero*. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517>
- [31] Lelieveld, J., y Pöschl, U. (2022). *La Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal: un paso crucial para mitigar el cambio climático derivado de las emisiones de HFC*. Environmental Research Letters. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac88f2>
- [32] Unión Europea. (16 de abril de 2014). *Reglamento (UE) n.º 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de abril de 2014, sobre los gases fluorados de efecto invernadero y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.º 842/2006*. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517>
- [33] Unión Europea. (7 de febrero de 2024). *Reglamento (UE) n.º 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2024, relativo a los gases de efecto invernadero fluorados, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937 y se deroga el Reglamento (UE) n.º 517/2014*. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R0573>
- [34] Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B. y Papst, I. (2021). *Productos de degradación persistentes de refrigerantes y agentes espumantes halogenados en el medio ambiente: tipo, concentraciones ambientales y destino, con especial atención a los nuevos sustitutos halogenados con bajo potencial de calentamiento global*. Agencia Federal Alemana de Medio Ambiente (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/persistent-degradation-products-of-halogenated>
- [35] Agencia Noruega de Medio Ambiente. (2023). *Propuesta de restricción de los PFAS: informe de restricción del anexo XV*. <https://www.miljodirektoratet.no/en/publications/2023/february-2023/pfas-restriction-proposal/>



- [36] Alajmi, A. F. y Zedan, A. (2020). *Análisis del almacenamiento de energía térmica para una planta de refrigeración urbana: estudio de caso de una aplicación a gran escala*. Energy and Buildings, 224, 110258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110258>
- [37] Strategy&. (2014). *Refrigeración urbana: una solución energética climáticamente inteligente para el CCG*. PwC. <https://www.strategyand.pwc.com/me/en/reports/district-cooling.html>
- [38] Universidad James Cook (JCU). (2026). *Red de refrigeración urbana y almacenamiento de energía térmica: estudio de caso de la iniciativa de sostenibilidad del campus de Townsville*. <https://www.jcu.edu.au/>
- [39] Zubi Labs. (2021). *Barrio La Pinada: Plan director y estrategia de sostenibilidad para un eco-barrio sostenible en Paterna*. <https://www.barriolapinada.es/>
- [40] Bristol City Leap. (2024). *Red de calefacción de Bristol: ampliación de Redcliff y transición hacia una calefacción urbana con bajas emisiones de carbono*. <https://www.bristolcityleap.co.uk/>
- [41] ST3 (Societat de Tractament de Trànsit Tèrmic). (2024). *Calefacción y refrigeración urbanas del Parc de l'Alba: poligeneración y almacenamiento de energía térmica para el área del Sincrotrón ALBA*. <https://www.st3.cat/>
- [42] Districlima. (2024). *La red de calefacción y refrigeración urbana de Barcelona: eficiencia energética e integración de la valorización energética de residuos en las zonas del 22@ y del Fòrum*. <https://www.districtlima.com/>
- [43] Stockholm Exergi. (2024). *Calefacción y refrigeración urbanas en el área metropolitana de Estocolmo: refrigeración con agua de aguas profundas e integración de bombas de calor a gran escala*. <https://www.stockholmexergi.se/>
- [44] Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S. y Duan, F. (2017). *Recuperación de energía frigorífica del proceso de regasificación del gas natural licuado (GNL): una revisión*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 1171-1188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.006>
- [45] Stockholm Exergi. (2023). *Refrigeración urbana: el alma fría del sistema energético de Estocolmo*. <https://www.stockholmexergi.se/en/district-cooling/>
- [46] nPro. (2024). *Simulación y diseño de redes de energía: topología de red para sistemas de calefacción y refrigeración*. <https://www.npro.energy/>
- [47] Corporación Financiera Internacional. (2021). *Creación de mercados en la República Dominicana: refrigeración urbana para un sector turístico sostenible*. Grupo del Banco Mundial. <https://www.ifc.org/en/insights-reports/2021/dominican-republic-country-private-sector-diagnostic>