

Módulo 3

Producción de calor

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:
Fecha: junio de 2026
<https://www.shakeproject-dhc.eu/>

1.1



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

Instituciones participantes

Universidad Jaume I de Castellón, España
Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, Hungría

Autores y colaboradores

Ghad Alarnaout-Alarnaout, Dr. Adrián Mota-Babiloni (Universidad Jaume I de Castellón)
Balázs Bokor (Universidad de Tecnología y Economía de Budapest)

Editores

Eva Szalma

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 y Universidad de Tecnología y Economía de Budapest. Módulo 3: Producción de calor. Proyecto SHaKE, 2026.

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



Guía de uso del Módulo 3

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 3 se centra en las tecnologías de producción de calor para redes de calefacción urbana. Combina fuentes de calor renovables y con bajas emisiones de carbono, el aprovechamiento del calor residual, las tecnologías de bombas de calor, la cogeneración (CHP) y la evaluación económica y medioambiental de los sistemas de producción de calor.

La guía está concebida principalmente como un recurso didáctico reutilizable para educadores, profesores y formadores. Puede utilizarse como apoyo en clases magistrales, actividades de aprendizaje mixto, debates en el aula, trabajos prácticos, estudios de casos y formación para el desarrollo profesional continuo. Las diapositivas de presentación, el banco de preguntas, el cuestionario de autoevaluación, los ejercicios prácticos y los materiales de los estudios de casos que la acompañan están diseñados 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 energéticos, calefacción urbana e ingeniería de instalaciones de edificios.

Principales temas tratados en el módulo

- Suministro de energía primaria y estrategias de producción de calor municipal
- Combustión de biomasa, recuperación de energía a partir de residuos y producción de biogás
- Calefacción urbana solar y almacenamiento de energía térmica
- Calefacción urbana geotérmica y aprovechamiento en cascada de aguas termales
- Clasificación del calor residual y tecnologías de captura y aprovechamiento
- Intercambiadores de calor y tecnologías activas de recuperación de calor residual
- Principios termodinámicos y tecnologías de las bombas de calor
- Aplicaciones de las bombas de calor para la valorización del calor residual y la calefacción urbana
- Sistemas de cogeneración (CHP) e integración en redes de calefacción urbana
- Evaluación económica y medioambiental de los sistemas de producción de calor
- Instrumentos políticos, tendencias de mercado y consideraciones de futuro para la producción de calor con bajas emisiones de carbono

Resultados de aprendizaje del Módulo 3

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

- identificar y clasificar las tecnologías de producción de calor utilizadas en las redes de calefacción urbana;
- explicar el papel de las fuentes de calor renovables y con bajas emisiones de carbono en la descarbonización del suministro de calor;
- comparar las opciones de producción de calor mediante combustión de biomasa, gasificación, biogás, energía solar térmica y energía geotérmica;
- identificar, clasificar y cuantificar las fuentes de calor residual en función de su origen y perfil de temperatura;
- explicar los principios termodinámicos que rigen el funcionamiento de las bombas de calor;
- evaluar las tecnologías de bombas de calor para la producción de calor y el aprovechamiento del calor residual;
- describir los principios de funcionamiento y la integración en la red de calefacción urbana de los sistemas de cogeneración;
- comparar configuraciones tecnológicas en función de la eficiencia, el coste y el impacto medioambiental;



- Analizar casos prácticos reales para evaluar la viabilidad y las ventajas de integrar la calefacción renovable, la recuperación de calor residual, las bombas de calor y la cogeneración en los sistemas de calefacción urbana.

Carga de trabajo estimada

Este módulo supone aproximadamente 8,4 horas de aprendizaje, incluyendo la asimilación teórica, la aplicación práctica, el análisis de casos, la investigación independiente y la 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 lectivos seleccionados, un componente de aprendizaje mixto, un paquete de ejercicios prácticos, un paquete de casos prácticos o un recurso complementario para cursos ya existentes.

Actividades y horas de aprendizaje

Tipo de actividad	Tiempo asignado	Descripción
Asimilación teórica	4,0 h	Estudio en profundidad de los materiales de clase y lectura crítica de artículos técnicos y documentos normativos.
Aplicación práctica	1,0 h	Ejercicios técnicos que incluyen cálculos de eficiencia, simulaciones termodinámicas y análisis económicos.
Análisis de casos	0,5 h	Evaluación crítica de implementaciones reales centradas en las energías renovables y los sistemas de cogeneración.
Investigación independiente	2,5 h	Revisión bibliográfica autónoma y evaluación del impacto medioambiental.
Evaluación	0,4 h	Evaluación continua y proyecto técnico final o tarea de evaluación para consolidar los conocimientos adquiridos.
Total de horas lectivas	8,4 h	

Destinatarios

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.

- profesores de educación superior en ingeniería, instalaciones de edificios, sistemas energéticos, calefacción y refrigeración urbanizadas, climatización y sistemas energéticos sostenibles;
- 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;
- estudiantes, investigadores y profesionales interesados en la producción de calor renovable, la recuperación de calor residual, las bombas de calor y la cogeneración en redes de calefacción urbana.

Para un uso autónomo, se recomienda contar con conocimientos previos básicos en los campos de ingeniería pertinentes.

Uso recomendado para docentes y formadores



El módulo 3 puede utilizarse de forma flexible como unidad didáctica completa o como conjunto de recursos didácticos seleccionados. Los docentes pueden combinar los materiales en función del nivel del curso, el tiempo lectivo disponible y los resultados de aprendizaje previstos.

Necesidades docentes	Recurso sugerido para el módulo 3
Introducción al tema	Utilice la descripción general del módulo y las diapositivas introductorias para presentar el alcance, los conceptos clave y la relevancia de la producción de calor en las redes de calefacción urbana.
Preparación de los alumnos antes de la clase	Asigne secciones seleccionadas de la guía como lectura previa para actividades de aula invertida o de aprendizaje mixto.
Apoyo a las clases magistrales o seminarios	Utilice las diapositivas de la presentación para explicar las fuentes de calor renovables, la recuperación de calor residual, las bombas de calor, la cogeneración y la evaluación económica o medioambiental.
Comprobación de la comprensión	Utilice preguntas seleccionadas del banco de preguntas para debates, breves comprobaciones en clase, evaluación formativa o cuestionarios en la plataforma de gestión del aprendizaje (LMS).
Desarrollo de habilidades de ingeniería aplicada	Utilice los ejercicios prácticos para el trabajo en grupo, los deberes, las tareas de cálculo termodinámico, la comparación económica o el aprendizaje basado en proyectos.
Apoyo al trabajo con casos prácticos	Utilice los materiales de los casos prácticos para debatir ejemplos reales de calor renovable, recuperación de calor residual, bombas de calor e integración de la cogeneración.
Apoyo a la revisión independiente	Indique a los alumnos que realicen el cuestionario de autoevaluación del módulo una vez que hayan estudiado los materiales pertinentes.
Adaptación a los contextos docentes locales	Selecione, combine o modifique las secciones de la guía, las diapositivas, las preguntas, los ejercicios y 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.

Repasa la presentación introductoria

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

Estudia los materiales de la guía

Lee las explicaciones detalladas, los principios de ingeniería y los ejemplos prácticos que se presentan en la guía.

Ver el vídeo del módulo

Utiliza el breve vídeo complementario como orientación sobre los temas principales y los objetivos de aprendizaje del módulo.

Realiza el cuestionario de autoevaluación

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

Realiza el ejercicio práctico

Aplica los conocimientos adquiridos mediante tareas de cálculo, comparación o evaluación de carácter técnico.

Revisa los casos prácticos

Analiza ejemplos seleccionados del mundo real y reflexiona sobre su aplicabilidad técnica, económica y medioambiental.



Materiales de apoyo disponibles

Los materiales de apoyo incluyen:

- diapositivas de presentación de los subtemas del módulo;
- un banco de preguntas reutilizable y una clave de respuestas;
- un cuestionario de autoevaluación a nivel del módulo;
- un ejercicio práctico de ingeniería;
- materiales de casos prácticos;
- y un breve vídeo complementario del módulo.



Índice

Proyecto.....	2
Instituciones participantes.....	2
Autores y colaboradores.....	2
Editores.....	2
Agradecimiento por la financiación de la UE y exención de responsabilidad	2
Coordinador.....	2
Instituciones asociadas	2
Agradecimientos.....	2
Licencia	2
Guía de uso del Módulo 3	3
1. Producción de calor renovable	10
1.1 Suministro de energía primaria de los municipios	10
1.1.1 EVALUACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	11
1.1.2 Combustión de biomasa y recuperación de energía a partir de residuos.....	12
1.1.3 Potencial de biomasa combustible en Hungría.....	13
1.1.4 Bloque de calefacción alimentado con astillas de madera y paja en la central eléctrica de Pécs.....	15
1.2 GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA.....	16
1.2.1 El potencial de la producción doméstica de biogás	16
1.2.2 El proceso de producción de biogás	17
1.2.3 Proceso de tratamiento de aguas residuales y producción de biogás	18
1.2.4 La central eléctrica de biomasa de Güssing	18
1.2.5 Vertido de residuos sólidos urbanos y producción de gas de vertedero	20
1.2.6 Producción combinada de calor y electricidad con un motor alimentado con biogás	22
1.2.7 Comparación entre la combustión y la gasificación de biomasa para la producción de energía.....	22
1.3 CALEFACCIÓN URBANA SOLAR	23
1.3.1 Colector plano	23
1.3.2 Tubo de vacío «Sydney»	25
1.3.3 Tubo de vacío con conducto de calor	26
1.3.4 El reto de la producción de calor solar a gran escala: almacenar los picos de rendimiento .	26
1.4 Calefacción urbana geotérmica	27
1.4.1 Métodos de integración en la calefacción urbana geotérmica	28
1.4.2 Métodos de conexión de los consumidores	31
1.4.3 Las posibilidades de aprovechamiento del agua dependen de su calidad y caudal.....	31



1.4.4 Implantación de un sistema de calefacción urbana geotérmica	32
1.4.5 Retos durante la implantación de un sistema geotérmico	32
1.4.6 El gradiente geotérmico	33
1.4.7 Mapa GeoDH: potencial geotérmico y calefacción urbana en Europa	34
1.4.8 Potencial geotérmico en Hungría	35
1.5 Aprovechamiento de las fuentes de energía renovables en la calefacción urbana: enfoque en la energía geotérmica	37
1.5.1 Aspectos prácticos de la utilización de aguas subterráneas termales en sistemas de calefacción urbana	38
1.5.2 Aumento del caudal de agua	39
1.5.3 Desgasificación del agua termal extraída	39
1.5.4 Aprovechamiento de los pozos termales en Hungría	40
2. Aprovechamiento del calor residual y bombas de calor	54
2.1 Antecedentes sobre el calor residual	54
2.2 Clasificación del calor residual	54
2.2.1 Tecnologías para la captación y el aprovechamiento del calor residual	55
2.2.2 Revalorización del calor residual	61
2.3 Fuentes urbanas seleccionadas de calor residual para la calefacción urbana	71
2.3.1 Calor residual de los centros de datos	71
2.3.2 Calor residual de los túneles de metro	71
2.3.3 Calor residual de las redes de alcantarillado mediante bombas de calor	72
2.3.4 Aprovechamiento del calor residual: el consumidor se convierte en prosumidor	72
3. Cogeneración (CHP)	74
3.1 Introducción a los sistemas de cogeneración	74
3.2 El papel de los sistemas de cogeneración en la producción de calor y su integración en diversas tecnologías, como las redes de calefacción urbana	78
3.3 Retos operativos y técnicos de la integración de la cogeneración en las redes de calefacción urbana	81
4. Aspectos económicos y medioambientales de la producción de calor en las redes de calefacción urbana	84
4.1 Introducción	84
4.2 Análisis económico en profundidad de los sistemas de producción de calor	85
4.3 Impacto medioambiental de los sistemas de producción de calor	88
4.4 Tendencias del mercado y del sector, precios y competencia en el mercado de la cogeneración y las bombas de calor	93
4.5 Instrumentos políticos y marcos normativos de la cogeneración y las bombas de calor	97
5. Conclusiones	105



6. Referencias	106
----------------------	-----



1. Producción de calor renovable

1.1 Suministro de energía primaria de los municipios

Una de las cuestiones clave en el desarrollo de los sistemas de calefacción urbana es determinar la fuente de energía primaria más adecuada, tanto para las necesidades actuales como para el futuro a largo plazo. La elección del suministro de energía primaria influye considerablemente no solo en la eficiencia y el rendimiento medioambiental del sistema energético local, sino también en la seguridad energética y la estabilidad económica del municipio.

En Hungría, la extensa red de gas natural ha desempeñado un papel predominante en el suministro de calor durante varias décadas. Su infraestructura bien consolidada y su fiabilidad la han convertido en la fuente de energía más conveniente y ampliamente utilizada, tanto para fines residenciales como para la calefacción urbana. Sin embargo, el creciente énfasis en la sostenibilidad, los objetivos de descarbonización de la Unión Europea y la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles ponen de relieve la necesidad de reducir gradualmente la dependencia del gas natural.

Cuando un municipio alberga un complejo industrial con un consumo significativo de energía primaria, existe un interés mutuo en desarrollar una estrategia energética compartida. La planificación energética coordinada permite optimizar los recursos, reducir los costes energéticos generales y mejorar el aprovechamiento del potencial energético local. En tales casos, los sistemas energéticos integrados —que combinan procesos industriales, redes de calefacción municipales y fuentes de energía renovables o procedentes de residuos— pueden generar importantes beneficios medioambientales y económicos.

Una oportunidad especialmente valiosa reside en el aprovechamiento del calor residual industrial. Muchas instalaciones industriales liberan al medio ambiente cantidades considerables de calor residual a baja o media temperatura. Al capturar e integrar esta energía en las redes de calefacción urbana, los municipios pueden reducir significativamente la demanda de energía primaria y las emisiones de carbono, al tiempo que mejoran la eficiencia global del sistema.

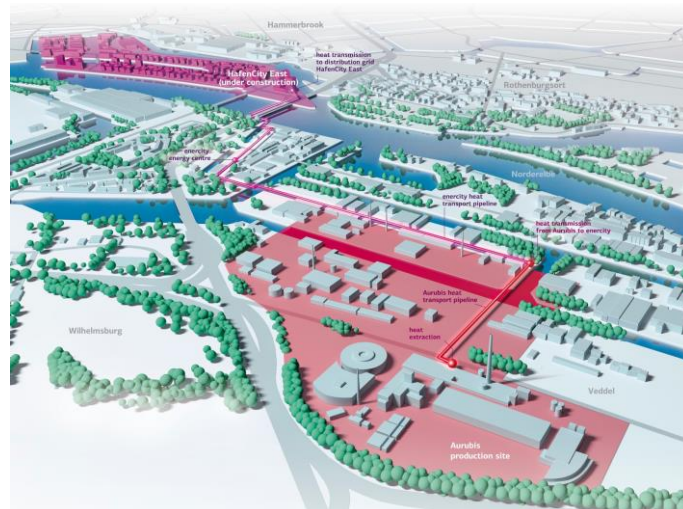


Figura1 . Sistema de calefacción urbana para HafenCity East, en Hamburgo [1]

En Hungría, la cuota del gas natural en el suministro nacional de energía primaria sigue siendo significativamente superior a la media de la Unión Europea. Mientras que la UE en su conjunto ha registrado un consumo de gas natural relativamente estable en los últimos años, Hungría ha experimentado un descenso gradual. Esto refleja tanto las mejoras en la eficiencia energética como el papel cada vez más importante de las fuentes de energía alternativas.



Energy Type	Units	EU 28			Hungary		
		2000	2006	2012	2000	2006	2012
Primary energy, G	PJ	72,362	76,698	70,485	1,051	1,150	986
Final energy, F	PJ	45,769	49,984	48,388	662	754	622
F/G	%	65	65	66	63	66	63
Natural gas, Fg	PJ	17,832	18,490	16,495	406	481	349
Fg/G	%	24.6	24.1	23.4	38.6	40.8	35.4
Renewables, U	PJ	4,377*	5,242	7,746	39*	52	74
U/G	%	4.9	4.2	11.0	3.7	4.2	4.2

* Data for 2003.

Figura2 . Datos sobre el consumo de energía en la Unión Europea y Hungría [2]

Como se muestra en la figura 2, la cuota del gas natural en el consumo energético de los hogares es notablemente superior a su cuota en el consumo total de energía primaria. Esto pone de relieve la fuerte dependencia de los hogares húngaros del gas natural para la calefacción de espacios y la producción de agua caliente sanitaria —un legado de la extensa red de gas residencial establecida en décadas anteriores—.

La reducción más significativa del consumo de gas natural se ha producido en el ámbito de la generación de electricidad. El cambio hacia la generación de energía renovable, junto con las mejoras en la eficiencia energética y la modernización de las centrales eléctricas, ha contribuido a esta tendencia. No obstante, el gas natural sigue desempeñando un papel clave de equilibrio en el sistema energético, garantizando la flexibilidad y la seguridad del suministro durante los periodos de máxima demanda o cuando la producción renovable fluctúa.

1.1.1 EVALUACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS

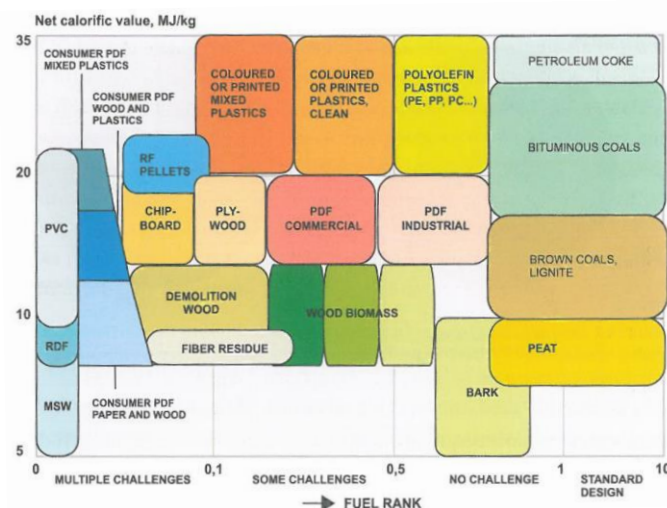


Figura3 . Clasificación de los combustibles sólidos en función de su poder calorífico y de los retos que plantean para el diseño de las calderas [3]

La figura 3 ilustra la relación entre el poder calorífico y la composición de diversos combustibles sólidos. En general, los combustibles con un alto contenido de humedad presentan un poder calorífico menor, ya que una parte significativa de la energía liberada durante la combustión se destina a la evaporación del agua en lugar de a la producción de calor.



Ciertos combustibles derivados de residuos, como el PVC, el RDF (combustible derivado de residuos) o los RSU (residuos sólidos urbanos), pueden plantear retos adicionales. Estos materiales suelen contener cloro y otros compuestos halogenados, lo que puede dar lugar a la formación de cloruro de hidrógeno (HCl) y dioxinas durante la combustión. Incluso en concentraciones muy bajas, estas sustancias son tóxicas y requieren un control minucioso de las emisiones y la depuración de los gases de combustión.

Otra consideración importante es la formación de cenizas. Dependiendo de la composición química del combustible, las cenizas resultantes pueden variar ampliamente tanto en cantidad como en características. Algunos tipos de cenizas pueden ser muy corrosivos para los componentes de la caldera, lo que requiere el uso de materiales resistentes y un mantenimiento regular. En otros casos, sin embargo, las cenizas son relativamente inertes y suponen un riesgo operativo o medioambiental mínimo.

En general, la evaluación de los combustibles sólidos debe tener en cuenta no solo el poder calorífico, sino también el contenido de humedad, la composición química y los posibles impactos medioambientales. Estos factores, en conjunto, determinan si un combustible sólido concreto es técnica y económicamente adecuado para su uso en sistemas de calefacción urbana.

1.1.2 Combustión de biomasa y recuperación de energía a partir de residuos

En los sistemas de calefacción urbana, la biomasa de menor calidad y ciertos tipos de residuos también pueden servir como valiosas fuentes de energía. Su aprovechamiento fomenta la independencia energética local, reduce el consumo de combustibles fósiles y contribuye a la economía circular al recuperar energía de materiales que, de otro modo, tendrían que ser eliminados.

La recuperación de energía a partir de la biomasa puede lograrse mediante dos vías tecnológicas principales: la combustión y la gasificación.

La combustión es el método más común y técnicamente más maduro. Se aplica principalmente a la biomasa sólida y seca —como astillas de madera, pellets o residuos agrícolas— para producir calor directamente. En los sistemas de calefacción urbana, este calor puede utilizarse bien para el suministro directo de calor, bien en centrales de cogeneración (CHP), donde se generan tanto electricidad como energía térmica.

La gasificación, por su parte, es adecuada para la biomasa húmeda, los lodos orgánicos u otras materias primas que no son tan idóneas para la combustión directa. En este proceso, el material se oxida parcialmente a altas temperaturas, produciendo un gas bruto (a menudo denominado «gas de síntesis» o «syngas»). Este gas puede utilizarse localmente para la generación de calor y electricidad, normalmente en combinación con motores de gas o microturbinas. Como alternativa, el biogás mejorado puede venderse como gas combustible, contribuyendo así a los mercados energéticos descentralizados.

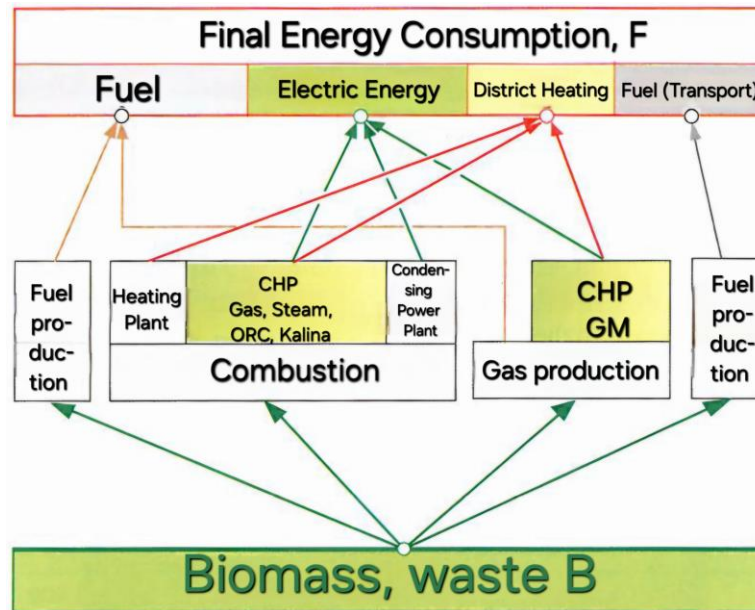


Figura4 . Diagrama de flujo de la conversión energética de la biomasa y los residuos [2]

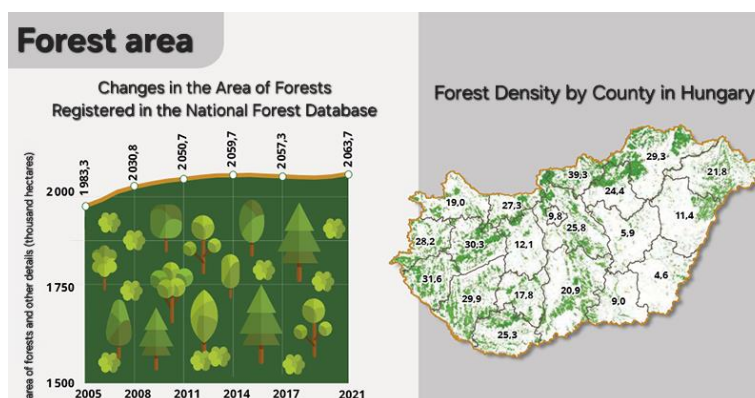
1.1.3 Potencial de biomasa combustible en Hungría

La biomasa combustible incluye materiales de origen forestal y agrícola, así como determinadas fracciones de residuos sólidos urbanos (RSU) aptas para la recuperación de energía. En Hungría, el potencial de aprovechamiento de la biomasa se ve influido por la cobertura forestal relativamente baja del país y por las condiciones específicas de uso del suelo.

La cobertura forestal de Hungría es de aproximadamente el 20 %, lo que supone solo la mitad de la media de la Unión Europea. El volumen total estimado de la masa forestal asciende a unos 360 millones de metros cúbicos, con un crecimiento anual (aumento) de aproximadamente 13 millones de metros cúbicos.

Si aproximadamente la mitad de este incremento anual se destinara a fines energéticos, podría proporcionar una fuente de energía primaria de entre 60 y 70 petajulios al año (PJ/a). Esto representa un importante potencial de energía renovable, especialmente para los sistemas regionales o municipales de calefacción urbana, en los que la biomasa disponible localmente puede aprovecharse de forma eficiente y sostenible.

Si bien la biomasa forestal constituye la mayor parte del potencial nacional, los residuos agrícolas (como la paja, los tallos de maíz y otros subproductos) y las fracciones biogénicas de los residuos sólidos urbanos también pueden contribuir a la combinación de energías renovables. Su integración en los sistemas de calefacción urbana no solo mejora la seguridad energética, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y favorece el desarrollo económico rural.





Dentro del potencial de biomasa húngaro, varios tipos de combustibles de origen vegetal desempeñan un papel significativo en la producción de energía renovable. Entre ellos se incluyen la leña, las astillas de madera y los residuos agrícolas, como la paja de trigo. Cada uno de ellos presenta características distintas y es adecuado para diferentes escalas y tecnologías de producción de calor.

La leña representa aproximadamente el 40 % de la tala total en Hungría. Debido a su accesibilidad y a su densidad energética moderada, resulta la opción más práctica para su uso en sistemas de calefacción individuales, especialmente en zonas rurales. Con un contenido de humedad de alrededor del 15 %, el poder calorífico de la leña oscila entre 15 000 y 16 000 kJ/kg, lo que la convierte en una fuente de calor local eficiente y fiable cuando se seca y almacena adecuadamente.

Las astillas de madera se utilizan habitualmente como combustible en calderas de mayor tamaño o en centrales de calefacción centralizadas, incluidos los sistemas de calefacción urbana. Su poder calorífico depende en gran medida del contenido de humedad: unos 8 000 kJ/kg con un 50 % de humedad, y hasta 16 000 kJ/kg cuando se secan hasta alcanzar un 10 % de humedad. La cantidad anual disponible de astillas de madera en Hungría se estima entre 1 y 1,4 millones de toneladas, lo que corresponde a un potencial energético de aproximadamente entre 10 y 18 petajulios (PJ) al año.

La paja de trigo representa otra importante fuente de combustible renovable. Cada año se pueden aprovechar energéticamente aproximadamente 1,5 millones de toneladas de paja. Con un contenido de humedad de alrededor del 18 %, su poder calorífico es de aproximadamente 13 000 kJ/kg, lo que se traduce en un potencial energético de unos 20 PJ al año.

Si se consideran en conjunto todos los combustibles de origen vegetal —incluida la biomasa forestal, los residuos de la transformación de la madera y los subproductos agrícolas—, el potencial total de energía primaria renovable se estima entre 70 y 90 PJ al año. Esto indica que la biomasa puede aportar una contribución significativa a la cartera de energía renovable de Hungría, especialmente en los sistemas de calefacción urbana locales y regionales, donde se pueden minimizar las distancias de transporte del combustible.

Las biobriquetas y los biopellets son formas modernas de combustibles de biomasa procesada que ofrecen una mayor eficiencia de combustión y mayor comodidad en comparación con la leña en bruto. Se producen mediante la compresión sin aglutinantes de materiales de biomasa secos, como el serrín o los residuos agrícolas, utilizando la lignina natural como agente aglutinante. La alta densidad resultante (1,0–1,3 t/m³) permite un almacenamiento, transporte y uso eficientes en sistemas de calefacción automatizados a pequeña escala. Su calidad uniforme y su bajo contenido de humedad permiten una combustión limpia, controlable y eficiente, lo que supone una alternativa práctica y sostenible a los combustibles sólidos tradicionales.

Las plantaciones energéticas constituyen otra fuente eficiente y sostenible de biomasa para los sistemas de calefacción. Estas plantas de rápido crecimiento, que alcanzan entre 2 y 3 m de altura, se cosechan en un ciclo de 2 a 3 años utilizando maquinaria especializada que también tritura los tallos, que suelen tener un diámetro de entre 2 y 3 cm. Si bien su rápido crecimiento puede ayudar a retener compuestos nocivos, algunas especies pueden plantear riesgos como la degradación del suelo o la corrosión en las plantas de combustión. Tras la tala, las plantas vuelven a brotar desde sus raíces, lo que garantiza un suministro continuo y renovable de biomasa para la calefacción urbana u otras aplicaciones energéticas.

La biomasa combustible de menor calidad también puede utilizarse de forma eficaz en plantas de calefacción urbana con potencias que van desde los 100 kW hasta varios megavatios. Una integración satisfactoria requiere una planificación y coordinación minuciosas a nivel municipal, incluyendo la adquisición de biomasa, la evaluación de la disponibilidad local y la determinación de los costes. Las materias primas habituales incluyen residuos locales de la industria maderera y biomasa procedente de explotaciones forestales cercanas.

La biomasa recién cortada suele contener alrededor de un 50 % de humedad, lo que reduce significativamente su poder calorífico. Para garantizar una combustión eficiente, el contenido de humedad debe reducirse al 15-20 %, lo que puede lograrse mediante procesos de secado controlados. En la práctica,



esto suele implicar secar la biomasa entre temporadas de calefacción, durante el verano, lo que permite optimizar la calidad del combustible y garantizar un funcionamiento constante del sistema de calefacción.

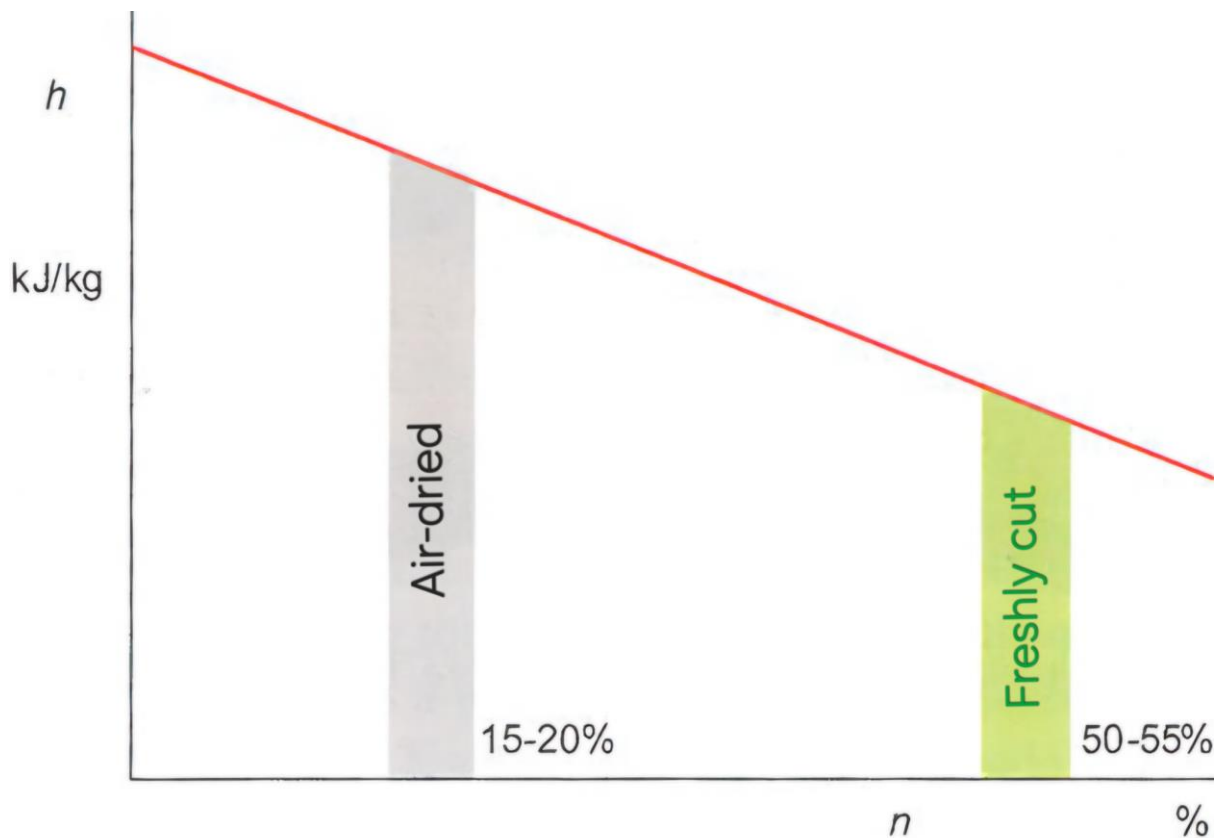


Figura6 Energía específica de la biomasa en función del contenido de humedad [2]

1.1.4 Bloque de calefacción alimentado con astillas de madera y paja en la central eléctrica de Pécs

Un ejemplo notable de aprovechamiento a gran escala de la biomasa en Hungría es la central eléctrica de Pécs, donde una antigua central térmica de carbón se transformó con éxito en una central de cogeneración (CHP) basada en biomasa mediante un proceso de modernización en dos fases. La conversión conservó las turbinas de vapor originales y los parámetros de vapor de la antigua central, lo que garantizó una integración eficiente de las nuevas tecnologías en la infraestructura existente.

En la primera fase, se instaló una caldera alimentada con astillas de madera con una capacidad de vapor de 185 t/h. Esta produce vapor para una turbina de extracción-condensación con una potencia eléctrica de 50 MW.

En la segunda fase, se añadió una caldera alimentada con paja, que proporciona 137 t/h de vapor. Fuera de la temporada de calefacción, esta unidad funciona con una turbina de extracción-condensación de 35 MW, mientras que durante el periodo de calefacción se conecta a una turbina de calefacción de contrapresión de 27 MW para suministrar calefacción urbana.

El sistema de calefacción urbana de Pécs da servicio a aproximadamente 31 000 viviendas y 450 instituciones públicas, con una demanda anual de calor de alrededor de 1 600 TJ. De esta cantidad, aproximadamente el 62 % lo suministra la unidad alimentada con paja y el 32 % la unidad alimentada con astillas de madera. En conjunto, las instalaciones de biomasa suministran el 94 % de la calefacción y la electricidad renovables de la ciudad, mientras que la combustión de gas natural cubre el 6 % restante de la demanda de calefacción.

La central eléctrica de Pécs constituye un ejemplo paradigmático de cómo la infraestructura existente basada en combustibles fósiles puede transformarse en un sistema energético sostenible y renovable, combinando los recursos locales de biomasa con tecnologías eficientes de calefacción urbana.

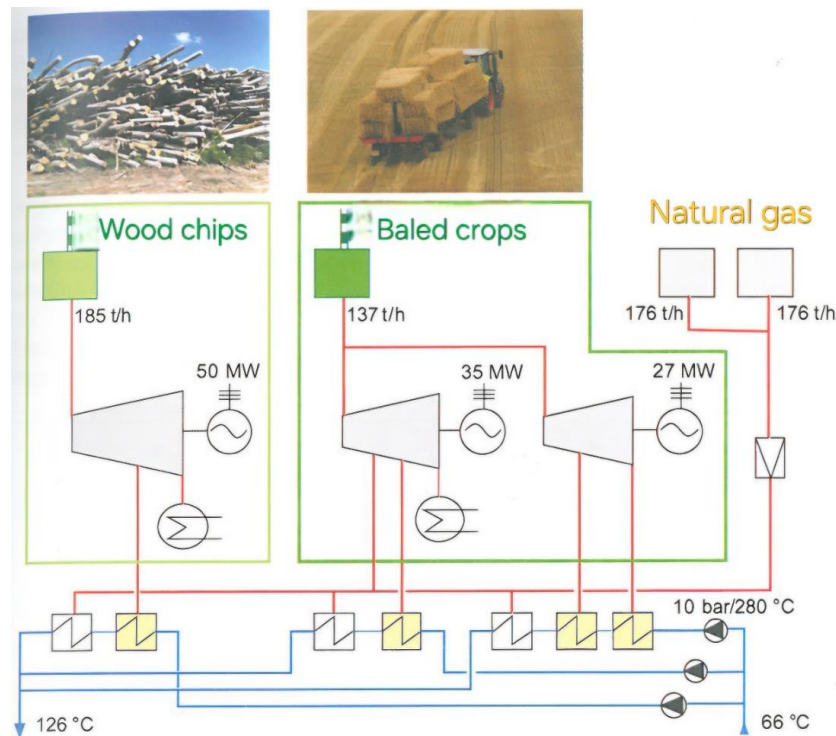


Figura7 : Sistema de cogeneración de calor y electricidad en la central eléctrica de Pécs [2]

1.2 GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

1.2.1 El potencial de la producción doméstica de biogás

La producción de biogás ofrece una forma eficaz de aprovechar la biomasa blanda que no puede utilizarse directamente para la combustión. En Hungría se dispone cada año de cantidades significativas de este tipo de materiales orgánicos. Por ejemplo, se producen anualmente unas 700 000 toneladas de lodos de depuradora, mientras que la agricultura húngara genera alrededor de 7,5 millones de toneladas de residuos biodegradables aptos para la gasificación o la digestión anaeróbica. En la actualidad, hay unas 40 plantas de biogás domésticas en funcionamiento, que procesan cerca de 3 millones de toneladas de materias primas orgánicas al año.

Organic Material	Amount (million t/year)	Biogas Production (billion m ³ /year)	Natural Gas Equivalent (billion m ³ /year)
Animal-origin Waste	43	1.6	1.1
Municipal Waste	10	0.7	0.5
Energy Crops (1000 thousand ha)	30	3.3	2.2
Total	83	5.6	3.8

Figura8 . Biogás producido a partir de diversos materiales orgánicos y en cantidades equivalentes al gas natural [2]

La producción de biogás se basa en la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, un proceso que tiene lugar en un entorno sin oxígeno. Durante este proceso, microorganismos como hongos y bacterias descomponen compuestos orgánicos complejos (hidratos de carbono, grasas y proteínas) en moléculas más simples. En la fase de formación de ácidos, estos productos intermedios se convierten en ácidos (como el ácido acético y el láctico), alcoholes, aldehídos, hidrógeno, dióxido de carbono y otros componentes gaseosos.

Mediante nuevas reacciones microbianas, estas sustancias se transforman en biogás, que se compone principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). El biogás resultante puede utilizarse para la generación de calor y electricidad o, tras su purificación, puede transformarse en biometano e inyectarse en la red de gas natural o utilizarse como combustible para vehículos.



1.2.2 El proceso de producción de biogás

El proceso tecnológico de producción de biogás consta de varias etapas clave, cada una de las cuales desempeña un papel específico en la conversión de la materia orgánica en energía utilizable. El flujo típico del proceso incluye los siguientes pasos:

1. Recepción de biomasa líquida: recogida y entrega de sustratos como estiércol, lodos de depuradora u otros materiales orgánicos líquidos.
2. Recepción de biomasa sólida: entrada de materias primas sólidas como residuos de cultivos, residuos alimentarios o cultivos energéticos.
3. Almacenamiento previo: retención temporal de la materia prima para garantizar una alimentación continua y uniforme del digestor.
4. Prefermentador: la etapa inicial de la digestión anaeróbica, en la que la biomasa comienza a descomponerse en condiciones controladas.
5. Postfermentador: la cámara de fermentación secundaria, donde la materia orgánica restante continúa descomponiéndose y se produce la mayor parte del biogás.
6. Almacenamiento final: el digestato tratado se almacena antes de ser utilizado como fertilizante.
7. Depósito de gas: recogida y almacenamiento intermedio del biogás producido.
8. Depurador de gas: limpieza y acondicionamiento del biogás bruto mediante la eliminación de impurezas como el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de carbono y el vapor de agua.

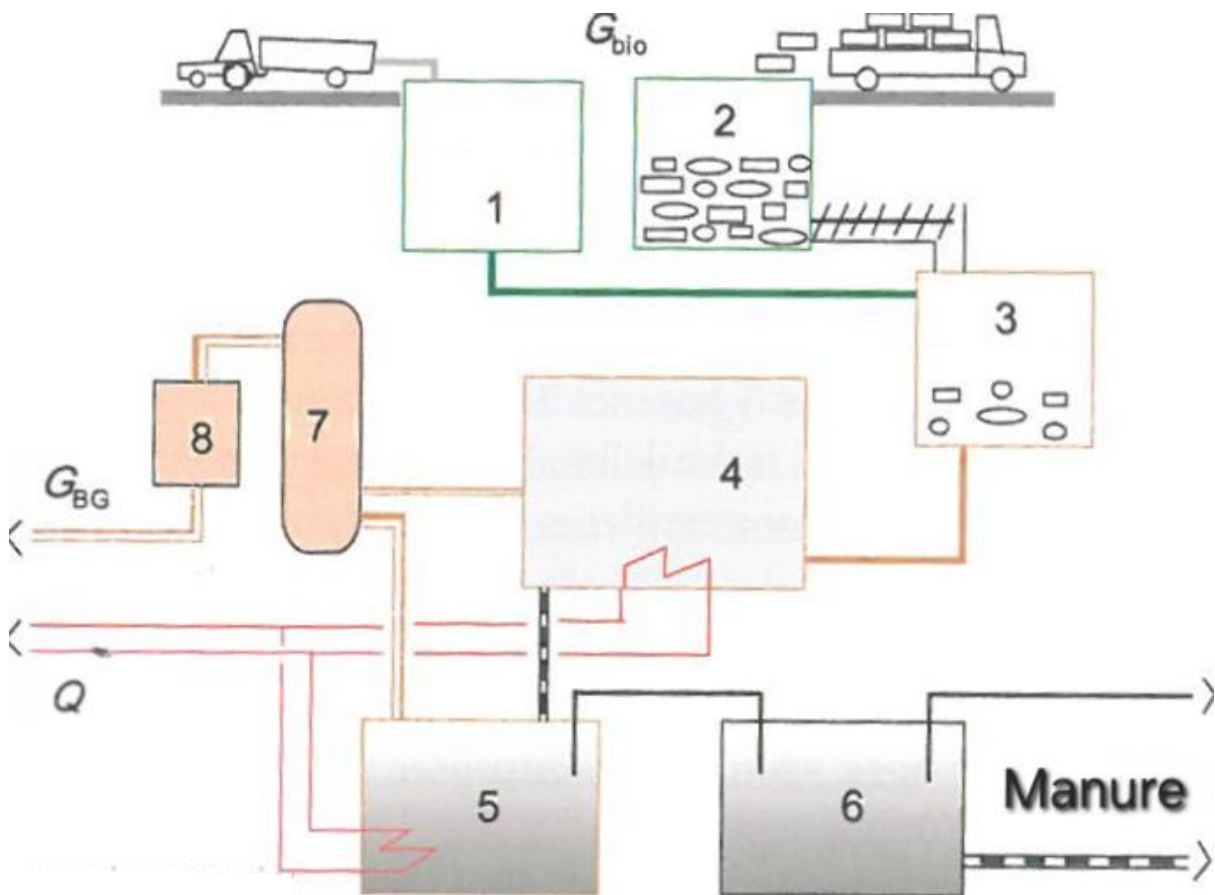


Figura9 . El proceso de producción de biogás [2]

Durante el proceso de fermentación, el número de microorganismos patógenos presentes en la biomasa disminuye significativamente, el material se vuelve menos oloroso y el digestato resultante sirve como un



excelente fertilizante rico en nutrientes para uso agrícola. Así, la tecnología del biogás no solo contribuye a la producción de energía renovable, sino que también ofrece una solución de gestión de residuos beneficiosa para el medio ambiente.

1.2.3 Proceso de tratamiento de aguas residuales y producción de biogás

En el tratamiento de las aguas residuales municipales, el contenido orgánico de las aguas residuales urbanas se espesa primero para formar un lodo concentrado. A continuación, este lodo espesado se dirige a un sistema de digestión anaeróbica, donde se somete a una gasificación biológica en ausencia de oxígeno. Como resultado, se producen biogás, de gran valor energético, y residuos sólidos estabilizados (digestato).

Las aguas residuales tratadas y diluidas pueden hacerse aptas para uso agrícola tras someterse a los procesos adecuados de purificación, desodorización y desinfección. En los casos en que el proceso de tratamiento no sea totalmente exhaustivo, el efluente parcialmente tratado puede utilizarse igualmente para el riego de cultivos energéticos, lo que contribuye a la utilización circular de los recursos.

El digestato sólido, tras su secado, puede servir como fertilizante orgánico o como combustible, dependiendo de su composición y contenido energético. A través de este enfoque integrado, las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden funcionar no solo como instalaciones de eliminación de residuos, sino también como productoras de energía renovable, contribuyendo a la gestión sostenible de la energía y los nutrientes en los municipios.

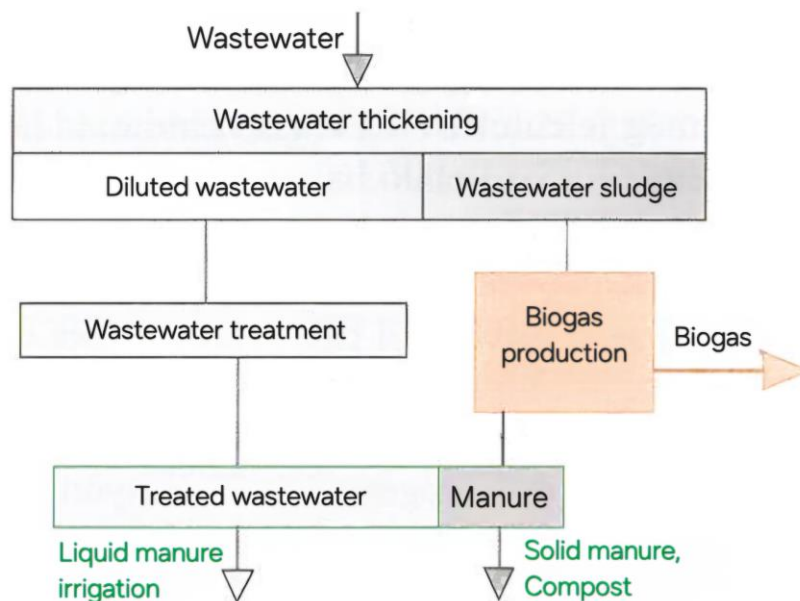


Figura10 . Proceso de tratamiento de aguas residuales y producción de biogás [2]

1.2.4 La central eléctrica de biomasa de Güssing

La central de biomasa de Güssing, en Austria, es un ejemplo destacado de gasificación térmica de la madera para producir gas de síntesis (syngas) destinado a la generación de energía. La central emplea un avanzado sistema de gasificación en lecho fluidizado, que permite la conversión eficiente de la biomasa sólida en gas combustible.



Figura11 . La central de biomasa de Güssing [5]

El gasificador consta de dos zonas principales:

1. Zona de combustión: en esta sección, el material del lecho y el aire circulan, proporcionando el calor necesario para el proceso de gasificación. La circulación garantiza una temperatura uniforme y un funcionamiento estable.
2. Zona de gasificación: aquí se introduce la madera como materia prima. El vapor sobrecalentado ($\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) generado en la zona de combustión fluidiza la biomasa, lo que favorece una rápida descomposición térmica y la formación de gas de síntesis.

Esta disposición de doble zona permite una conversión térmica eficiente de la madera en una mezcla de gases combustibles adecuada para la generación combinada de calor y electricidad (CHP), al tiempo que mantiene una alta estabilidad del proceso y bajas emisiones. La central de Güssing sirve de referente para las modernas tecnologías de gasificación de biomasa y demuestra el potencial de la madera de origen local para la producción sostenible de energía.

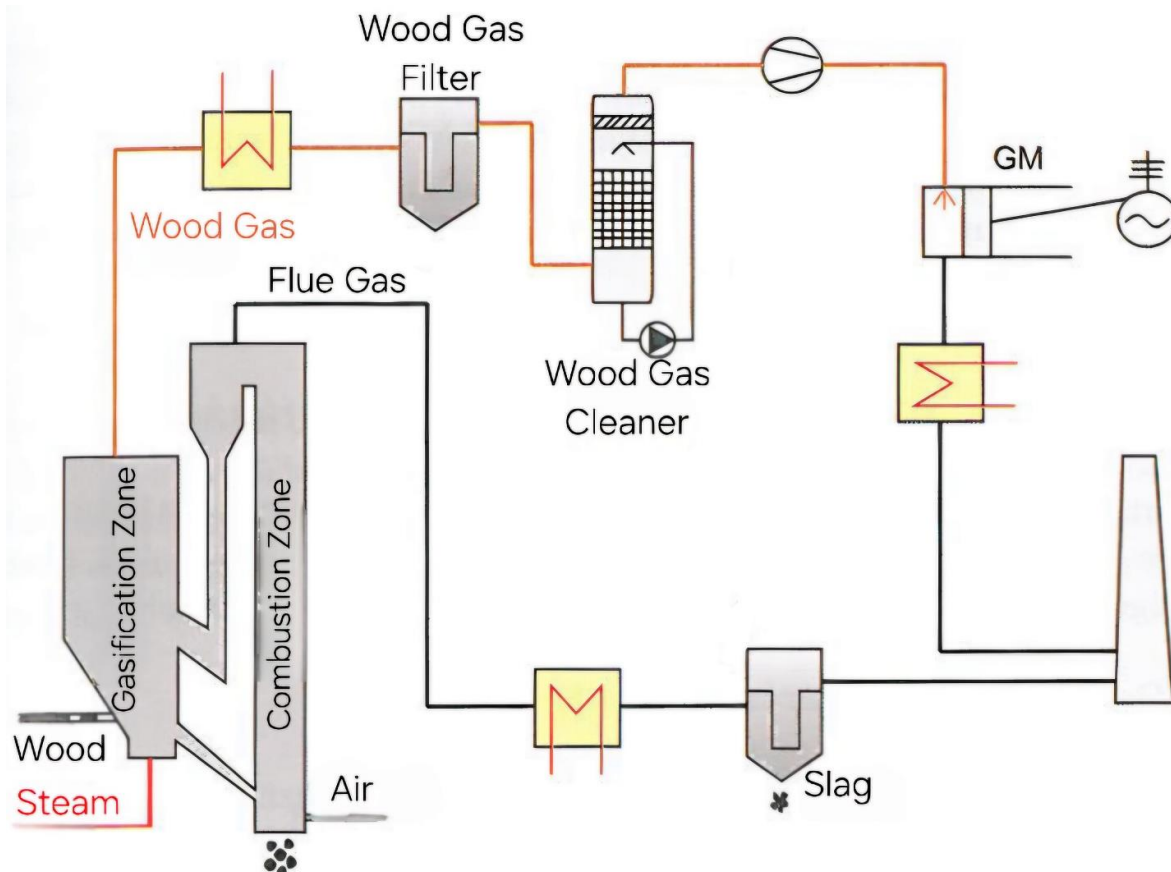


Figura12 . Diagrama de flujo de la central eléctrica de gasificación de biomasa de Güssing [2]

1.2.5 Vertido de residuos sólidos urbanos y producción de gas de vertedero

Los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) se someten inicialmente a una descomposición aeróbica, seguida de procesos anaeróbicos a medida que se agota el oxígeno. Durante la fase anaeróbica se genera gas de vertedero, que suele estar compuesto por un 40-60 % de metano (CH_4) y un 40-60 % de dióxido de carbono (CO_2). Además, contiene trazas de monóxido de carbono, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, ácidos grasos volátiles, mercaptanos y vapor de agua.

El gas de vertedero puede extraerse y utilizarse como fuente de energía, con rendimientos típicos de entre 2 y 3 m^3 por tonelada de residuos al año. La gestión operativa y medioambiental de un vertedero, incluida la extracción de gas, es un proceso a largo plazo, ya que el cierre y la estabilización del emplazamiento pueden llevar entre 20 y 30 años. La captura y el aprovechamiento adecuados del gas de vertedero no solo proporcionan una fuente de energía renovable, sino que también reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y los problemas de olores asociados a la eliminación de residuos.

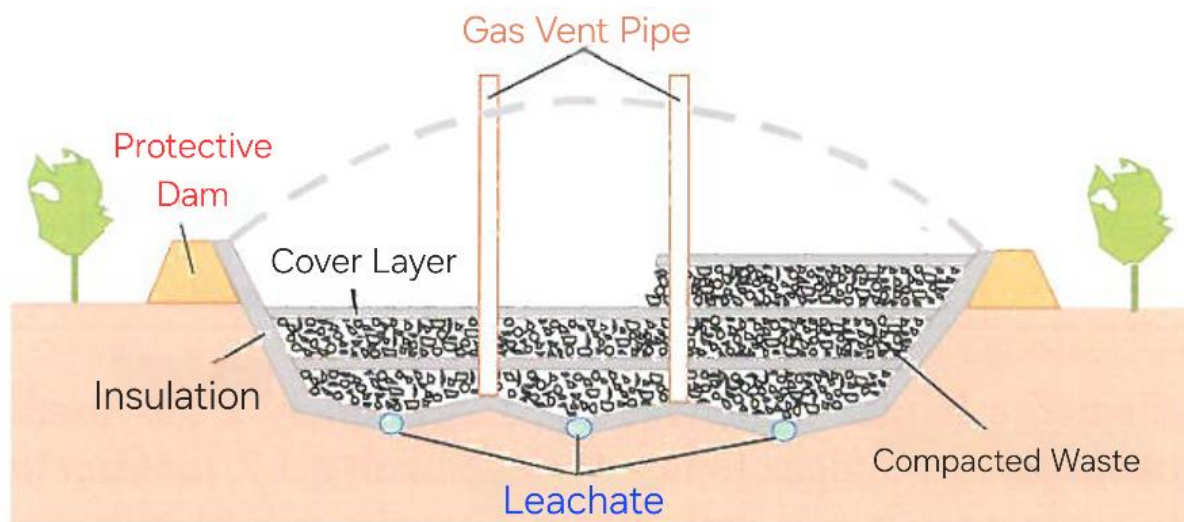


Figura13 . Vertido de residuos sólidos urbanos, producción de gas de vertedero [2]

La tabla resume los rendimientos típicos de biogás obtenidos a partir de diferentes tipos de sustratos orgánicos, lo que ilustra el potencial energético relativo de los residuos agrícolas, los lodos de depuradora y otros materiales biodegradables.

Organic Material	Biogas Yield (m^3/t)	Organic Material	Biogas Yield (m^3/t)
Pig manure	340–550	Grass	280–550
Cattle manure	90–310	Reed	170
Poultry manure	310–620	Clover	430–490
Horse manure	200–300	Potato waste	280–490
Sheep manure	90–310	Sugar beet leaves	400–500
Stable manure	175–280	Sunflower leaves	300
Wheat straw	200–300	Agricultural waste	310–430
Corn stalks	380–460	Plant seeds	620
Rapeseed straw	200	Leaves	210–290
Rice straw	170–280	Algae	420–500
Flax	360	Sewage sludge	310–740
Hemp	360	Landfill waste	40–300

Figura14 . Rendimiento de biogás a partir de diversos materiales orgánicos [2]

Esta tabla presenta una visión general comparativa de las principales propiedades y la composición del biogás, el gas de vertedero y el gas natural, destacando las diferencias en el contenido de metano, la densidad energética y la idoneidad para la generación de calor y electricidad.



Component	Biogas	Landfill Gas	Natural Gas
Methane (%)	50--70	45--55	94--98
Carbon Dioxide (%)	17--42	30--35	0.0--3
Nitrogen (%)	0--1	15--25	0.3--4
Density (kg/m ³)	1.1--1.15	1.15--1.20	0.8--0.9
Calorific Value (kJ/m ³)	18,000--25,000	15,000--17,000	32,000--40,000

Figura15 . Comparación entre el biogás, el gas de vertedero y el gas natural [2]

1.2.6 Producción combinada de calor y electricidad con un motor alimentado con biogás

El biogás puede aprovecharse eficazmente en sistemas descentralizados de cogeneración (CHP) que utilizan motores de gas. Estos motores están disponibles en una amplia gama de potencias, desde unos pocos kilovatios hasta varios megavatios, lo que los hace adecuados tanto para pequeñas instalaciones comunitarias como para aplicaciones industriales a mayor escala.

Muchos motores de biogás están contenedorizados, lo que permite una fácil instalación in situ y su integración en la infraestructura existente. Estas unidades suelen incluir el motor de gas, el generador eléctrico y el equipo de conexión necesario, junto con intercambiadores de calor para capturar la energía térmica producida durante el funcionamiento. Al producir simultáneamente electricidad y calor aprovechable, los sistemas de cogeneración alimentados con biogás maximizan el valor energético de los residuos orgánicos, al tiempo que fomentan la independencia energética local y la sostenibilidad.

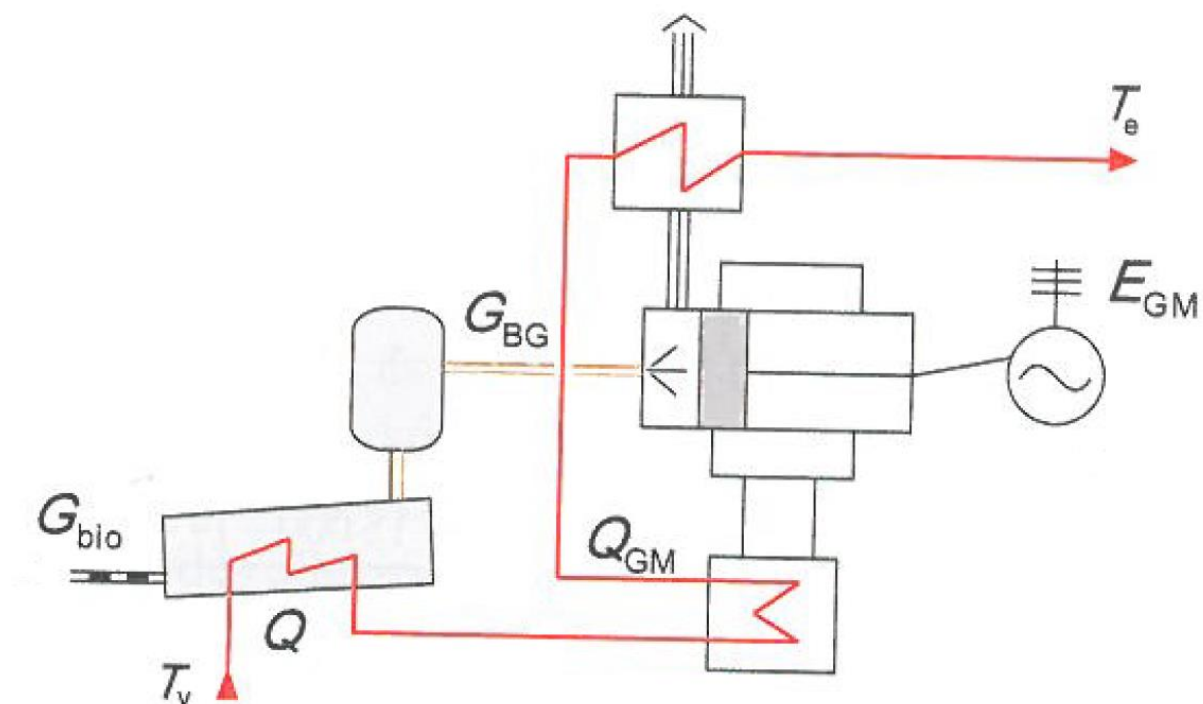


Figura16 . Producción combinada de calor y electricidad con un motor alimentado con biogás [2]

1.2.7 Comparación entre la combustión y la gasificación de biomasa para la producción de energía

Al comparar la combustión y la gasificación de la biomasa para la producción de energía, la elección depende en gran medida de la demanda de calor y de la distribución energética deseada. La combustión es más adecuada para aplicaciones que requieren una elevada producción de calor, ya que alcanza una eficiencia



global de alrededor del 80 %, proporcionando aproximadamente 12 GJ de calor a partir de 1 tonelada de biomasa. Sin embargo, su relación electricidad-calor (E/Q) es relativamente baja, de 0,25, lo que significa que da prioridad a la energía térmica frente a la generación de electricidad.

Por el contrario, la gasificación se recomienda para demandas de calor más bajas o cuando se necesita una mayor proporción de electricidad. Aunque la producción total de calor es menor (alrededor de 6,8 GJ), la gasificación ofrece una mejor relación electricidad-calor, de 0,79, lo que la hace más eficiente para los sistemas de cogeneración (CHP). Además, la gasificación produce biogás (unos 400 m³ por tonelada de biomasa) y puede utilizar subproductos como el estiércol, lo que aumenta su versatilidad.

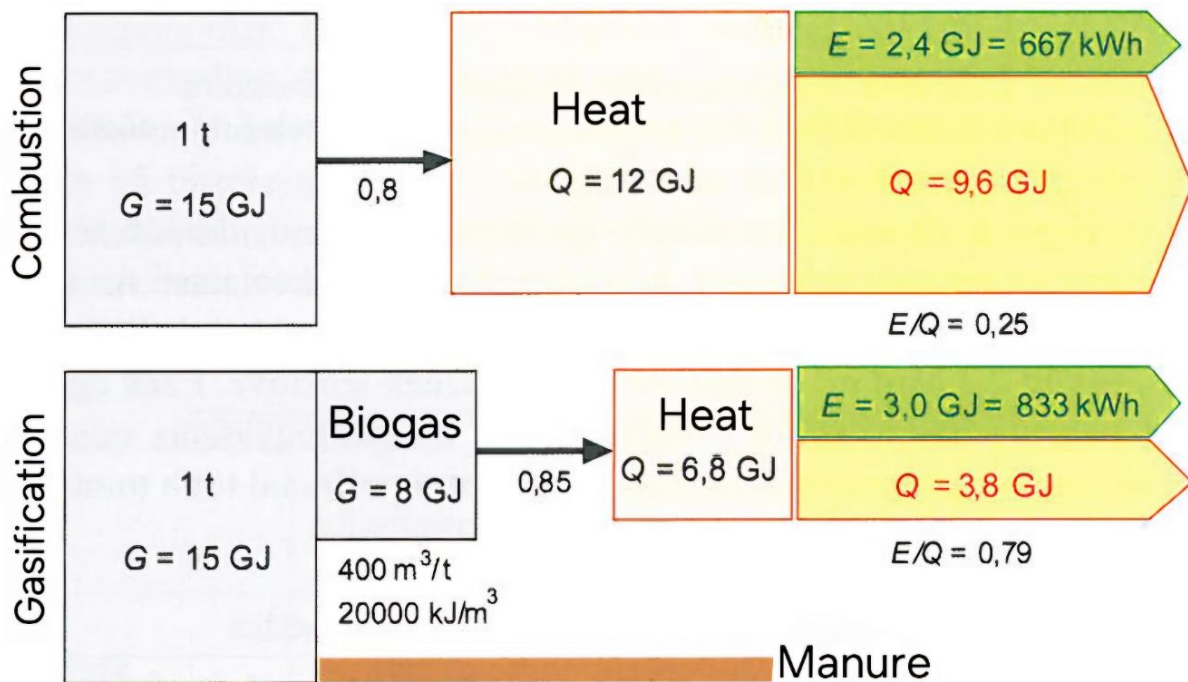


Figura17 . Comparación entre la combustión y la gasificación de biomasa para la producción de energía [2]

1.3 CALEFACCIÓN URBANA SOLAR

1.3.1 Colector plano

Los colectores planos son una de las tecnologías más comunes utilizadas en los sistemas solares térmicos para la calefacción urbana. Consisten en una caja aislada con una cubierta transparente y una placa absorbedora que capta la radiación solar y transfiere el calor a un fluido de trabajo. Estos colectores suelen instalarse en grandes conjuntos para alcanzar la potencia térmica necesaria para las redes de calefacción urbana.

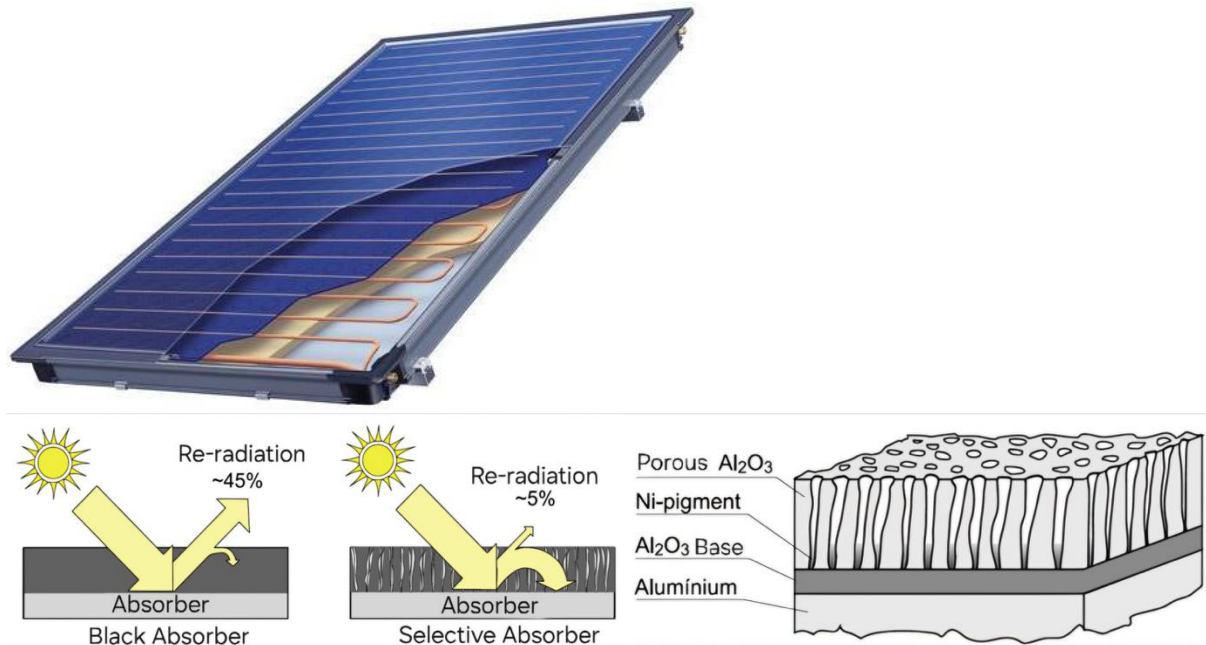


Figura18 . Colector plano y absorbedor [6]

1.3.1.1 Configuraciones de conexión: en serie frente a en paralelo

Cuando se combinan varios colectores, estos pueden conectarse en paralelo o en serie, y cada configuración presenta características hidráulicas y térmicas distintas:

Conexión en paralelo

En una disposición en paralelo, el caudal de fluido se divide entre los colectores. Esto da lugar a: una menor caída de presión en todo el sistema, lo que reduce los requisitos de energía de bombeo; un menor caudal por colector, lo que puede afectar ligeramente a la eficiencia de la transferencia de calor. La conexión en paralelo suele ser la preferida cuando es fundamental minimizar las pérdidas de presión.

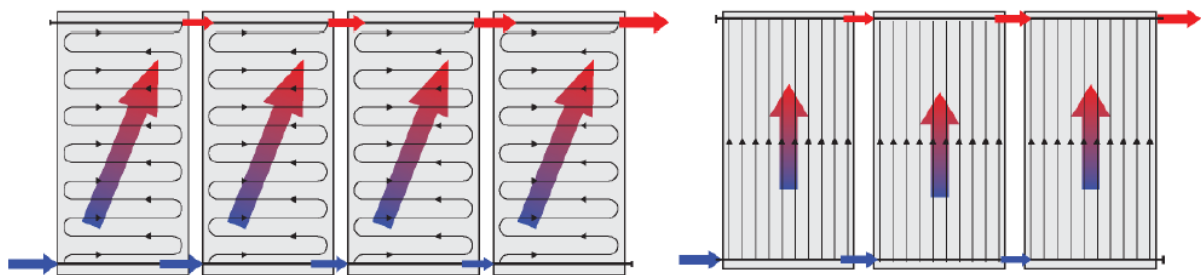


Figura19 . Conexión en paralelo de colectores solares [6]

Conexión en serie

En una disposición en serie, el fluido pasa por cada colector de forma secuencial. Esto conlleva: una mayor caída de presión, lo que requiere más potencia de bombeo; y un mayor caudal a lo largo de todo el circuito, lo que puede mejorar la transferencia de calor, pero aumenta la resistencia hidráulica. La conexión en serie se utiliza normalmente cuando se desean temperaturas de salida más altas.

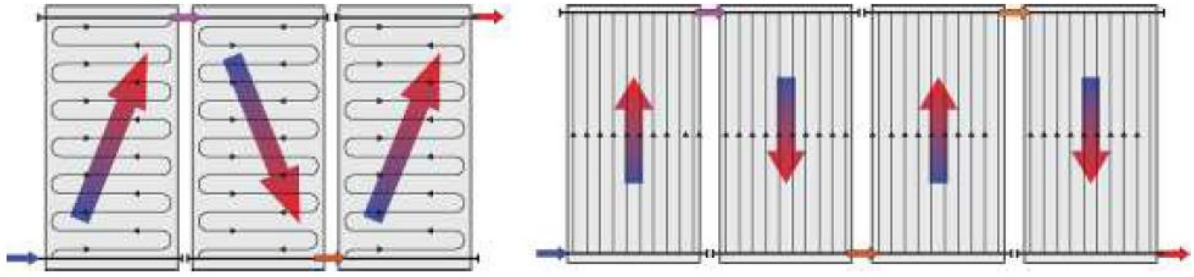


Figura20 . Conexión en serie de colectores solares [6]

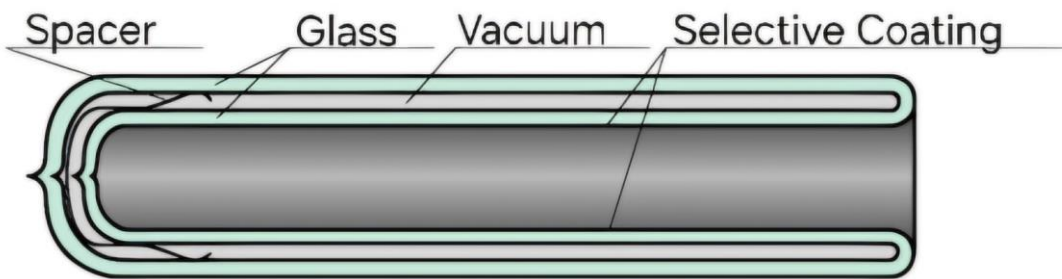
Una regulación adecuada es esencial para mantener un rendimiento óptimo. Las válvulas de equilibrado de caudal y los controladores de presión diferencial se utilizan habitualmente para garantizar una distribución uniforme y evitar el sobrecalentamiento de los colectores individuales.

Los colectores no siempre tienen un rendimiento equivalente. Las variaciones en la orientación, el sombreado y las tolerancias de fabricación pueden dar lugar a diferencias en la producción térmica. Por lo tanto, el diseño del sistema debe tener en cuenta estos factores para lograr una eficiencia uniforme.

1.3.2 Tubo de vacío «Sydney»

Los tubos de Sydney son un tipo de colector de tubo de vacío ampliamente utilizado en aplicaciones solares térmicas. Cuentan con un tubo de vidrio de doble pared, similar al de un termo, en el que el espacio entre las paredes se vacía para minimizar las pérdidas de calor por conducción y convección. Este diseño garantiza una alta eficiencia térmica incluso en climas más fríos.

La superficie del absorbente está adherida al lado interior de la pared de vidrio interior, lo que permite la exposición directa a la radiación solar. Se requiere una lámina conductora de calor para transferir eficazmente el calor absorbido al fluido de trabajo.



Double-Walled "Sydney" Type Vacuum Tube

Figura21 . Estructura de un tubo de vacío de doble pared tipo Sydney [6]

Se puede instalar un espejo concentrador parabólico compuesto (CPC) opcional detrás de los tubos para maximizar el aprovechamiento de la radiación solar, reflejando luz solar adicional sobre el absorbente.

Los colectores de tubos de vacío resultan especialmente ventajosos en sistemas que requieren temperaturas de funcionamiento más elevadas o en los que las condiciones ambientales provocan pérdidas de calor significativas en los colectores de placa plana.



Figura22 : Colector de tubos de vacío de doble pared tipo Sydney [7]

1.3.3 Tubo de vacío con tubo de calor

Los tubos de vacío con tubo de calor representan un diseño avanzado para los sistemas solares térmicos, ya que combinan una alta eficiencia con una transferencia de calor fiable. Cada tubo contiene una placa absorbidora dentro de la envoltura de vacío, que capta la radiación solar y transfiere el calor a un tubo de calor sellado.

Características principales:

- Los absorbedores de placa se instalan dentro de los tubos de vacío para maximizar la absorción de energía solar.
- El absorbedor tiene un ángulo de inclinación ligeramente ajustable, lo que permite optimizar la incidencia solar dentro del tubo.
- El diseño del tubo de calor requiere una instalación en ángulo para garantizar un cambio de fase adecuado y el transporte de calor desde el evaporador hasta la sección del condensador.
- Debe prestarse especial atención a la expansión térmica en las uniones entre el vidrio y el metal para evitar tensiones mecánicas y mantener la integridad del vacío.

Los colectores de tubos de calor son ideales para aplicaciones que requieren altas temperaturas de salida y una transferencia de calor eficiente a largas distancias, como los sistemas de calefacción urbana solar a gran escala.

1.3.4 El reto de la producción de calor solar a gran escala: el almacenamiento de los picos de rendimiento

Uno de los retos más críticos en la producción de calor solar a gran escala es la gestión de los picos de rendimiento. Los sistemas solares térmicos dependen intrínsecamente de las condiciones meteorológicas, lo que significa que los periodos de alta radiación solar pueden dar lugar a importantes excedentes de calor. Si esta energía excedente no se gestiona adecuadamente, puede provocar problemas operativos como el sobrecalentamiento, el aumento de la presión en la red y la reducción de la eficiencia del sistema.

La solución más habitual es el almacenamiento de energía térmica, que permite almacenar el calor excedente durante los picos de producción y liberarlo cuando la demanda es mayor o la aportación solar es menor. Los sistemas de almacenamiento a gran escala, como los depósitos estratificados de agua caliente o el almacenamiento de energía térmica en foso (PTES), son esenciales para equilibrar la oferta y la demanda en



las redes de calefacción urbana. Sin embargo, estos sistemas requieren una inversión considerable, espacio y una integración cuidadosa en el diseño hidráulico general.

Además del almacenamiento, las estrategias de control inteligentes y los algoritmos predictivos desempeñan un papel clave en la optimización del rendimiento del sistema. Al prever la disponibilidad solar y la demanda de calor, los operadores pueden ajustar los caudales, la recarga del almacenamiento y las fuentes de calor auxiliares para mantener la estabilidad y la eficiencia.

Por lo tanto, gestionar los picos de rendimiento no es solo un reto técnico, sino también económico y operativo. Las soluciones eficaces garantizan que la calefacción urbana solar siga siendo fiable, rentable y sostenible.

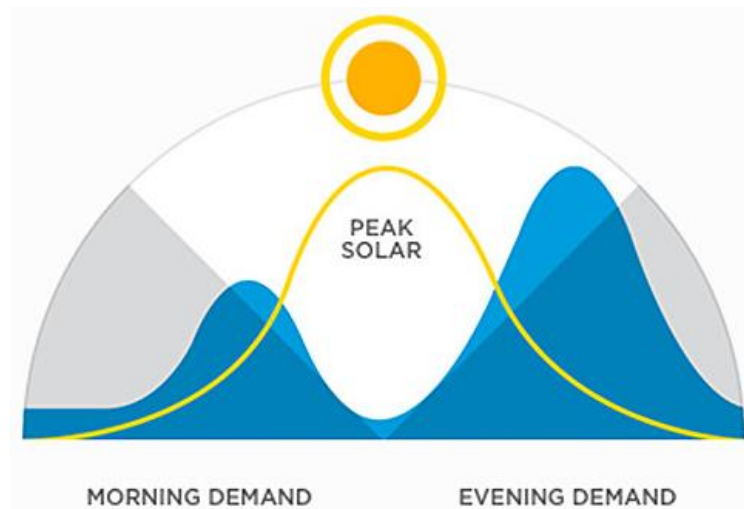


Figura23 . Diferencias entre el consumo y la producción a lo largo del tiempo [8]

1.4 Calefacción urbana geotérmica

La energía geotérmica ofrece una fuente de calor fiable y sostenible para los sistemas urbanos de calefacción urbana. Su aplicación depende principalmente de la temperatura del agua termal, que determina la tecnología y el método de integración:

Agua termal a alta temperatura ($>80\text{ }^{\circ}\text{C}$): esta categoría permite el suministro directo de calor a las redes de calefacción urbana sin necesidad de elevar adicionalmente la temperatura. Es la opción más eficiente, ya que el agua puede circularse directamente a los consumidores tras el intercambio de calor.

Agua termal a temperatura media ($40\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$): a estas temperaturas, es posible un uso directo parcial, pero a menudo se requieren bombas de calor para elevar la temperatura hasta cumplir con los estándares de la red. Este enfoque combina la energía geotérmica con tecnologías auxiliares para obtener un rendimiento óptimo.

Agua termal a baja temperatura ($<30\text{ }^{\circ}\text{C}$): El uso directo no es viable a este nivel. En su lugar, los sistemas de bombas de calor son esenciales para elevar el calor a una temperatura utilizable. Aunque esto requiere electricidad adicional, el sistema en su conjunto sigue siendo muy sostenible debido al carácter renovable de la fuente.

La flexibilidad en el aprovechamiento de la energía geotérmica la convierte en una pieza clave de las estrategias energéticas urbanas, lo que permite a las ciudades reducir su dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

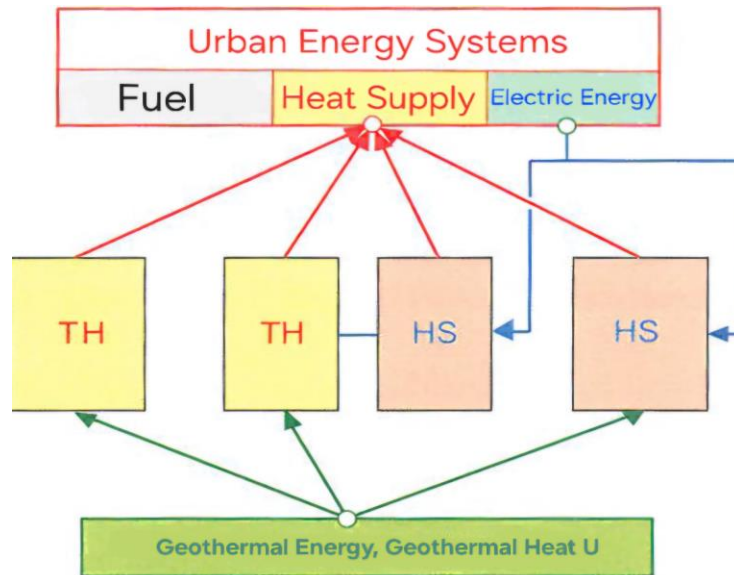


Figura24 Aprovechamiento de la energía geotérmica en los sistemas energéticos urbanos [2]

1.4.1 Métodos de integración en la calefacción urbana geotérmica

Los sistemas de energía geotérmica pueden diseñarse para un uso polivalente, lo que garantiza que el agua termal se utilice de la forma más eficiente posible. Una de las estrategias más eficaces es el aprovechamiento en cascada, en el que el mismo agua se emplea para múltiples aplicaciones de forma secuencial. Por ejemplo, el agua a alta temperatura puede suministrar primero calefacción urbana y, a continuación, utilizarse para procesos industriales o instalaciones de bienestar antes de su reinyección. Este enfoque maximiza la recuperación de energía y la viabilidad económica.

Este esquema ilustra cómo se puede utilizar el agua geotérmica en un sistema en cascada, en el que el mismo agua cumple múltiples funciones de forma secuencial. El agua a alta temperatura abastece primero a aplicaciones que requieren mayores niveles de calor, como la calefacción urbana, y luego pasa a usos a menor temperatura, como los servicios balneológicos (balnearios) o la calefacción para horticultura e invernaderos.

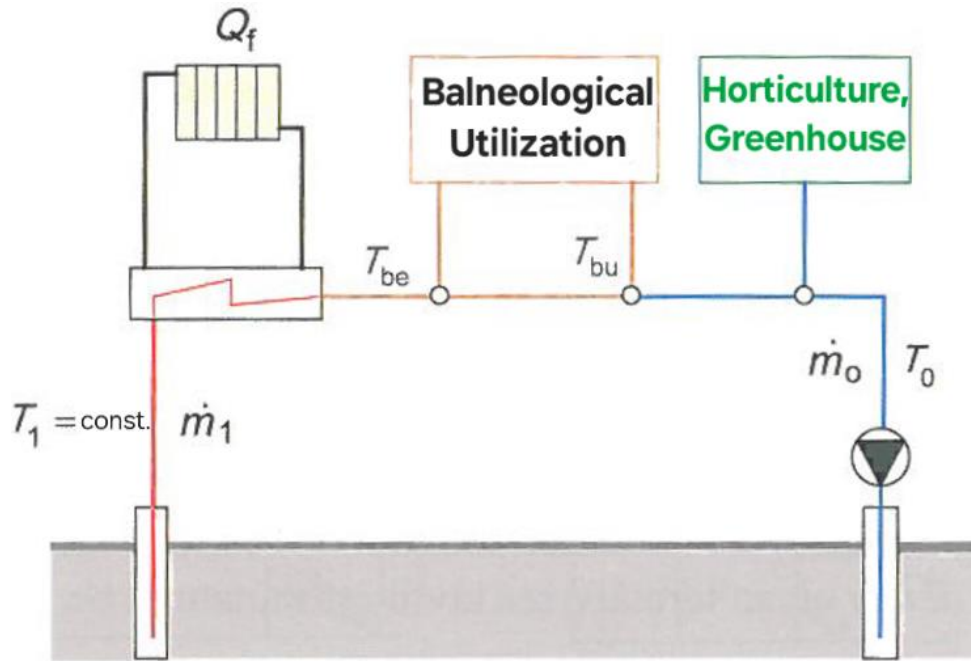


Figura25 . Aprovechamiento polivalente en cascada del agua termal [2]

Los sistemas geotérmicos de calefacción urbana utilizan agua termal extraída de yacimientos subterráneos profundos para suministrar calor a los consumidores urbanos. El proceso comienza con pozos de producción que suministran agua a alta temperatura, la cual se distribuye a continuación a través de una red diseñada para dar servicio a múltiples aplicaciones de calefacción. Para garantizar la estabilidad y la eficiencia, el sistema incorpora una unidad de almacenamiento de calor que actúa como amortiguador entre la producción y el consumo. Este almacenamiento equilibra las fluctuaciones de la demanda y mantiene una temperatura de suministro constante.

Desde el almacenamiento, el calor se transfiere a diversos circuitos de consumo. Los sistemas de radiadores convencionales reciben agua a temperaturas más elevadas, adecuadas para la calefacción de espacios en edificios residenciales y comerciales. Para aplicaciones que requieren temperaturas más bajas, como la calefacción por paredes y suelos, el sistema ajusta el suministro para optimizar el confort y la eficiencia energética. Estas configuraciones permiten que la energía geotérmica se integre a la perfección en las infraestructuras de calefacción existentes.

El diagrama también destaca los parámetros operativos clave. La temperatura de suministro (T_1) representa el calor suministrado desde la fuente geotérmica, mientras que la temperatura de retorno (T_0) indica la temperatura del agua tras el suministro de calor. La temperatura de salida (T_0) refleja el punto en el que el agua sale del circuito de consumo. Los caudales térmicos cuantifican la energía suministrada a los diferentes grupos de consumidores, y el caudal másico garantiza una circulación adecuada en todo el sistema.

Al combinar el almacenamiento de calor, el control de la temperatura y una distribución eficiente, la calefacción urbana por agua termal ofrece una solución sostenible para las necesidades energéticas urbanas. Reduce la dependencia de los combustibles fósiles, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y favorece la transición hacia las energías renovables en zonas densamente pobladas.

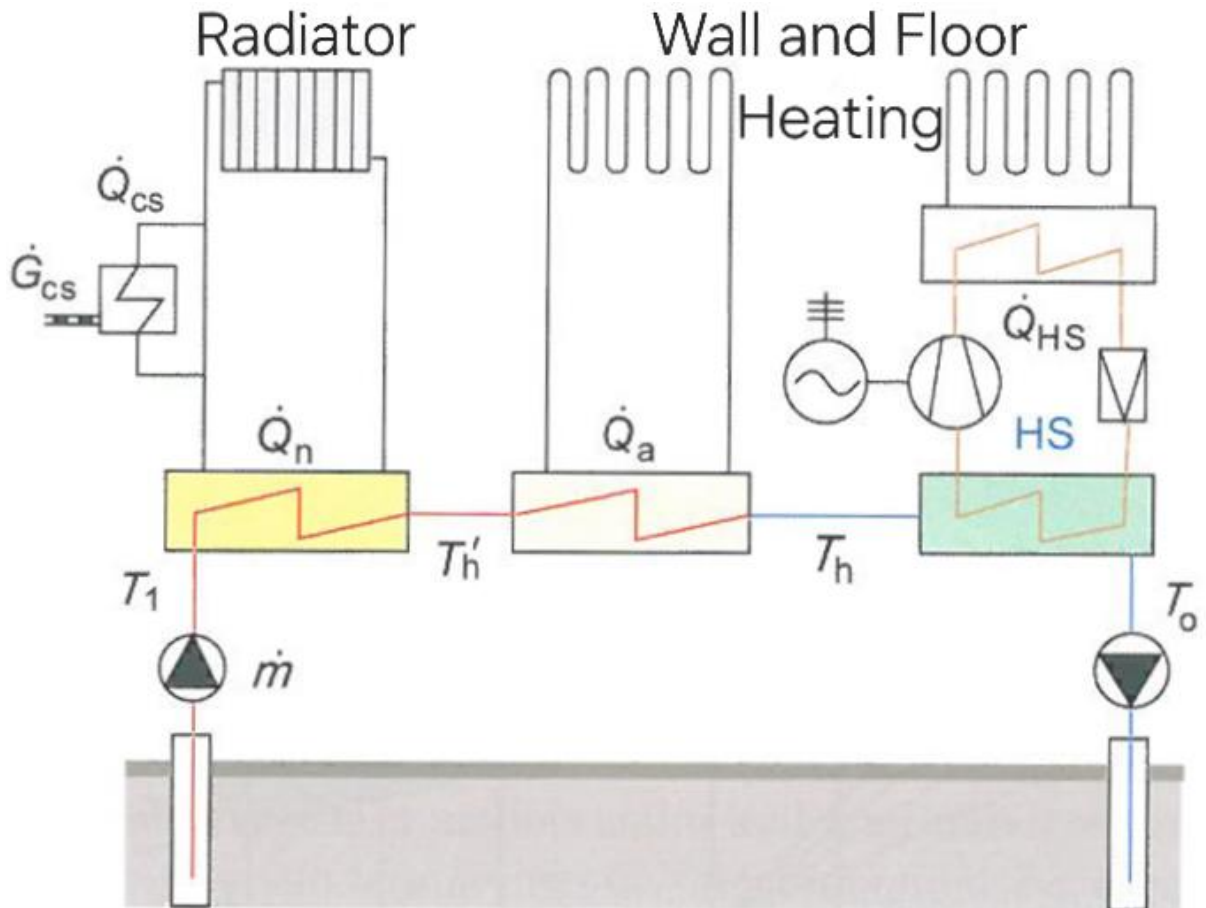


Figura26 . Calefacción urbana con agua termal [2]

El sistema de Geinberg, en Austria, ilustra este principio. El agua termal se utiliza primero para la calefacción de espacios, después para el agua caliente sanitaria y, por último, para servicios de balneario y bienestar. Al reducir progresivamente los requisitos de temperatura en cada etapa, el sistema logra una eficiencia óptima de los recursos.

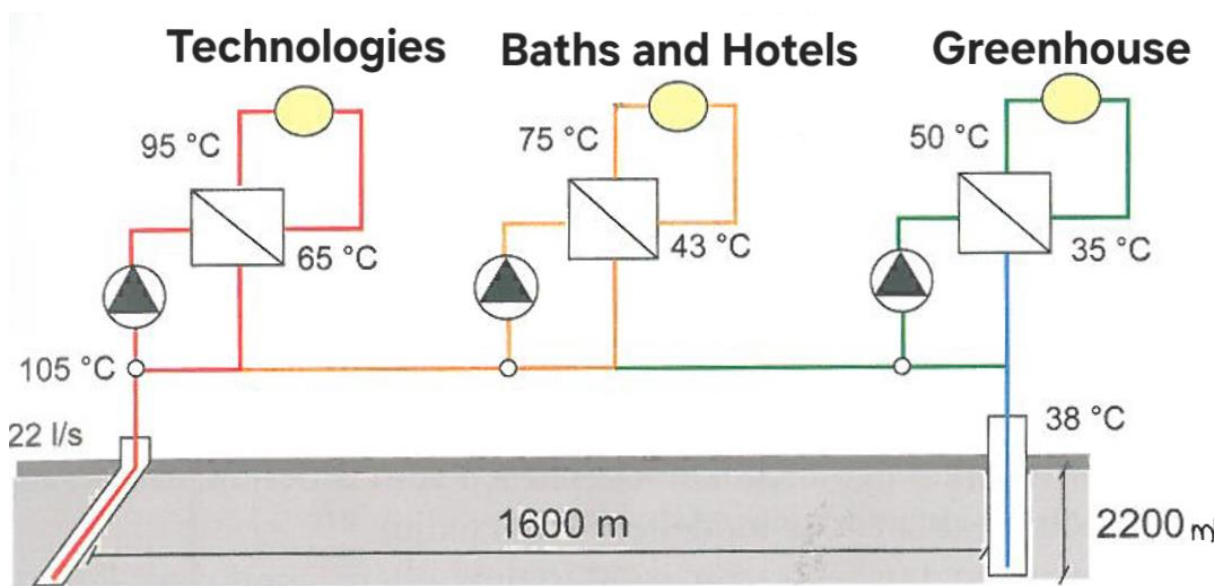


Figura27 . Conexión en cascada del aprovechamiento del agua termal en Geinberg [2]



1.4.2 Métodos de conexión de los consumidores

Los consumidores pueden conectarse a las redes de calefacción urbana geotérmica de tres formas:

- Conexión directa: el agua geotérmica fluye directamente al sistema de calefacción del consumidor. Se trata de un método sencillo, pero solo es adecuado cuando la calidad del agua es alta y el contenido en minerales es bajo.
- Conexión indirecta: los intercambiadores de calor separan el agua geotérmica del circuito de calefacción del edificio, lo que evita la corrosión y la formación de incrustaciones. Este es el método más habitual.
- Sistemas mixtos: combinan conexiones directas e indirectas, y se utilizan a menudo en grandes redes con necesidades diversas por parte de los consumidores.

Estas configuraciones permiten flexibilidad en el diseño del sistema, garantizando seguridad, fiabilidad y una distribución eficiente del calor.

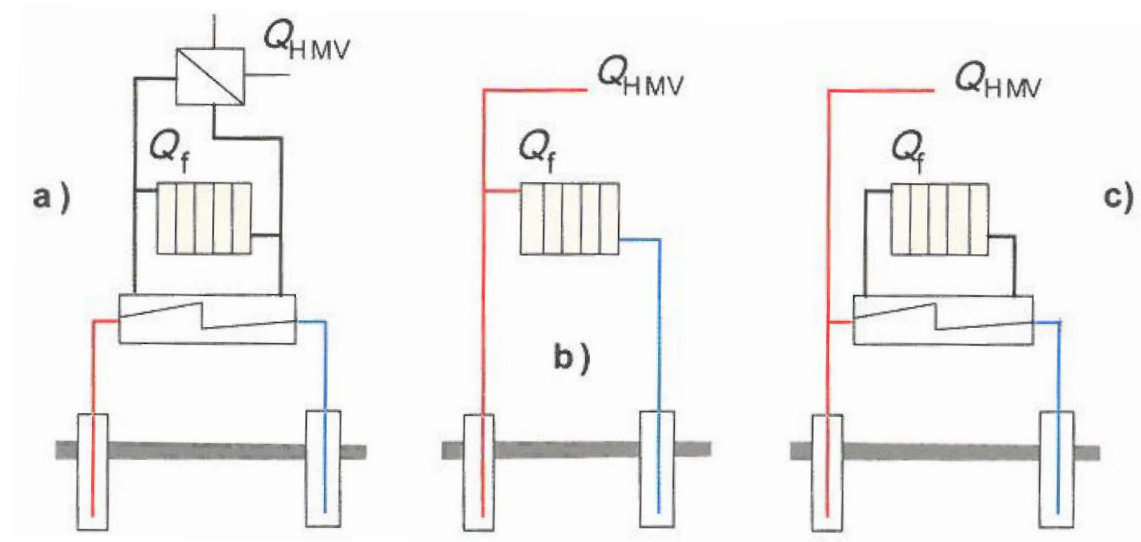


Figura28 . Conexión de los usuarios de forma directa (a), indirecta (b) y mixta (c) a la red de calefacción geotérmica [2]

1.4.3 Las posibilidades de utilización del agua dependen de su calidad y rendimiento

La utilización del agua geotérmica depende en gran medida de su calidad, temperatura y caudal, que determinan las aplicaciones más adecuadas. El agua con alto contenido en minerales puede servir para fines más allá de la calefacción, como usos medicinales y de bienestar, siempre que sus propiedades terapéuticas estén científicamente verificadas. Estas aplicaciones se basan en los beneficios demostrados de las sales minerales y los gases disueltos, lo que convierte al agua geotérmica en un recurso importante para el turismo de salud y las instalaciones de balneario.

Cuando el agua geotérmica presenta una entalpía elevada —lo que significa que tiene una temperatura y un contenido energético altos—, puede utilizarse para la generación de electricidad. Este proceso suele implicar pozos de producción que llevan agua caliente o vapor a la superficie, donde accionan turbinas en centrales geotérmicas. Estos sistemas son habituales en regiones tectónicamente activas con abundantes yacimientos geotérmicos.

En el caso del agua geotérmica de baja entalpía, donde las temperaturas son moderadas, la aplicación más práctica es la calefacción urbana. Estos sistemas utilizan la energía térmica directamente o en combinación con bombas de calor para proporcionar calefacción de locales y agua caliente sanitaria. Incluso el agua con temperaturas relativamente bajas puede potenciarse mediante la tecnología de bombas de calor, lo que la hace apta para las redes de calefacción urbanas.

Al adaptar las características del agua a las tecnologías adecuadas, la energía geotérmica puede aprovecharse de manera eficiente para múltiples fines —desde la generación de electricidad hasta la calefacción y el bienestar—, maximizando así sus beneficios económicos y medioambientales.

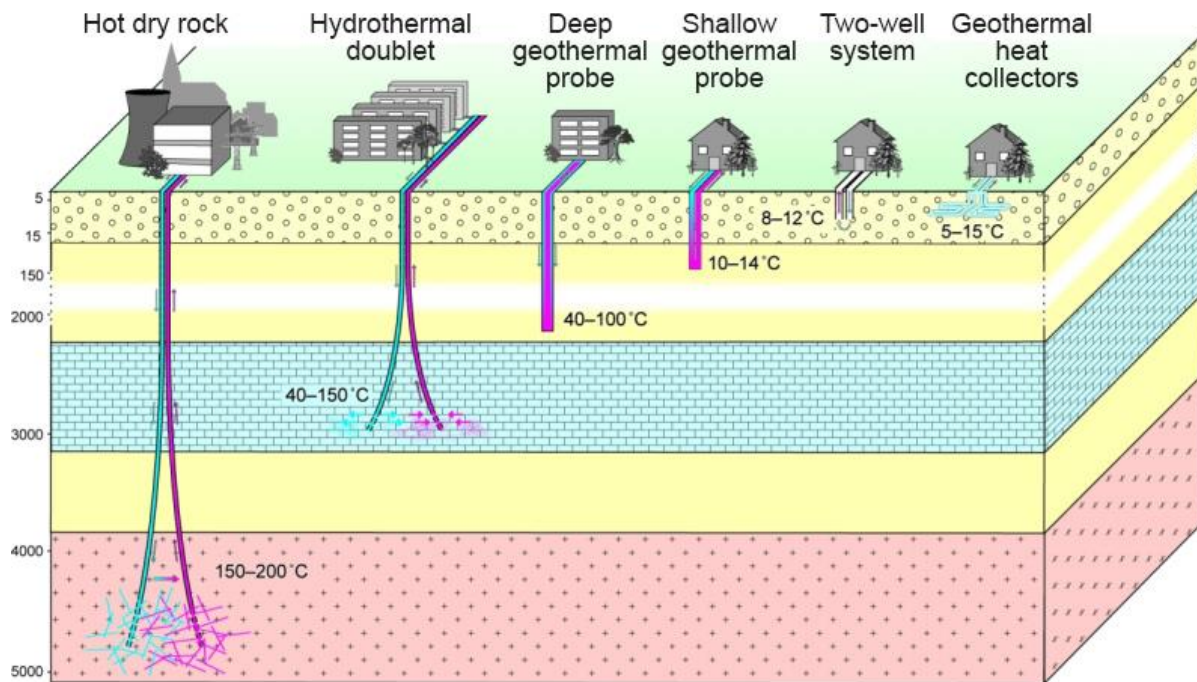


Figura29 . Diferentes métodos de aprovechamiento de la energía geotérmica en función de la profundidad de perforación y la temperatura [9]

1.4.4 Implantación de un sistema de calefacción urbana geotérmica

Junto con la biomasa, la energía geotérmica es una de las fuentes renovables más accesibles para la calefacción urbana. Su capacidad para proporcionar un suministro de calor estable y continuo la hace muy atractiva para los sistemas energéticos urbanos. Sin embargo, el establecimiento de un sistema de este tipo conlleva importantes retos y requiere una planificación cuidadosa.

El principal obstáculo es el elevado coste de inversión, debido principalmente a la perforación de pozos profundos y a la construcción de la infraestructura necesaria. Más allá de las consideraciones financieras, existe el riesgo de que el proyecto fracase parcial o totalmente, lo que a menudo se debe a incertidumbres geológicas. Es esencial realizar una estimación precisa del caudal y la temperatura del agua; si estos parámetros se calculan erróneamente, es posible que el sistema no ofrezca el rendimiento esperado.

Los proyectos geotérmicos suelen ubicarse en zonas tectónicamente activas, donde el gradiente geotérmico es favorable. Si bien esto aumenta el potencial de recursos a alta temperatura, también conlleva riesgos como los terremotos de tipo « » y, en algunas regiones, la actividad volcánica. Estos factores exigen una evaluación rigurosa del emplazamiento y un seguimiento continuo para garantizar la seguridad y la fiabilidad. A pesar de estos retos, una implementación satisfactoria ofrece beneficios a largo plazo: reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, precios energéticos estables y una fuente de calor renovable que favorece el desarrollo urbano sostenible.

1.4.5 Retos durante la implantación de un sistema geotérmico

La implantación de un sistema de calefacción urbana geotérmica conlleva no solo retos técnicos y financieros, sino también importantes riesgos medioambientales y geológicos. Una de las principales preocupaciones es la composición química de las aguas subterráneas geotérmicas, que pueden contener sustancias tóxicas como el arsénico. Si no se gestionan adecuadamente, estos contaminantes pueden migrar y contaminar los recursos subterráneos de agua potable, lo que supone graves riesgos para la salud. Para evitarlo, las prácticas de reinyección deben diseñarse y supervisarse cuidadosamente para garantizar que el agua extraída vuelva al yacimiento sin afectar a los acuíferos circundantes.

Otra cuestión crítica es la sismicidad inducida, o terremotos provocados por el ser humano, que pueden producirse cuando se inyectan grandes volúmenes de agua en formaciones geológicas profundas. Entre los ejemplos más destacados se encuentran Basilea (Suiza), donde un proyecto geotérmico provocó actividad



sísmica medible, y Staufen (Alemania), donde la reinyección provocó un levantamiento del terreno y daños estructurales en los edificios. Estos casos ponen de relieve la importancia de realizar evaluaciones geológicas exhaustivas y un seguimiento continuo durante la explotación.

Además, la presencia de minerales como la anhidrita —un compuesto de sulfato de calcio sin agua— puede complicar los procesos de perforación y reinyección. Cuando la anhidrita entra en contacto con el agua, puede transformarse en yeso, lo que provoca una expansión de volumen y puede dar lugar a deformaciones del terreno. Este fenómeno fue un factor que contribuyó al incidente de Staufen, donde el terreno se elevó varios milímetros al año.

Para hacer frente a estos retos se requiere una combinación de soluciones de ingeniería avanzadas, estrictas medidas de protección medioambiental y estrategias de gestión de riesgos. Si bien la energía geotérmica ofrece importantes beneficios para la calefacción sostenible, su implementación debe dar prioridad a la seguridad y la protección del medio ambiente para garantizar su viabilidad a largo plazo.

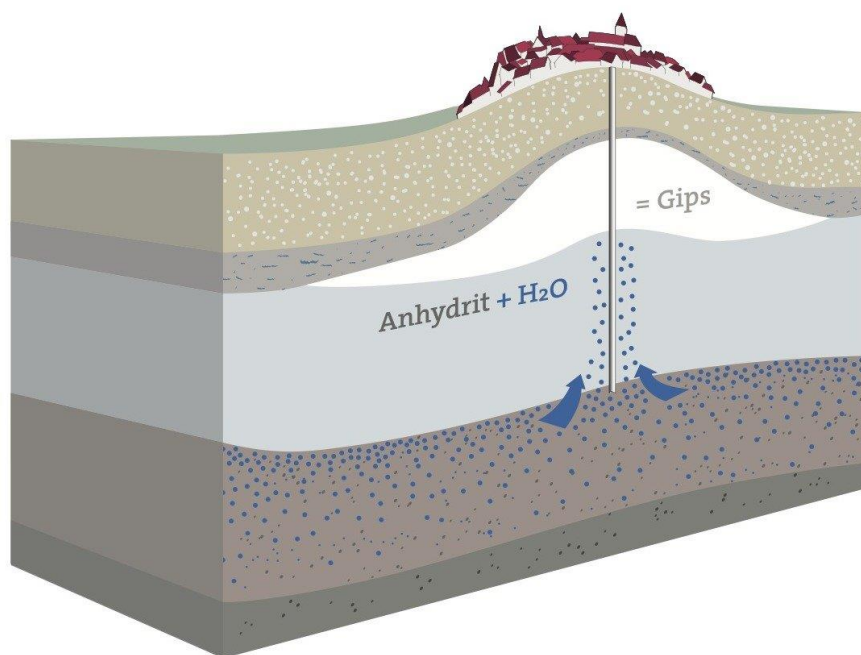


Figura30 . Dificultades causadas por la anhidrita en los sistemas geotérmicos [10]

1.4.6 El gradiente geotérmico

El gradiente geotérmico describe cómo aumenta la temperatura de la Tierra a medida que se gana profundidad bajo la superficie. Este aumento de temperatura es de aproximadamente 30 °C por kilómetro en la capa superior de la Tierra, conocida como litosfera. El gradiente no es uniforme, sino que varía en función de las condiciones geológicas. Las zonas con una corteza sólida más delgada o con actividad tectónica presentan gradientes más elevados, lo que las hace especialmente adecuadas para la extracción de energía geotérmica.

Para la calefacción urbana, suelen ser suficientes temperaturas del agua comprendidas entre 40 °C y 90 °C. Alcanzar los 90 °C, que se consideran el límite inferior para la producción de electricidad geotérmica, suele requerir perforaciones a una profundidad media de 3 kilómetros. Los pozos geotérmicos más profundos alcanzan actualmente profundidades de alrededor de 5 kilómetros, lo que permite acceder a temperaturas aún más elevadas para la generación de energía.

Comprender el gradiente geotérmico es esencial para planificar proyectos geotérmicos. Determina la profundidad de perforación, influye en los costes de inversión y ayuda a identificar las regiones con mayor potencial para la producción de calor y electricidad renovables.

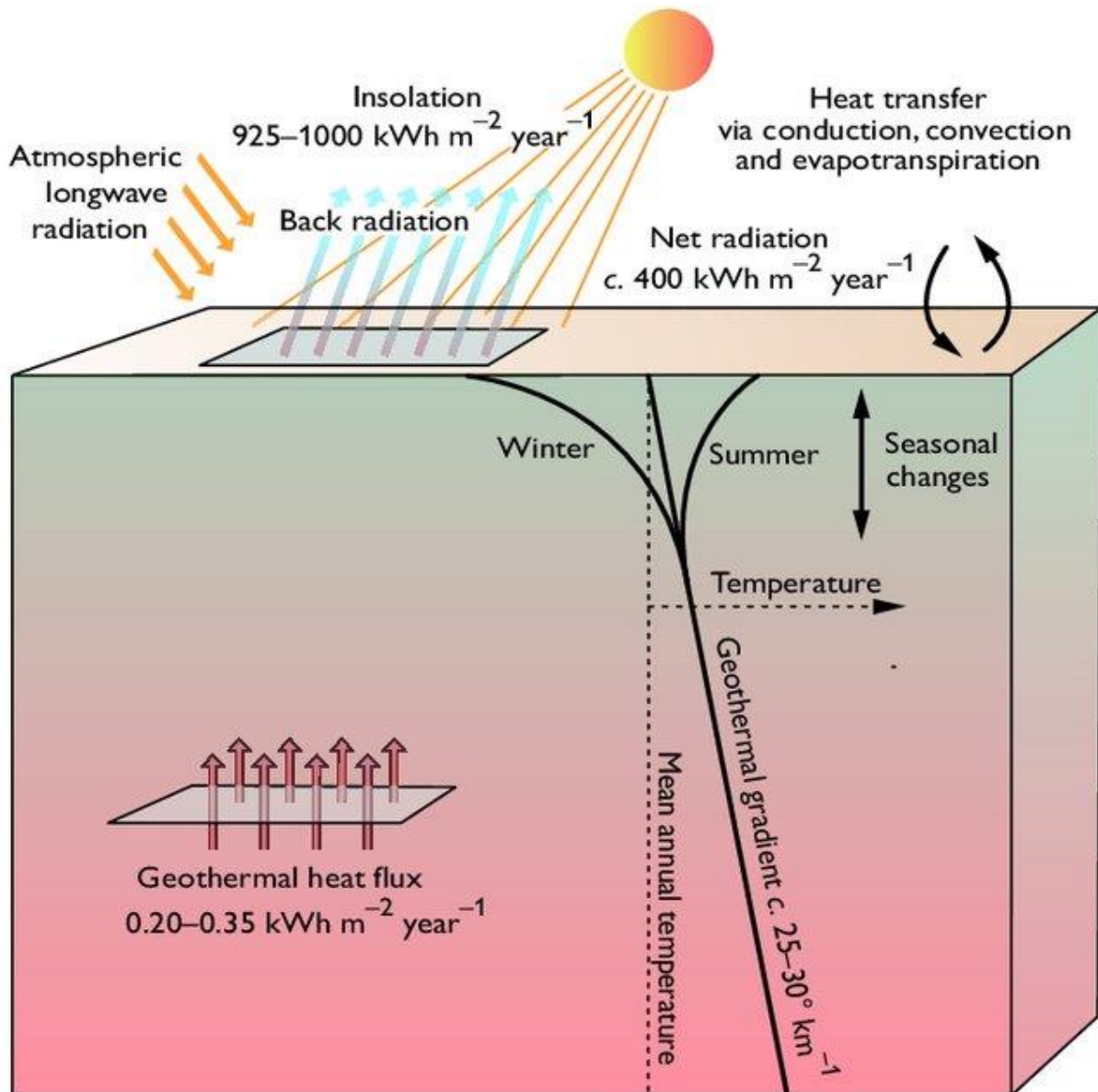


Figura31 . Diagrama esquemático en bloques que muestra el gradiente geotérmico y la magnitud del flujo de calor geotérmico y la insolación, con valores medios para Dinamarca, así como la zona estacional de fluctuación de la temperatura [11]

1.4.7 Mapa GeoDH: potencial geotérmico y calefacción urbana en Europa

El mapa GeoDH es una herramienta interactiva que proporciona información esencial para la planificación y la implantación de sistemas de calefacción urbana geotérmica en toda Europa. Combina tres conjuntos de datos clave:

1.4.7.1 Estimación de las fuentes de calor geotérmico

El mapa identifica regiones con un potencial geotérmico significativo, basándose en estudios geológicos y gradientes de temperatura. Esto ayuda a los promotores a localizar zonas en las que la perforación puede proporcionar calor suficiente para la calefacción urbana.

1.4.7.2 Sistemas de calefacción urbana geotérmica existentes

Los sistemas en funcionamiento están señalados en el mapa, lo que ofrece información sobre proyectos exitosos y buenas prácticas. Estos ejemplos sirven de referencia para nuevos desarrollos.

1.4.7.3 Mapa de demanda de calor

Al superponer el potencial geotérmico con la demanda de calor urbana, el mapa destaca las zonas en las que la energía geotérmica puede integrarse de forma más eficaz en las redes de calefacción urbana.



El mapa GeoDH abarca 14 países europeos que participan activamente en proyectos de calefacción urbana geotérmica:

Italia, Alemania, Francia, Países Bajos, Irlanda, Reino Unido, Eslovaquia, Eslovenia, República Checa, Rumanía, Bulgaria, Polonia, Dinamarca y Hungría.

Esta herramienta facilita la toma de decisiones estratégicas al alinear los recursos de energía renovable con las necesidades de los consumidores, promoviendo soluciones de calefacción sostenibles en toda Europa.



Figura32 : Mapa de la demanda de calefacción en Europa [12]

1.4.8 Potencial geotérmico en Hungría

Hungría se encuentra entre los países europeos con importantes recursos geotérmicos, lo que la convierte en un actor clave en la producción de calor renovable. Según datos de la Oficina Central de Estadística de Hungría (HCSO), en el año 2000 había aproximadamente 1 100 pozos de agua termal en funcionamiento. De ellos,

- 286 pozos tenían una temperatura de salida de entre 30 y 40 °C,
- 179 pozos proporcionaban entre 41 y 60 °C, y
- 121 pozos proporcionaban entre 61 y 90 °C.

Suponiendo una diferencia de temperatura de enfriamiento final de 15 K, el calor extraído anualmente se estimó en 30,4 PJ, lo que equivale al poder calorífico de 740 000 toneladas de petróleo crudo.

En 2015, el número de pozos había aumentado a 1.622, y la cantidad de agua termal extraída alcanzó los 24,608 millones de m³ al año, lo que corresponde a 2.509 TJ de energía térmica. Las estimaciones actuales para 2023 sugieren que Hungría cuenta con entre 1.750 y 1.800 pozos, lo que refleja un crecimiento continuo en el aprovechamiento de la energía geotérmica.

Para facilitar la planificación y el desarrollo, Hungría gestiona el Sistema Geotérmico Nacional (OGRE), una plataforma en línea que ofrece mapas y datos detallados sobre los recursos geotérmicos, los pozos existentes y los emplazamientos potenciales para nuevos proyectos (Mapa OGRE). Este sistema es una herramienta esencial para integrar la energía geotérmica en las redes de calefacción urbana y ampliar el suministro de calor renovable en todo el país.

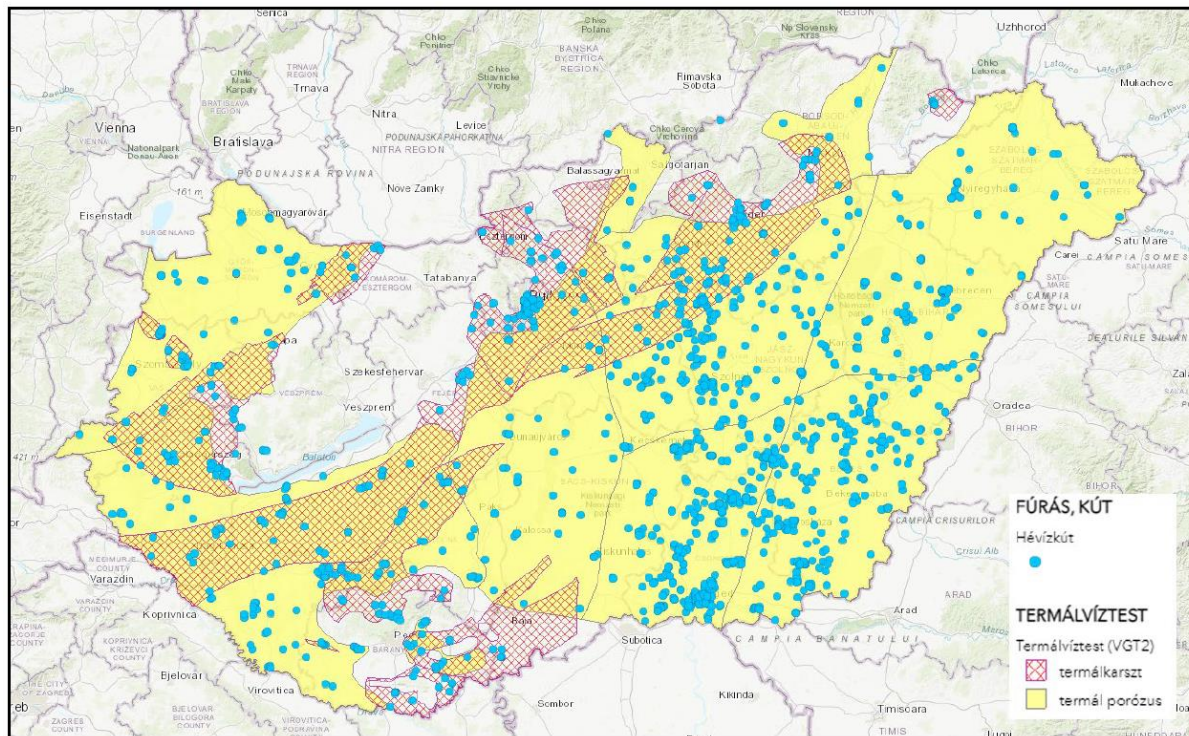


Figura33 . Masas de agua subterránea térmica y pozos activos en Hungría [13]

El siguiente mapa muestra la distribución geográfica de los pozos termales utilizados con fines balneológicos, agrícolas y de calefacción urbana. Destaca el desarrollo histórico de las redes de calefacción urbana geotérmica en ciudades del sur de Hungría, como Hódmezővásárhely, Szeged, Makó, Szentes y Kistelek, donde estos sistemas comenzaron a surgir a finales de la década de 1960.

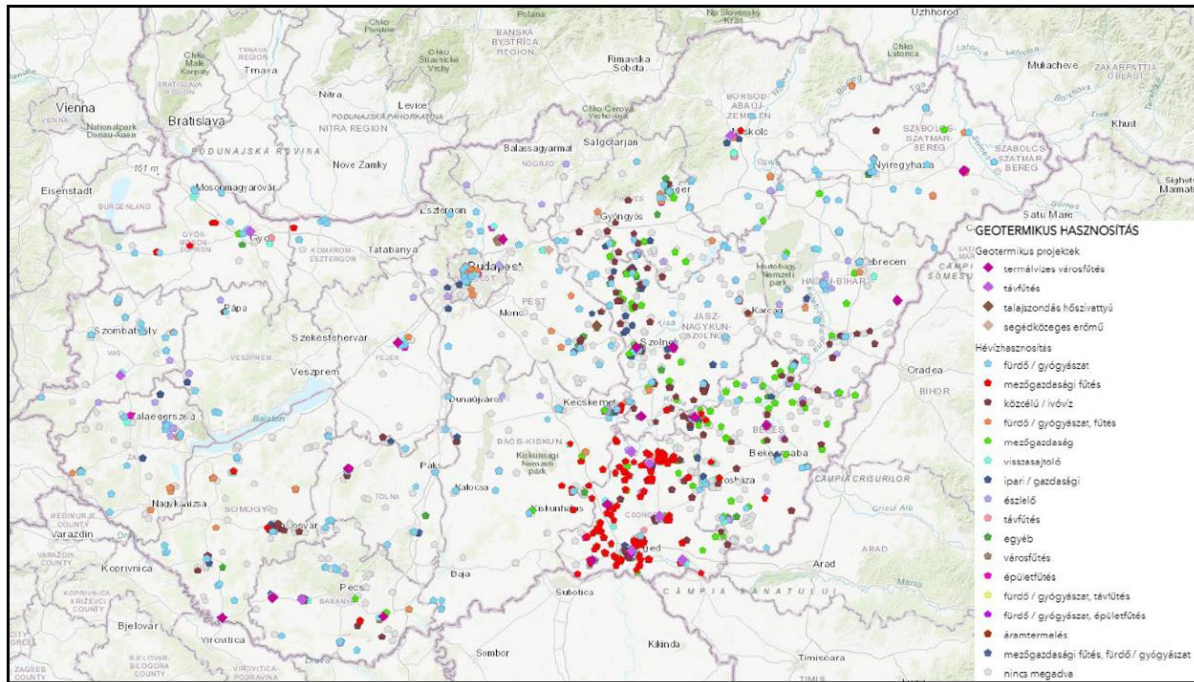


Figura34 . Tipos de uso del agua termal en Hungría [13]

El siguiente gráfico ofrece una visión general de cómo se utiliza actualmente la energía geotérmica en los diferentes sectores de Hungría. La mayor parte corresponde a la balneología, con 352 MW_t, seguida de la agricultura y la industria, con 325 MW_t, y la calefacción de edificios, con 220 MW_t. Las bombas de calor geotérmicas representan una parte menor, con 42 MW_t.

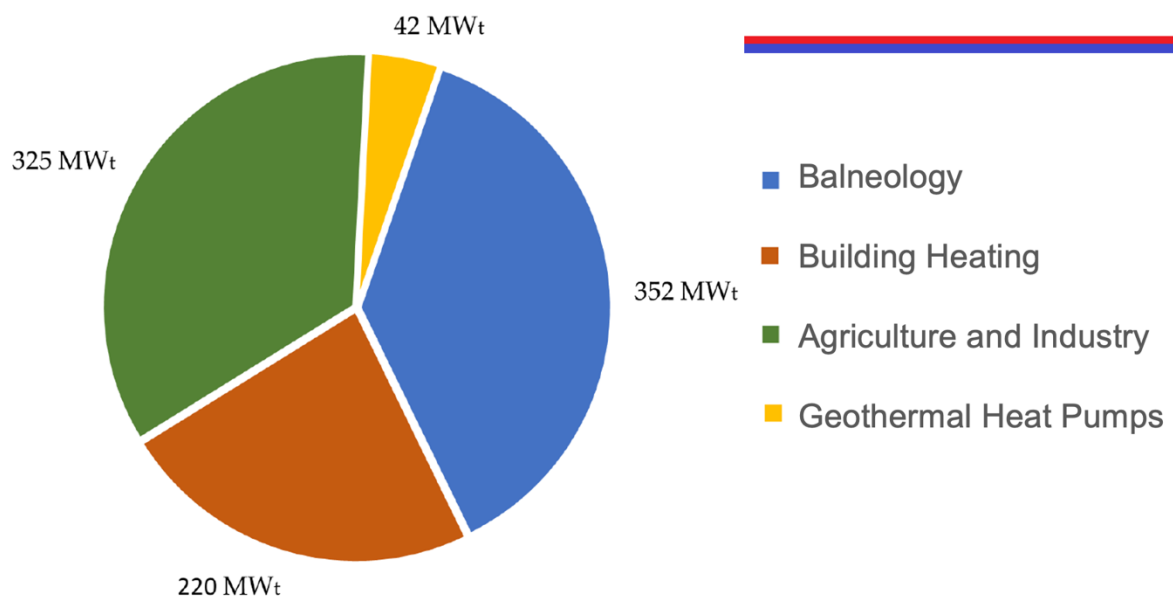


Figura35 . Energía geotérmica utilizada por los distintos sectores en Hungría [14]

1.5 Utilización de fuentes de energía renovables en la calefacción urbana: enfoque en la energía geotérmica

La energía geotérmica constituye una de las fuentes renovables más prometedoras para los sistemas de calefacción urbana, especialmente en regiones con un importante potencial geotérmico. La energía almacenada en la corteza terrestre, hasta una profundidad de aproximadamente 10 kilómetros, es inmensa:



se estima que sería suficiente para satisfacer la demanda energética mundial durante hasta seis millones de años, según los niveles de consumo actuales.

Sin embargo, a pesar de su abundancia teórica, la utilización práctica de la energía geotérmica está sujeta a varias limitaciones. Uno de los principales retos es la disminución de la intensidad térmica con el paso del tiempo. A medida que se explotan los yacimientos geotérmicos, la temperatura y la presión de la fuente pueden disminuir, lo que podría reducir la eficiencia y la viabilidad económica de las operaciones a largo plazo.

Otra consideración es la reubicación o el desplazamiento de las fuentes geotérmicas. La actividad geológica y los cambios en las condiciones del subsuelo pueden alterar la accesibilidad o la productividad de un yacimiento geotérmico. Esto plantea cuestiones importantes sobre la viabilidad económica de reubicar la infraestructura o desarrollar nuevos pozos en respuesta a dichos cambios.

En Europa Central, varios países ya han integrado la energía geotérmica en sus redes de calefacción urbana. El siguiente diagrama ilustra el número de sistemas de calefacción urbana situados cerca de yacimientos geotérmicos importantes.

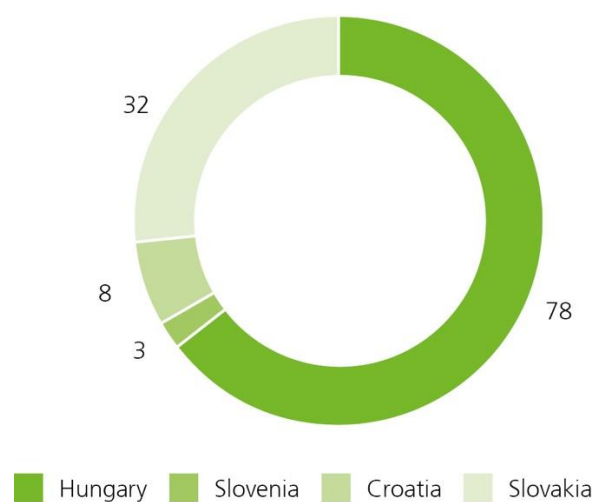


Figura36 . Número de sistemas de calefacción urbana cerca de yacimientos geotérmicos importantes [15]

1.5.1 Aspectos prácticos de la utilización de aguas subterráneas termales en sistemas de calefacción urbana

En los sistemas de calefacción urbana geotérmica, el calor se extrae de capas subterráneas profundas y se transporta a la superficie a través de fluidos geotérmicos. Estos fluidos suelen estar compuestos por: agua, sales disueltas, gases y sólidos en suspensión.

Debido a esta compleja composición, es necesario realizar una evaluación y unos ensayos minuciosos antes de que un pozo geotérmico pueda integrarse en una red de calefacción.

Para evaluar las características de producción de un pozo geotérmico, se lleva a cabo un proceso de bombeo de prueba. Esto implica un bombeo de limpieza al 40 %, 60 % y 80 % del caudal de agua previsto, con una duración mínima de 72 horas para cada fase. Durante este periodo, se miden parámetros clave, como el nivel de agua en reposo y la altura de la columna de agua. A partir de estas mediciones, se puede determinar el modo de funcionamiento del pozo:

- Modo positivo: el pozo funciona de forma autónoma, lo que permite que el fluido geotérmico fluya libremente hacia la superficie sin ayuda mecánica.
- Modo negativo: El pozo requiere un bombeo artificial, normalmente mediante bombas, ya que los niveles de agua estáticos y operativos no alcanzan la superficie de forma natural.

Con el tiempo, la mayoría de los pozos tienden a pasar al modo operativo negativo debido a la disminución de la presión y a los cambios en el yacimiento, lo que hace que la producción artificial sea esencial para su uso a largo plazo. Existen dos métodos principales para extraer agua termal de forma artificial:



1.5.1.1 Producción mediante bombas

Los sistemas basados en bombas son el método más utilizado en la actualidad debido a su eficiencia y capacidad de control. Estos sistemas suelen incluir:

- Bombas centrífugas multietapa o bombas sumergibles instaladas directamente en el pozo.
- Bombas equipadas con impulsores radiales o semiaxiales, integradas con un motor eléctrico.
- Sistemas de control de velocidad que regulan el rendimiento de las bombas para mantener los caudales y los niveles de presión deseados.

Las operaciones geotérmicas modernas se basan en un control automatizado y preciso de la extracción de agua, lo que garantiza un rendimiento eficiente desde el punto de vista energético y rentable. Las bombas sumergibles son especialmente apreciadas por su fiabilidad y su capacidad de adaptación a condiciones operativas variables.

1.5.1.2 Producción basada en compresores

En los sistemas basados en compresores:

- Se instalan tuberías de introducción de aire en el pozo.
- Se inyecta aire comprimido en la columna de agua, lo que reduce su densidad.
- Esta diferencia de presión permite que el fluido geotérmico ascienda a la superficie.

Aunque este método puede resultar eficaz, presenta limitaciones notables:

- El agua termal extraída contiene niveles más elevados de oxígeno disuelto, lo que puede afectar a los componentes del sistema y a la composición química del agua.
- No es adecuado para pozos con alto contenido en sedimentos, como el agua que transporta arena, debido al riesgo de obstrucción y abrasión.

1.5.2 Aumento del caudal de agua

En los sistemas de calefacción urbana geotérmica, mantener o aumentar el caudal de agua es esencial para satisfacer la creciente demanda de energía térmica. Existen varias intervenciones técnicas para mejorar el rendimiento de los pozos geotérmicos:

1. Acidificación: El tratamiento con ácido se utiliza para disolver los depósitos minerales y mejorar la permeabilidad de la formación rocosa que rodea el pozo. El proceso suele durar al menos 8 horas y puede aumentar significativamente el caudal de agua al eliminar obstrucciones y mejorar las vías de flujo.
2. Estimulación con explosivos: Este método consiste en la detonación de explosivos insolubles a gran profundidad dentro del pozo. Las ondas de choque fracturan la roca circundante, creando nuevos canales de flujo. Aunque es eficaz, esta técnica requiere una planificación cuidadosa y medidas de seguridad debido a su naturaleza invasiva.
3. Fracturación por capas: Se inyectan fluidos a alta presión en el pozo para eliminar la contaminación por arena y abrir las capas obstruidas. Esta estimulación hidráulica mejora la conectividad entre el pozo y el yacimiento geotérmico, lo que aumenta los caudales.
4. Para evaluar la eficacia de estas intervenciones y el rendimiento general del sistema geotérmico, se llevan a cabo ensayos hidrodinámicos. Estos consisten en: medir la presión, evaluar el caudal volumétrico y supervisar las variaciones de temperatura. Estos ensayos proporcionan una comprensión exhaustiva del sistema de suministro de agua y ayudan a optimizar los parámetros operativos para lograr una eficiencia a largo plazo.

1.5.3 Desgasificación del agua termal extraída

El agua geotérmica extraída suele contener componentes gaseosos separables, que deben gestionarse para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas de calefacción urbana. Los gases más comunes que se encuentran en el agua termal son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y nitrógeno (N_2).

1.5.3.1 Gestión de un bajo contenido en metano

En los casos en que la concentración de metano sea baja, el gas separado puede:



- Liberarse a la atmósfera, de conformidad con la normativa medioambiental,
- comprimirse y almacenarse en depósitos específicos para su posible uso posterior,
- Reinyectarse en el agua termal enfriada antes de que se devuelva al yacimiento.

Estos métodos ayudan a minimizar el impacto medioambiental y a mantener el equilibrio del sistema.

1.5.3.2 Aprovechamiento del alto contenido de metano

Cuando el contenido de metano es elevado, el gas separado puede utilizarse como fuente de energía. En tales casos, el metano suele:

- Recogido y alimentado a motores de gas,
- Se utiliza para la generación de electricidad in situ o en aplicaciones de cogeneración (CHP).

Este enfoque mejora la eficiencia energética global del sistema geotérmico y contribuye al uso de la energía renovable en múltiples formas.

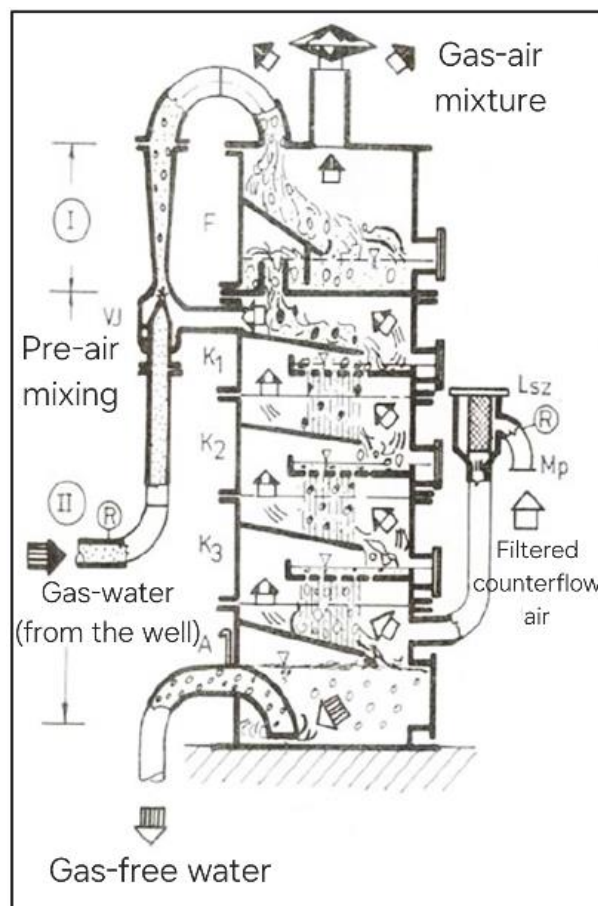


Figura37. El proceso de desgasificación del agua termal extraída [16]

1.5.4 Aprovechamiento de los pozos termales en Hungría

Hungría cuenta con una larga tradición en el aprovechamiento de la energía geotérmica, especialmente en el ámbito de la calefacción urbana y las infraestructuras públicas. Uno de los primeros usos documentados se remonta a la Budapest de la posguerra, donde el invernadero de palmeras del Jardín Botánico se calentaba mediante energía hidrotermal.

Posteriormente, surgieron edificios residenciales con calefacción geotérmica en Pest, especialmente en las inmediaciones del zoológico y el Jardín Botánico de Budapest. Estas primeras aplicaciones sentaron las bases para la inversión continuada de Hungría en tecnologías geotérmicas, lo que la convirtió en uno de los países líderes de Europa Central en cuanto a la utilización de pozos termales.



Figura38 . Invernadero de palmeras de Budapest con calefacción geotérmica [17]

1.5.4.1 El sistema de calefacción urbana geotérmica de Veresegyház

Veresegyház es un ejemplo notable de integración exitosa de la energía geotérmica en la infraestructura municipal. El desarrollo del sistema de calefacción urbana geotérmica comenzó en 1987, con la perforación del primer pozo de producción.

En 1992, el sistema se amplió para incluir un balneario, a lo que siguió la conexión de varios edificios públicos, como la escuela local, el centro comunitario y, más tarde, la Escuela Primaria de Mézesvölgy y la piscina municipal.

Un hito importante fue la construcción de un pozo de reinyección, que permitió un funcionamiento sostenible. Entre 2007 y 2010 se conectaron otras instituciones públicas y, en otoño de 2011, el sistema se amplió significativamente con:

- nuevos pozos de producción,
- casi 1 500 metros de tuberías,
- la conexión de aproximadamente 45 grandes consumidores.

Una característica única del sistema es su impacto en el confort urbano durante el invierno. Mientras que las tuberías de impulsión están aisladas, las de retorno no lo están y se encuentran enterradas a 1,5 metros de profundidad. Este diseño permite que el calor residual del agua termal utilizada derrita la nieve y el hielo de las aceras, manteniendo las zonas peatonales seguras y accesibles.



Figura39 . El sistema de calefacción urbana geotérmica antes y después de la renovación en Veresegyház [18]

Descripción general del sistema

- Longitud total de la red: 14,5 kilómetros
- Usuarios: instituciones públicas e instalaciones industriales
- Sustitución anual de gas: aproximadamente 2,2 millones de metros cúbicos

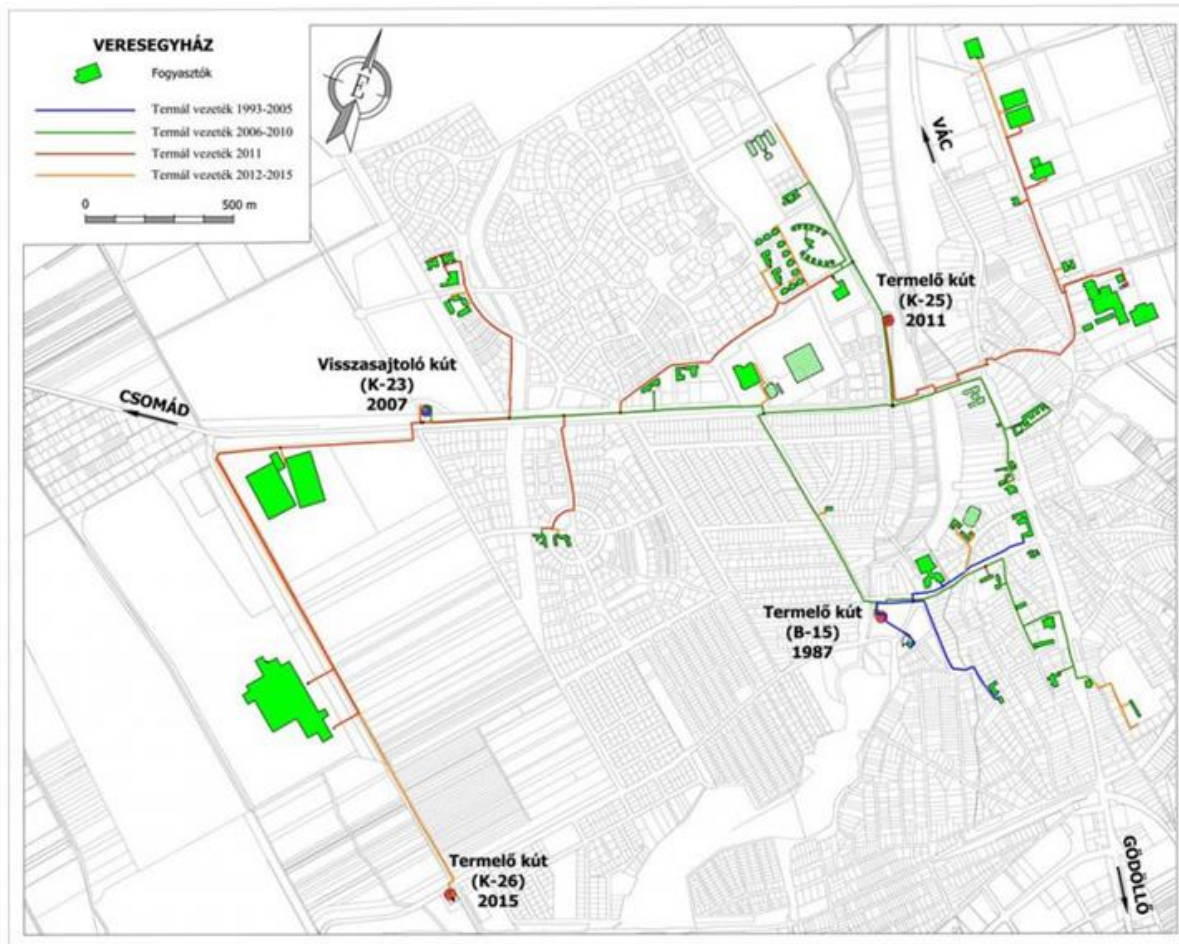


Figura40 . Extensión y desarrollo de la red de tuberías de agua termal en Veresegyház hasta 2016 [18]

Antecedentes financieros

El proyecto, con un coste total de unos 650 millones de HUF, ha sido posible gracias a una financiación del 60 % por parte de la Unión Europea y el Gobierno húngaro. El ayuntamiento ha aportado el 40 % restante mediante cofinanciación, lo que supone una contribución de 385 millones de HUF.

Este caso demuestra cómo la energía geotérmica puede utilizarse de forma eficaz no solo para la calefacción, sino también para mejorar las condiciones de vida urbanas y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

1.5.4.2 El sistema de calefacción urbana de Szeged

La ciudad de Szeged gestiona uno de los proyectos de calefacción urbana geotérmica más ambiciosos de Europa. La empresa de calefacción urbana de Szeged (SZETAV) suministra calefacción y agua caliente sanitaria a 27 256 viviendas, situadas principalmente en edificios residenciales de entre 4 y 10 plantas, y a 433 edificios públicos, entre los que se incluyen colegios, guarderías y locales comerciales.

Desde 2018, SZETAV y sus socios llevan a cabo la mayor renovación de un sistema de calefacción urbana geotérmica de Europa, pasando de los combustibles fósiles a la energía geotérmica renovable.

Descripción general del sistema

- 23 circuitos de calefacción
- Capacidad de las calderas: entre 1 y 12 MW por unidad
- Capacidad total instalada: 204,17 MW
- Producción energética anual: 843 700 GJ
- 239 centros de calor
- 215 km de red de tuberías



Hasta hace poco, el sistema dependía por completo del gas natural importado, lo que convertía a SZETAV en el mayor emisor local de CO₂. La transición a la energía geotérmica reduce significativamente este impacto medioambiental.

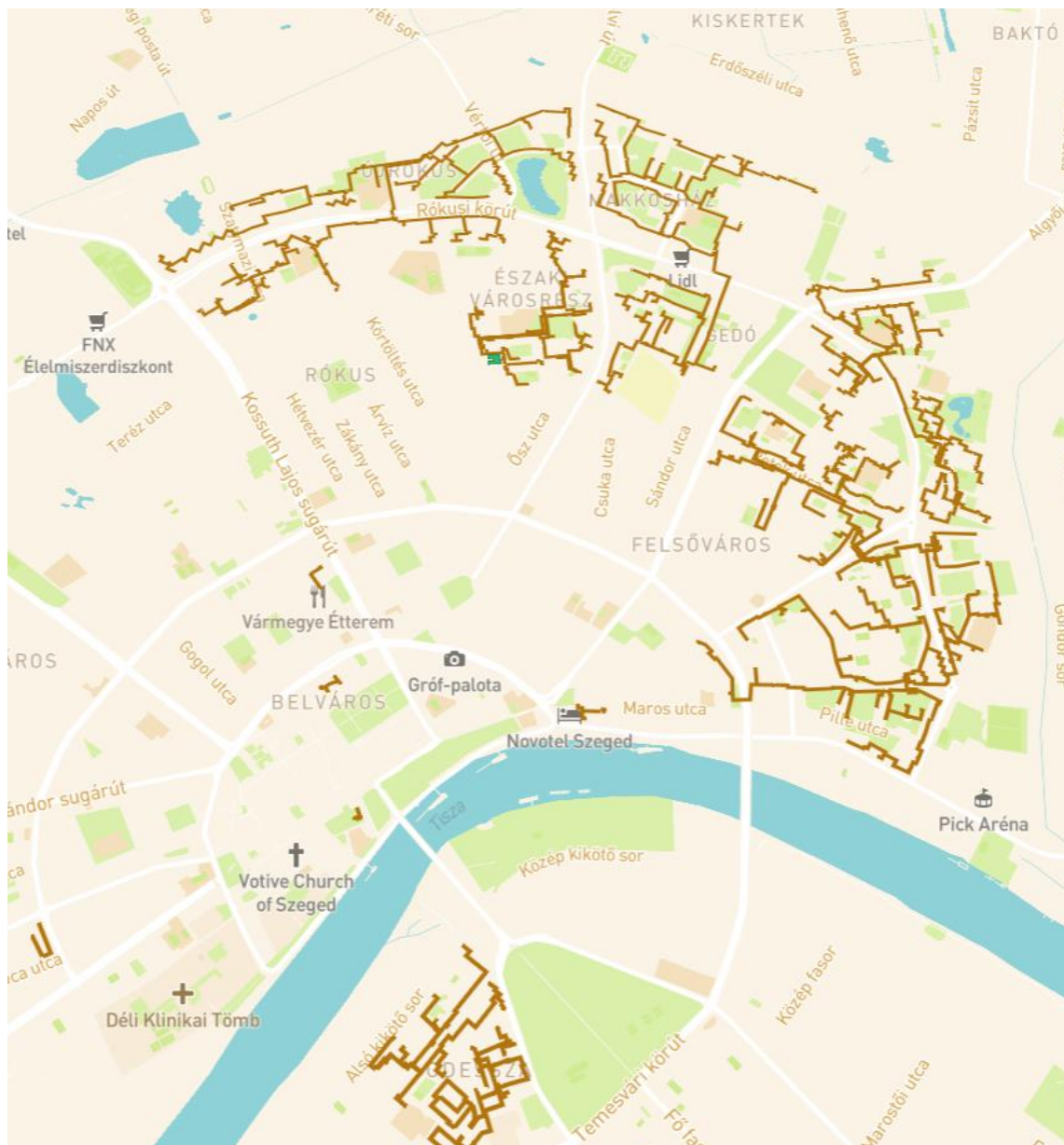


Figura41 . Sistema de calefacción urbana en Szeged[19]

Potencial geotérmico regional

En un radio de 50 km, nueve localidades utilizan energía geotérmica para la calefacción urbana, a partir de fuentes de entalpía media. La mayoría de los sistemas siguen un diseño con:

- 1 pozo de producción,
- 1-2 pozos de reinyección,
- Algunos sistemas también permiten usos balneológicos.

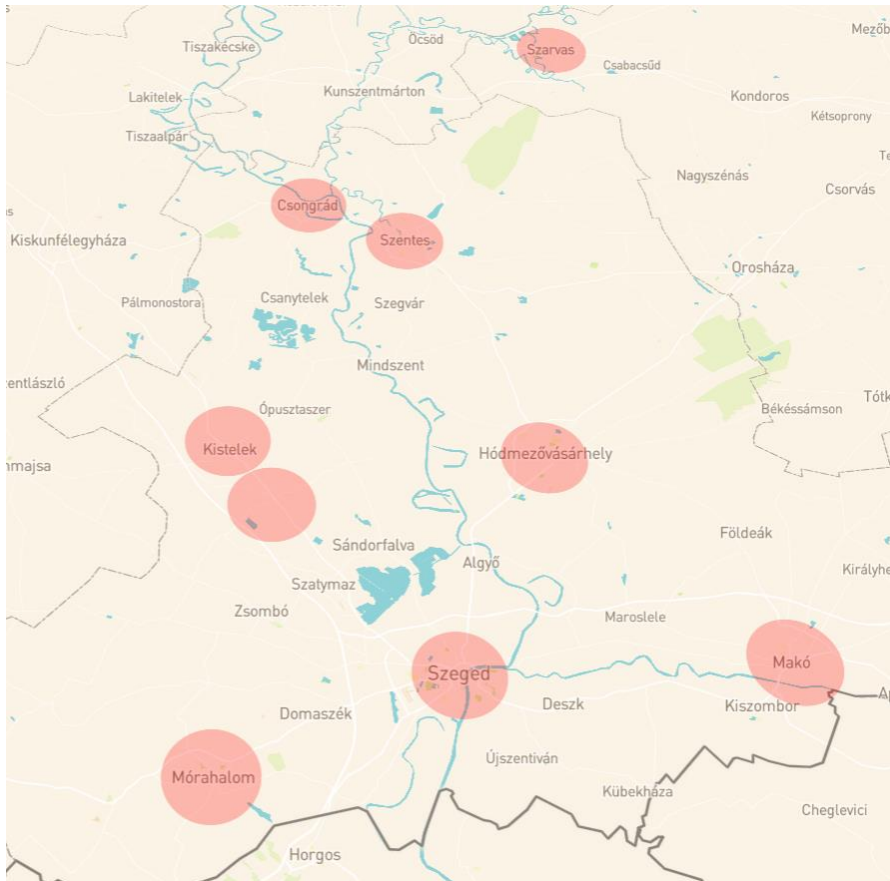


Figura42 . Sistemas geotérmicos instalados en localidades del sureste de Hungría [19]

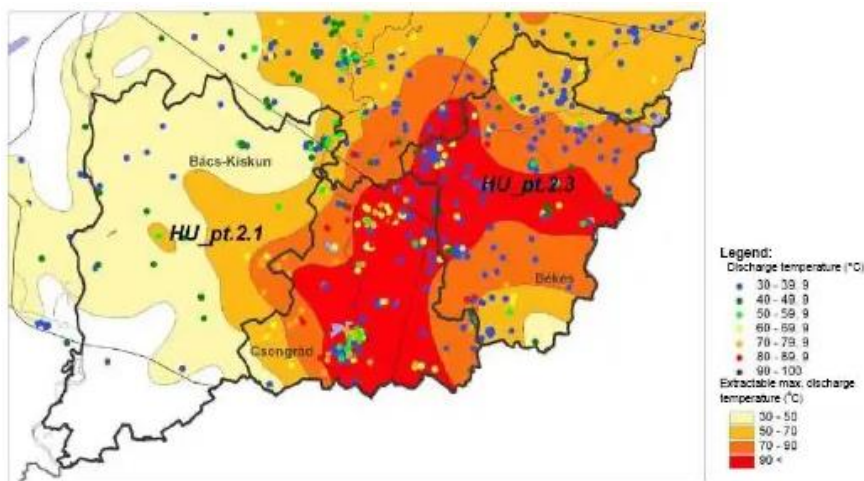


Figura43 . Temperatura del agua termal extraíble en el sureste de Hungría [19]

Desarrollo geotérmico en Szeged

En varios barrios —Felsőváros, la urbanización de Odessa, Tarján, Rókus y el centro de la ciudad— se están perforando pozos termales a profundidades de entre 1.700 y 2.000 metros. Estos pozos producen 70 m³/h de agua termal a temperaturas de 90 °C. Se están perforando un total de 27 nuevos pozos, con dos plataformas operando de forma continua.

Aprovechamiento energético



En el sistema de calefacción urbana geotérmica de Szeged, la energía térmica se extrae de pozos profundos y se transfiere a la red de calefacción a través de intercambiadores de calor. Es importante destacar que el agua geotérmica en sí misma no entra en el sistema de calefacción urbana y no se utiliza como agua caliente sanitaria. En su lugar, sirve únicamente como fuente de calor, lo que garantiza el mantenimiento de la calidad del agua y la integridad del sistema. El sistema está diseñado para maximizar la eficiencia y minimizar el impacto medioambiental. Con la implantación total de la calefacción geotérmica, la ciudad puede utilizar aproximadamente 606 958 gigajulios (GJ) de energía térmica al año, sustituyendo así a casi 20 millones de metros cúbicos de gas natural.

Impacto medioambiental y económico

La transición a la energía geotérmica en Szeged ha supuesto importantes beneficios medioambientales y económicos. El sistema logra una reducción anual de 595 887 GJ en el consumo de gas natural, lo que representa una disminución del 82 % en comparación con el consumo anterior. Esto se traduce en un ahorro de 17 525 718 metros cúbicos de gas natural al año, es decir, el 68 % del consumo anterior de la ciudad. En cuanto a las emisiones de carbono, el sistema geotérmico contribuye a una reducción de aproximadamente 39 299 toneladas de CO₂ al año, lo que supone una disminución del 65 % en las emisiones procedentes de la calefacción urbana. Estas cifras ponen de relieve la eficacia de la energía geotérmica a la hora de apoyar el desarrollo urbano sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados.

1.5.4.3 El sistema de calefacción urbana de Hódmezővásárhely

La ciudad de Hódmezővásárhely cuenta con una larga trayectoria en el aprovechamiento de la energía geotérmica. El primer pozo térmico se perforó en 1954, inicialmente con fines balneológicos. En 1967, se profundizó el pozo del hospital B913 y se reorientó su uso hacia aplicaciones de calefacción, lo que marcó el inicio del uso de la energía geotérmica en las infraestructuras públicas.

En 1993 se alcanzó un hito significativo, cuando se desarrolló oficialmente un sistema de calefacción urbana geotérmica. Durante las décadas siguientes, el sistema se expandió de forma constante. En 2016, había un total de ocho pozos geotérmicos en funcionamiento, que proporcionaban una capacidad térmica combinada de 23 957 kWh, equivalente a aproximadamente 7 555 petajulios (PJ) al año.

Este sistema geotérmico contribuye a un ahorro energético sustancial, sustituyendo alrededor de 5 millones de metros cúbicos de gas natural al año. La transición a la energía geotérmica renovable no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también favorece la sostenibilidad medioambiental y la eficiencia económica a largo plazo de la ciudad.

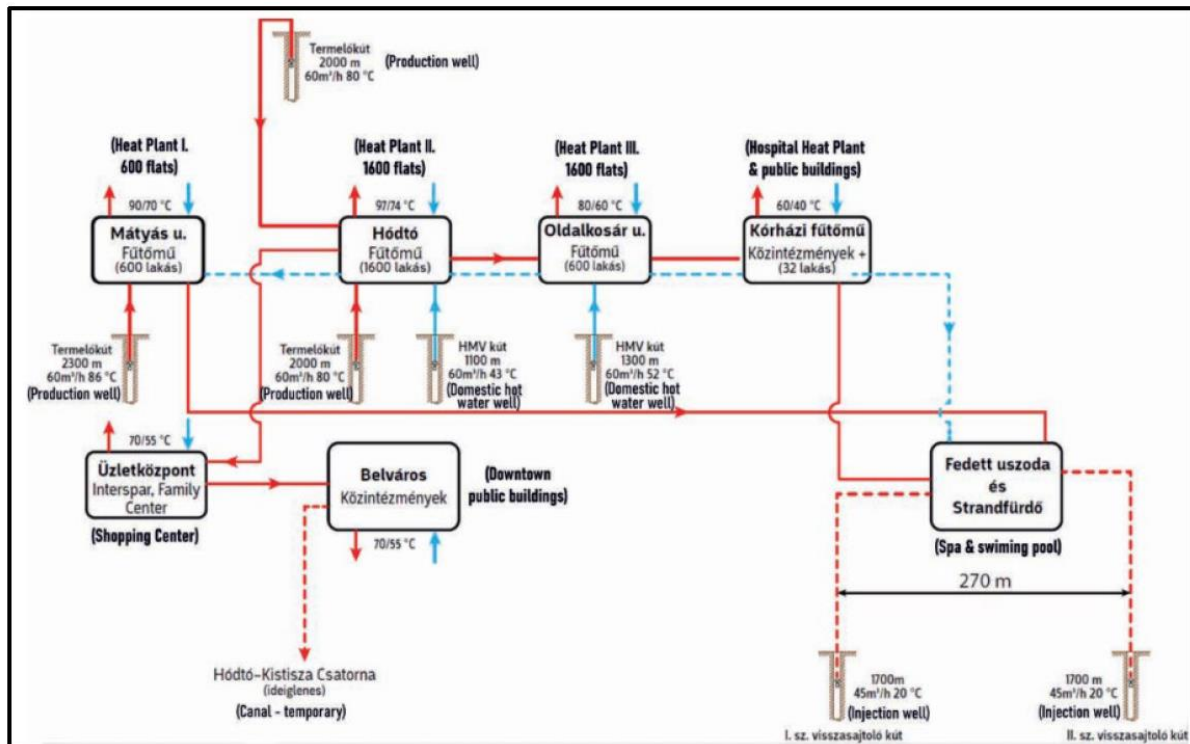


Figura44 . El sistema de calefacción urbana de Hódmezővásárhely [20]

1.5.4.4 Oportunidades para el aprovechamiento de la energía geotérmica en Budapest

La calefacción urbana desempeña un papel significativo en el panorama energético de Budapest, ya que representa aproximadamente el 10 % del consumo final de energía de la ciudad y contribuye al 8 % de sus emisiones totales de CO₂. Cada año, el sistema de calefacción urbana suministra entre 10 y 11 millones de gigajulios (GJ) de calor, lo que cubre aproximadamente el 30 % de la demanda total de calor de Budapest.

A pesar de esta cobertura sustancial, la proporción de energía renovable dentro del sistema sigue siendo baja. Actualmente, solo entre 1 y 1,1 millones de GJ —aproximadamente el 10-11 %— proceden de fuentes renovables, principalmente a través de la incineración de residuos. Por el contrario, la generación combinada de calor y electricidad (Cogeneración) domina el sistema, aportando 8 millones de GJ, es decir, entre el 70 y el 75 % del suministro total de calor.

Un objetivo estratégico clave a largo plazo para Budapest es reducir su dependencia del gas natural importado, que sigue siendo la principal fuente de energía para la calefacción urbana. La energía geotérmica representa una alternativa prometedora, dadas las condiciones favorables del subsuelo de Hungría. Aunque el gradiente geotérmico en Budapest no es excepcional, es suficiente para sustentar sistemas geotérmicos de entalpía media adecuados para la calefacción urbana.

Sin embargo, existen varios obstáculos que dificultan la puesta en marcha de proyectos geotérmicos en la capital. La falta de financiación y el marco normativo actual —que ofrece una baja rentabilidad de la inversión— dificultan este tipo de proyectos sin apoyo financiero externo. Además, la actividad de Budapest Spa and Thermal Baths Co. Ltd. (BGYH) supone un riesgo potencial para los proyectos geotérmicos, ya que el solapamiento en el uso del subsuelo podría dar lugar a conflictos por los recursos.

Para que un proyecto de calefacción urbana geotérmica sea viable en Budapest, deben cumplirse varias condiciones técnicas y económicas:

- El distrito no debe contar ya con instalaciones de producción de calor a partir de energías renovables.
- La fuente geotérmica debe permitir la cooperación, especialmente en lo que respecta a la compatibilidad de la temperatura del agua.
- Fuera de la temporada de calefacción, debe existir una demanda suficiente por parte de los consumidores que justifique el uso de grandes sistemas de almacenamiento de agua caliente.



- El pozo de producción, el pozo de reinyección, el intercambiador de calor y la red de tuberías deben estar ubicados de forma que resulten rentables.
- La demanda de calor del distrito debe ser lo suficientemente elevada como para justificar la inversión en infraestructuras de calefacción basadas en energías renovables.

Si se cumplen estas condiciones, la energía geotérmica podría convertirse en una pieza clave de la estrategia de calefacción sostenible de Budapest, contribuyendo a reducir las emisiones, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y garantizar la seguridad energética a largo plazo.

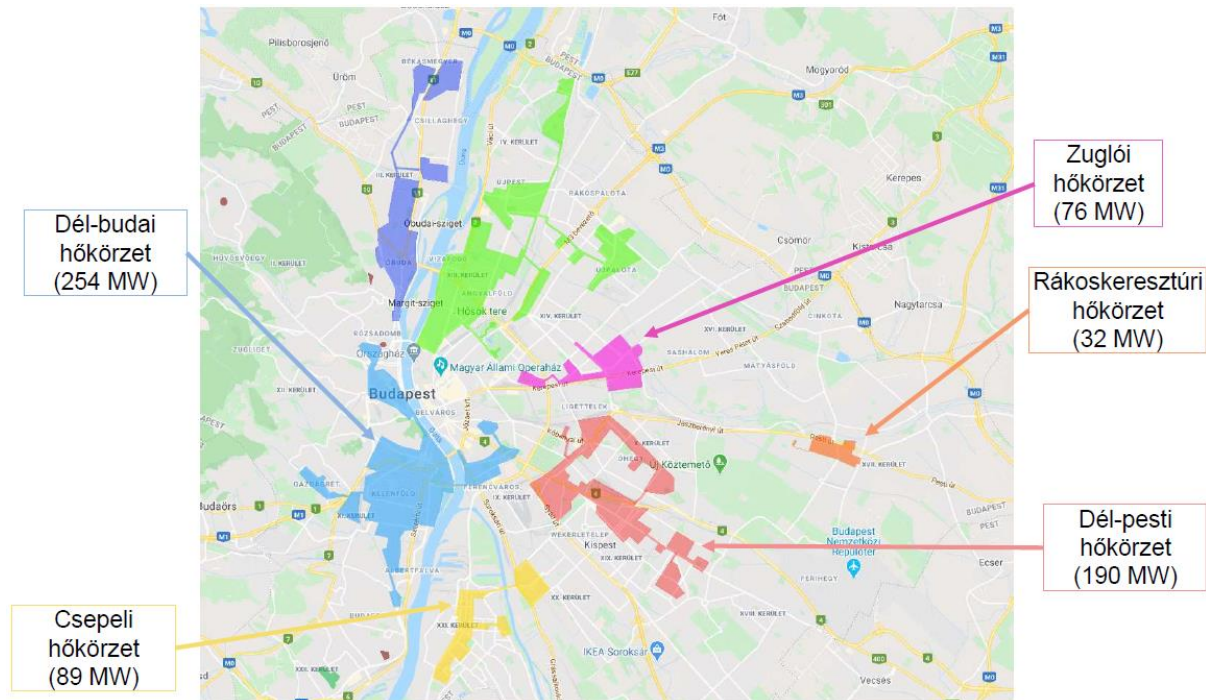


Figura45 . Distritos afectados por las solicitudes de permisos geotérmicos [21]

1.5.4.5 Proyecto geotérmico de Budapest en fase de preparación

Actualmente se está preparando en Budapest un proyecto de calefacción urbana geotérmica, centrado en la red de calefacción urbana de Dél-Pesti (Kispest–Kőbánya). El sistema se ha diseñado en torno a un único par de pozos de producción y reinyección, con una temperatura estimada del agua termal que oscila entre los 75 °C y los 90 °C. El caudal previsto por pozo es de 70 a 90 litros por segundo, lo que equivale a entre 250 y 320 metros cúbicos por hora, y la capacidad térmica prevista por pozo se sitúa entre 4 y 12 megavatios térmicos (MW_{th}), lo que se traduce en 120 a 360 terajulios (TJ) al año.

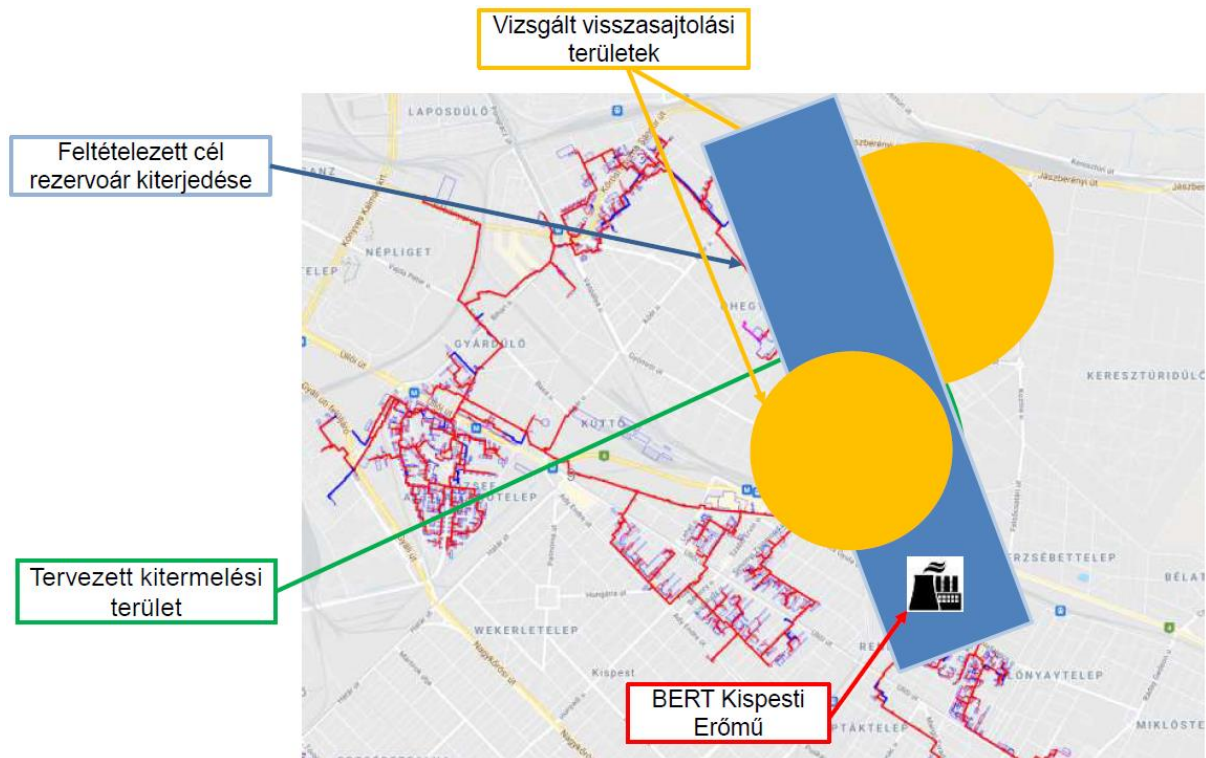


Figura46 . Sistema geotérmico previsto para la zona de calefacción urbana de Dél-pesti (Kispest) [21]

La puesta en marcha de este sistema geotérmico podría suponer una reducción de las emisiones de CO₂ de entre 6.700 y 20.200 toneladas al año, lo que contribuiría de manera significativa a los objetivos climáticos de Budapest.

El proyecto se está desarrollando en colaboración con ArcticGreen Energy (AGE) Corporation, una empresa islandesa especializada en soluciones de energía verde. La fuente geotérmica actuará como fuente de calor complementaria, funcionando en cooperación en serie con la central eléctrica de Kispest ya existente, que seguirá siendo responsable de la circulación, el mantenimiento de la presión y la regulación final del calor.

El calor geotérmico se inyectará en la tubería de retorno (DN600), con una capacidad de caudal que oscilará entre 300 y 800 m³/h durante la temporada de calefacción, y entre 250 y 400 m³/h en verano. Se han realizado simulaciones utilizando un caudal de 280 m³/h, con temperaturas del agua de 75 °C y 95 °C, para evaluar el rendimiento del sistema y la viabilidad de su integración.

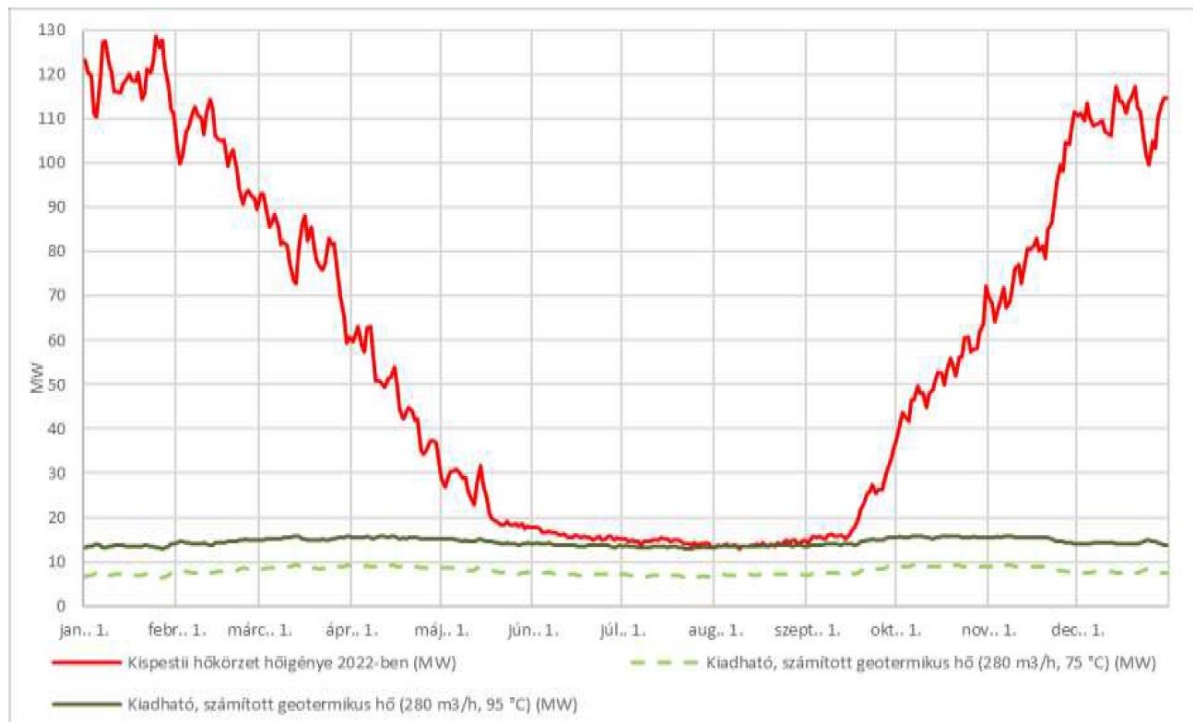


Figura47 . Demanda de calor en la zona de calefacción urbana de Kistarcs y la producción que puede suministrar la energía geotérmica [21]

Este proyecto representa un paso estratégico para reducir la dependencia de Budapest del gas natural y aumentar la cuota de las energías renovables en los sistemas de calefacción urbanos. Sin embargo, su éxito depende de una planificación cuidadosa, del apoyo normativo y de una cooperación eficaz entre las partes interesadas.

1.5.4.6 Potencial geotérmico preliminar calculado por INNARGI (Dinamarca) para cada distrito de calefacción

INNARGI, una empresa danesa dedicada al desarrollo y la explotación de proyectos geotérmicos — perteneciente al Grupo Maersk— ha llevado a cabo una evaluación preliminar del potencial geotérmico en varias zonas de calefacción de Budapest. La empresa cuenta con una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas de calefacción urbana geotérmica en Dinamarca, Alemania y Polonia, y ahora está explorando oportunidades en la capital húngara.

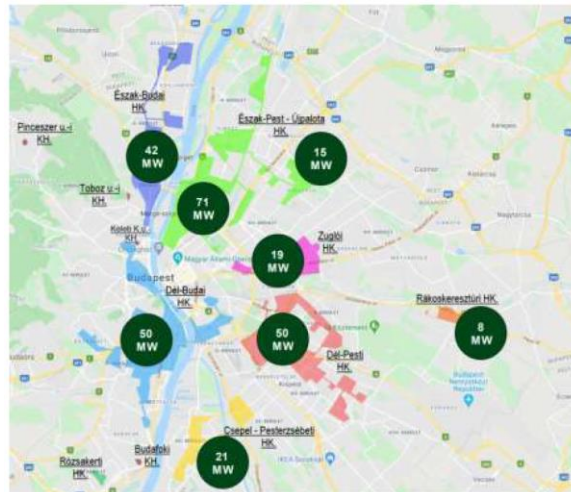


Figura48 . Potencial geotérmico calculado para cada distrito de calefacción[21]

El plan actual prevé la creación de dos fuentes de calor geotérmico y su integración en la red de calefacción urbana de Budapest. Se están llevando a cabo los trabajos preparatorios para identificar y evaluar ubicaciones adecuadas en los siguientes distritos:

- Zona de calefacción de Zuglói
- Zona de calefacción del sur de Pest (Kispest)
- Buda Sur
- Zona de calefacción del sur de Buda (Kelenföld)
- Zona de calefacción de Csepel

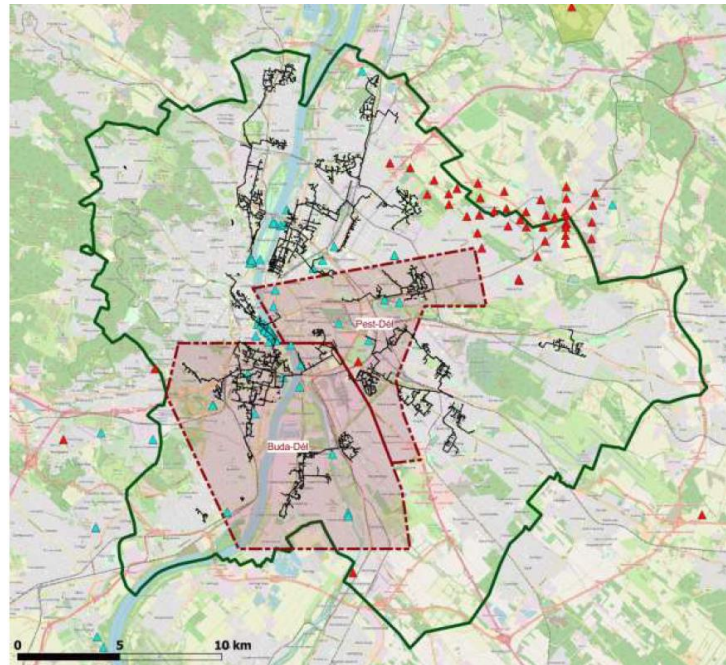


Figura49 . Red de calefacción urbana de Budapest [21]

Según los cálculos iniciales, la capacidad geotérmica total estimada para estas zonas es de aproximadamente 90 megavatios térmicos (MW_{th}), lo que equivale a 1.900 terajulios (TJ) al año. Si se implementaran plenamente, estos sistemas podrían lograr una reducción de las emisiones de CO_2 de hasta 100.000 toneladas anuales, lo que contribuiría de manera significativa a los objetivos climáticos y energéticos de Budapest.

Esta evaluación pone de relieve la importancia estratégica de la energía geotérmica para la descarbonización de los sistemas de calefacción urbanos y la reducción de la dependencia del gas natural importado. Sin embargo, el éxito de su implementación dependerá del apoyo normativo, la inversión financiera y la planificación coordinada entre las partes interesadas municipales y privadas.

1.5.4.7 Antecedentes geotérmicos de Rákoskeresztúr

En 2010, FŐTÁV, el proveedor de calefacción urbana de Budapest, convocó una licitación para la adquisición de energía geotérmica con el fin de abastecer parcialmente la zona de calefacción urbana de Rákoskeresztúr. El proyecto propuesto tenía como objetivo suministrar 65 terajulios (TJ) de calor geotérmico al año.

Sin embargo, en 2011, los cambios en el sistema nacional de tarificación de la calefacción urbana — concretamente, la introducción de la fijación anual de precios— llevaron al contratista seleccionado a solicitar a FŐTÁV una garantía bancaria por el total de los ingresos previstos durante el periodo de explotación de 15 años. La carga financiera que suponía esta garantía hizo que la inversión resultara inviable y, en consecuencia, FŐTÁV abandonó la puesta en marcha de la central geotérmica en Rákoskeresztúr.

A pesar de este contratiempo, el distrito sigue siendo un emplazamiento prometedor para el desarrollo geotérmico. La demanda máxima actual del sistema de calefacción urbana es de 32 megavatios (MW), de los cuales 4,5 MW ya se suministran a edificios municipales y 3,3 MW corresponden a la nueva demanda de instalaciones de propiedad municipal o gestionadas por el ayuntamiento.

El sistema geotérmico propuesto incluiría dos pozos, cada uno perforado a una profundidad de entre 1 800 y 2 000 metros, con una capacidad térmica estimada de 4 MW por pozo. En conjunto, los pozos podrían suministrar 8 MW de potencia térmica, lo que equivale a 170 TJ al año.

De llevarse a cabo, el proyecto podría lograr una reducción anual de las emisiones de CO₂ de aproximadamente 9.500 toneladas, lo que contribuiría a los objetivos climáticos y energéticos más amplios de Budapest. El caso de Rákoskeresztúr pone de relieve tanto el potencial como los retos de la integración de la energía geotérmica en los sistemas urbanos de calefacción urbana, y subraya la necesidad de contar con marcos financieros y normativos que lo respalden.

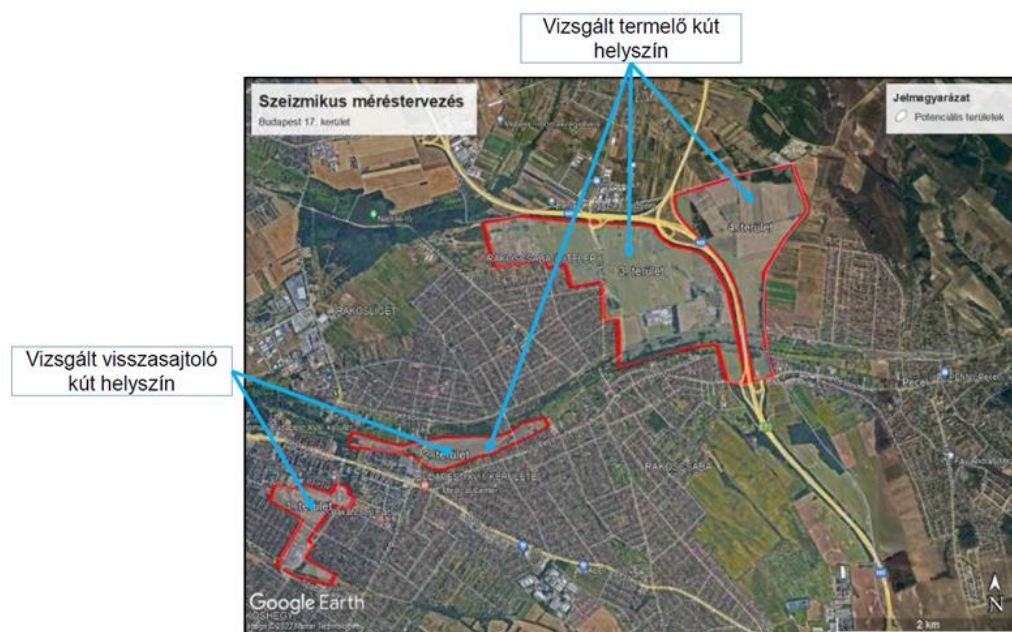


Figura50 . El proyecto geotérmico de Rákoskeresztúr previsto actualmente [21]

1.5.4.8 Energía renovable y energía procedente de residuos en la combinación de fuentes de calor de FŐTÁV.

En 2022, la combinación de fuentes de calor estuvo dominada por el gas natural, con un 62 % de la energía térmica generada mediante cogeneración (CHP) y un 27 % a través de sistemas basados en calderas. Solo el



11 % procedía de la cogeneración a partir de residuos (W2E), lo que indica una participación limitada de las fuentes de energía renovables y alternativas.

Según la estimación conservadora para 2025-2026, se espera que la cuota de la energía geotérmica aumente hasta el 12 %, mientras que la cogeneración a base de gas natural y la calefacción mediante calderas se reducirían al 55 % y al 20 %, respectivamente. La energía a partir de residuos aumentaría ligeramente hasta el 13 %.

En el escenario optimista para 2027-2028, la energía geotérmica podría alcanzar el 20 % de la combinación total de calor. Esto reduciría aún más la cuota de la cogeneración a base de gas natural hasta el 48 %, y la del calor de calderas hasta el 19 %, mientras que la valorización energética de residuos se mantendría estable en el 13 %.

Estas proyecciones apuntan a un cambio significativo hacia las fuentes de energía renovables, en particular la geotérmica, en el sistema de calefacción urbana de Budapest. Tal y como se indica en el diagrama, esta transición podría suponer un ahorro en los costes de los derechos de emisión de CO₂ de al menos entre 400 y 500 millones de HUF al año, lo que pone de relieve tanto los beneficios medioambientales como los económicos de diversificar la combinación de fuentes de calor.

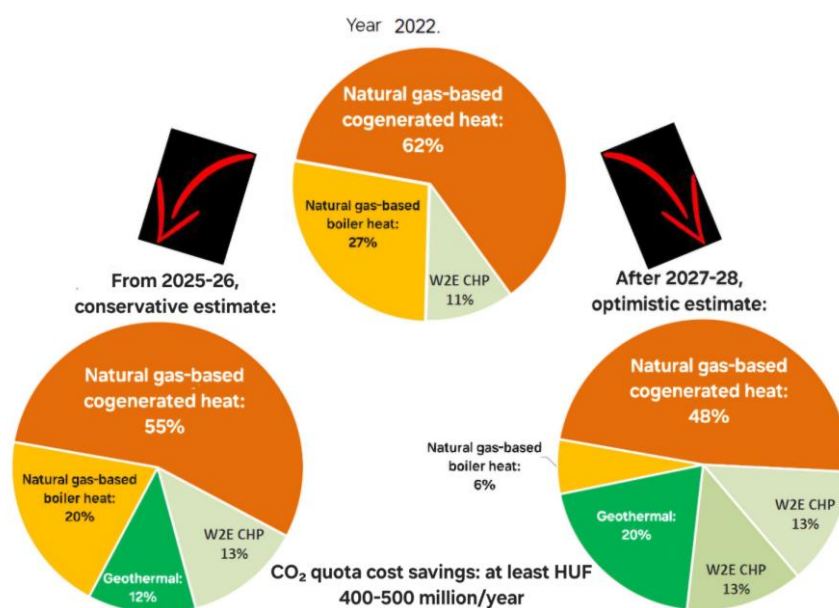


Figura51 . Energía renovable y energía procedente de residuos en la combinación de fuentes de calor de FŐTÁV en 2022 y en el futuro [21]



2. Aprovechamiento del calor residual y bombas de calor

2.1 Antecedentes sobre el calor residual

El calor residual es la energía térmica que se genera pero no se aprovecha de forma eficaz en procesos industriales, comerciales o residenciales. Este calor suele perderse al medio ambiente a través de gases de escape, fluidos de refrigeración, etc. Sin embargo, aunque estas corrientes de calor se consideran residuos, a menudo contienen grandes cantidades de exergía y podrían aprovecharse mediante alguna de las numerosas tecnologías de aprovechamiento del calor residual [1]. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático considera que las tecnologías de recuperación de calor residual son una herramienta para mejorar la eficiencia energética [2], reduciendo el consumo de energía de los procesos industriales y, por lo tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero. De este modo, el calor residual representa una oportunidad para mejorar la eficiencia energética que, a menudo, no se aprovecha.

2.2 Clasificación del calor residual

El calor residual puede clasificarse en función de su **origen**, ya que diferentes procesos industriales, comerciales y naturales generan un exceso de calor a distintas temperaturas. A continuación se presenta una clasificación basada en las principales fuentes:

1. **Calor residual industrial:**
 - a) Fabricación de acero, cemento y vidrio.
 - b) Industria química y refinería de petróleo.
 - c) Procesamiento de alimentos y producción de papel.
2. **Calor residual de la generación de energía:**
 - a) Centrales térmicas (carbón, gas natural, biomasa).
 - b) Motores de combustión interna y turbinas de gas.
3. **Calor residual comercial y residencial:**

Sistemas de climatización, refrigeración y calentamiento de agua.
4. **Calor residual del transporte:**

Gases de escape de los motores y pérdidas por fricción en los vehículos.

Incluso el calor residual de fuentes renovables podría considerarse calor residual, ya que incluso los sistemas de energía renovable generan calor residual que puede recuperarse. En función del nivel de temperatura, el calor residual puede clasificarse en diferentes niveles según su utilidad y el potencial de recuperación. La clasificación suele dividirse en tres o cuatro categorías (fig. 52):

Calor residual a baja temperatura (<100 °C)

Ejemplos: gases de escape de torres de refrigeración y sistemas de climatización; calor residual de aguas residuales industriales; calor de sistemas de refrigeración y aire acondicionado; gases de combustión a baja temperatura (p. ej., procesamiento de alimentos, fábricas de cerveza).

Calor residual a temperatura media (100 °C – 300/400 °C)

Ejemplos: gases de escape de motores de combustión interna y turbinas; calor residual de calderas, hornos y procesos de secado; operaciones de procesamiento químico y refinería; procesos de fundición de acero y metales.

Calor residual de alta temperatura (>300/400 °C)



Ejemplos: Gases de escape de las industrias siderúrgica, cementera y del vidrio; calor procedente de la fundición y el refinado de metales; gases de combustión de centrales eléctricas e incineradoras; hornos y reactores de alta temperatura.

Ultra-low-grade (T_{amb} -60)	Low-grade (60-100 °C)	Medium-grade (100-400 °C)	High-grade (>400 °C)
- Data centers - Energy storage system - HVAC facility - Waste water sewage - Geothermal - Biologic decomposition - Solar thermal	- Internal combustion engine (jacket coolant) - Industrial process stream (manufacturing) - Hydrothermal - Anaerobic digestion	- Internal combustion engine (exhaust gas) - Power plant exhaust - Industrial process stream (chemical & food) - Geothermal (volcanic areas) - Fermentation processes	- Industrial process stream (iron & steel) - Power plant exhaust (gas turbine) - Incineration processes

Fig. 52. Calor residual clasificado por nivel de temperatura.

Por último, en lo que respecta al calor residual, hay pocos datos disponibles. El Departamento de Energía de EE. UU. publicó en 2008 un informe sobre la recuperación de calor residual [3] en el que se afirma que entre el 20 % y el 50 % de la energía consumida durante los procesos de fabricación industrial se pierde en forma de calor residual, y que aproximadamente el 60 % de este se libera como calor residual de baja calidad a una temperatura inferior a 230 °C. En 2009, Enova SF (una empresa pública noruega encargada de promover la producción y el consumo de energía respetuosos con el medio ambiente) también proporcionó una distribución por rangos de temperatura según la cual el 37 % del calor residual se encuentra por encima de los 140 °C y casi la mitad del 63 % restante se sitúa en el rango de 40 a 60 °C [4]. En un estudio posterior, [5] resume diferentes datos y recopila la distribución por potencias térmicas en forma de calor residual y su distribución por temperaturas para diferentes sectores (incluidos el transporte, el industrial, el comercial, el residencial y el eléctrico), lo que se presenta de forma concisa en la fig. 53.

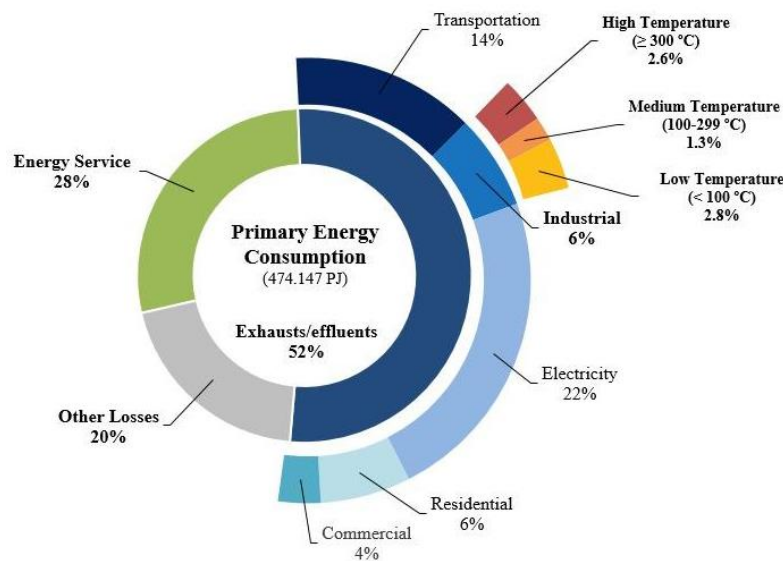


Fig. 53. Distribución del calor residual por sector y temperatura [5].

2.2.1 Tecnologías para la captura y el aprovechamiento del calor residual

El calor residual puede utilizarse directamente, mediante un uso pasivo (simplemente utilizando un intercambiador de calor), o transformarse mediante tecnologías activas (transformando el nivel de temperatura o produciendo energía mecánica o eléctrica), tal y como se muestra en la fig. 54.

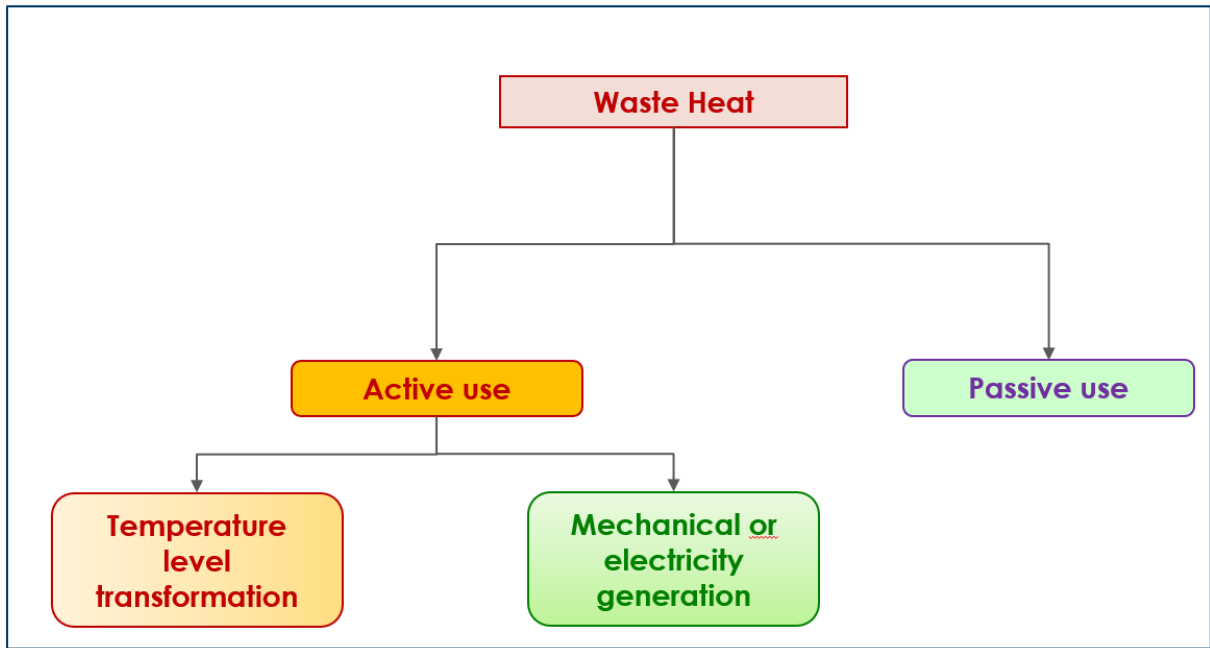


Fig. 54. Clasificación de las tecnologías utilizadas para la captación del calor residual.

2.2.1.1 Intercambiadores de calor

El proceso que utiliza tecnologías para capturar y aprovechar el calor residual se conoce como recuperación de calor residual. Y, en cualquier caso (ya sea de uso pasivo o activo), implica transferir el calor residual para revalorizarlo mediante la producción de calor o energía. En cualquier caso, el primer paso en la recuperación de calor residual consiste en un intercambiador de calor que captura dicho calor residual.

Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para transferir calor de un medio a otro, normalmente sin que se mezclen. Se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, como la calefacción, la refrigeración y la recuperación de energía. El principio fundamental de un intercambiador de calor es permitir el flujo de calor de un fluido más caliente a otro más frío. Existen varios tipos de intercambiadores de calor, pero los más utilizados para la recuperación de calor son los siguientes [3,6]:

1. Intercambiador de calor de placas
2. Intercambiador de calor de carcasa y tubos
3. Intercambiadores de calor aire-aire
4. Intercambiadores de calor de tubos aletados/economizadores
5. Intercambiadores de calor regenerativos
6. Intercambiadores de calor de contacto directo

1. Intercambiador de calor de placas

Un intercambiador de calor de placas es un tipo de intercambiador de calor que utiliza placas metálicas apiladas o soldadas en paralelo entre sí, formando una carcasa metálica hueca para transferir calor entre dos fluidos. Estas placas crean una gran superficie para una transferencia de calor eficiente, al tiempo que mantienen los fluidos físicamente separados. Los componentes principales son las placas, las juntas o soldaduras y el bastidor (fig. 55).



Ventajas:

1. Altamente eficientes para la recuperación de calor en procesos industriales y sistemas de climatización.
2. Se utiliza con frecuencia para recuperar calor de fluidos a temperaturas bajas o medias.
3. Son compactos y ofrecen una gran superficie de intercambio de calor en relación con su tamaño.

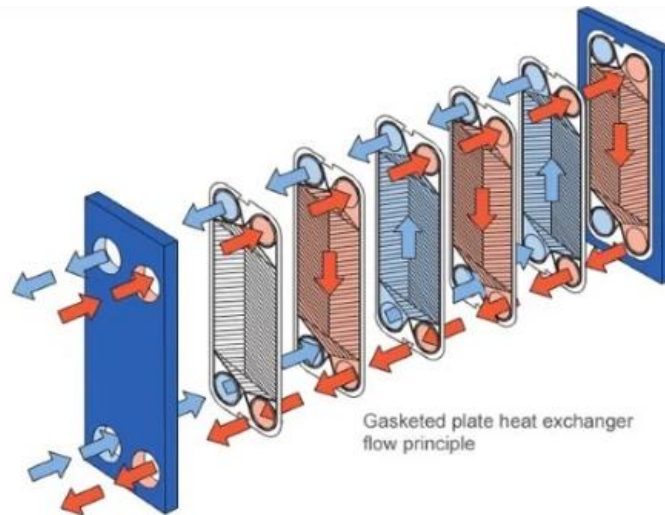


Fig. 55. Funcionamiento de un intercambiador de calor de placas [7].

2. Intercambiador de calor de carcasa y tubos

Un intercambiador de calor de carcasa y tubos (Fig. 56) funciona transfiriendo calor entre dos fluidos a través de una serie de tubos contenidos dentro de una carcasa cilíndrica. Un fluido circula por los tubos, mientras que el otro circula por el exterior de los tubos, dentro de la carcasa. Los componentes principales de este tipo de intercambiador de calor son los tubos, la carcasa, los deflectores y las placas tubulares.

Ventajas:

1. Se utiliza en aplicaciones industriales para fluidos a presiones y temperaturas más elevadas.
2. Robusto y adecuado para grandes caudales y condiciones más exigentes.
3. Puede manejar tanto líquidos como gases, como el vapor de escape de procesos industriales.

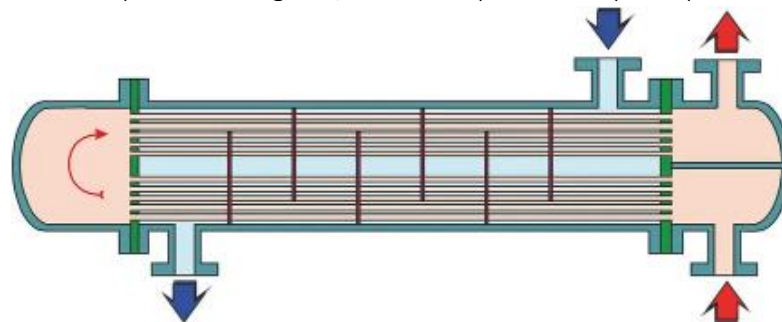


Fig. 56. Funcionamiento de un intercambiador de calor de carcasa y tubos [8].

3. Intercambiador de calor aire-aire (recuperador)



Los intercambiadores de calor aire-aire, a menudo denominados recuperadores, se utilizan para transferir calor entre dos corrientes de aire separadas sin mezclarlas. Existen tres tipos principales que se utilizan habitualmente para la recuperación de calor:

1. Intercambiador de placas fijas.
2. Intercambiador de calor rotativo.
3. Intercambiador de calor de tubo de calor.

a) Intercambiador de placas fijas

Este tipo está compuesto por varias placas delgadas y planas dispuestas con pequeños espacios entre ellas. El aire de salida circula por canales alternos, mientras que el aire fresco circula por los canales adyacentes en dirección opuesta (contracorriente) (fig. 57).

Ventajas:

1. Presenta un diseño sencillo sin piezas móviles.
2. Alcanza una alta eficiencia térmica en configuraciones de contracorriente o de flujo cruzado.

Limitaciones:

No puede transferir humedad; solo intercambia calor sensible (calor seco).

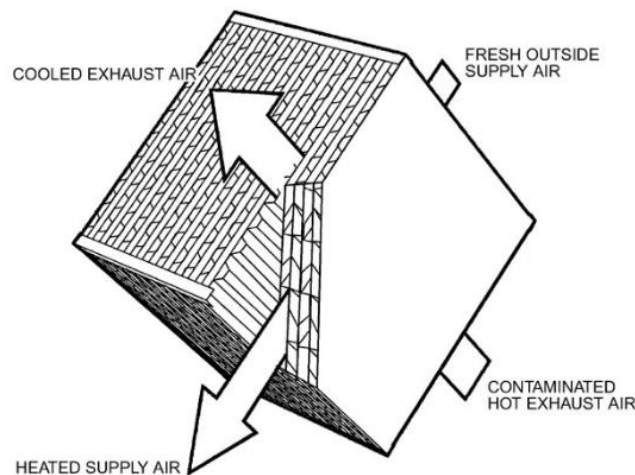


Fig. 57. Intercambiador de calor de placas fijas [9].

b) Intercambiador de calor rotativo

Este tipo cuenta con una rueda giratoria (o rotor) fabricada con un material que absorbe el calor, como el aluminio, que gira entre las corrientes de aire de salida y de aire fresco. A medida que gira el rotor, capta el calor del aire de salida y lo transfiere al aire fresco entrante (Fig. 58).

Ventajas:

1. Transfiere tanto calor sensible (temperatura) como calor latente (humedad), lo que contribuye a mejorar la calidad del aire interior y el confort.
2. Funciona con gran eficiencia, especialmente en entornos húmedos.

Limitaciones:

1. Contiene piezas móviles, lo que requiere un mayor mantenimiento.



2. Existe la posibilidad de que se produzca cierta contaminación cruzada entre las corrientes de aire.

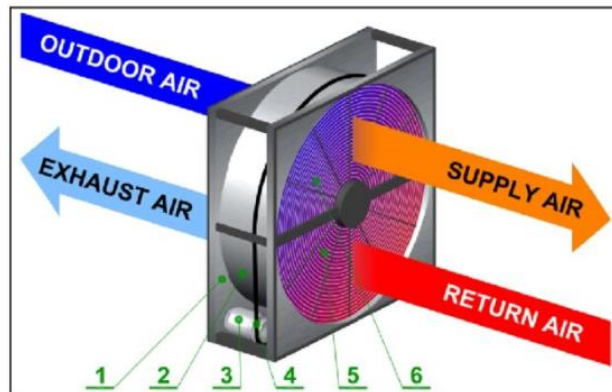


Fig. 58. Intercambiador de calor rotativo [10].

c) Intercambiador de calor de tubo de calor

Los tubos de calor son tubos sellados que contienen un refrigerante o fluido de trabajo. Un extremo del tubo de calor se sitúa en la corriente de aire de salida (lado caliente), donde el fluido se evapora y absorbe calor. El vapor resultante se desplaza entonces hacia el extremo más frío (corriente de aire fresco entrante), donde se condensa y libera el calor absorbido. A continuación, el líquido vuelve al lado caliente por acción capilar o por gravedad, y este ciclo continúa (Fig. 59).

Ventajas:

1. No tienen piezas móviles, lo que los hace muy fiables.
2. Transfieren el calor sensible de manera eficiente.
3. Pueden funcionar a diversas temperaturas y presiones cambiando el fluido de trabajo.

Limitaciones:

1. Solo transfieren calor sensible.
2. No facilitan la transferencia de humedad.
3. Para que funcionen correctamente, es necesario que se instalen en la orientación adecuada.

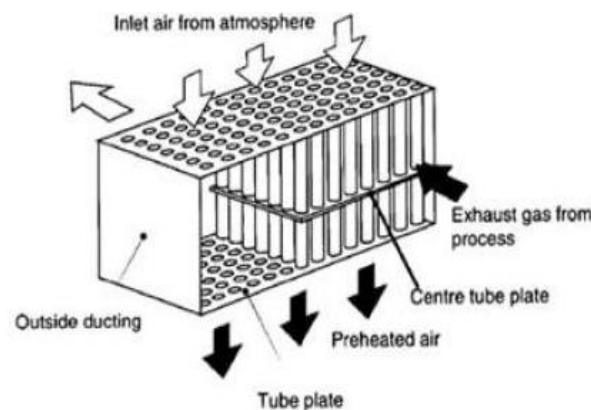


Fig. 59. Intercambiador de calor de tubos de calor [11].



4. Intercambiadores de calor de tubos aletados/economizadores

Los intercambiadores de calor de tubos aletados se utilizan para recuperar calor de gases de escape a temperaturas bajas o medias con el fin de calentar líquidos. Consisten en un haz de tubos por los que circula el agua de alimentación (Fig. 60).

Ventajas:

1. Se utilizan habitualmente en centrales eléctricas o calderas para recuperar calor de los gases de escape y precalentar el agua de alimentación, lo que mejora la eficiencia térmica.
2. Están diseñados para capturar el calor residual de los gases de combustión.

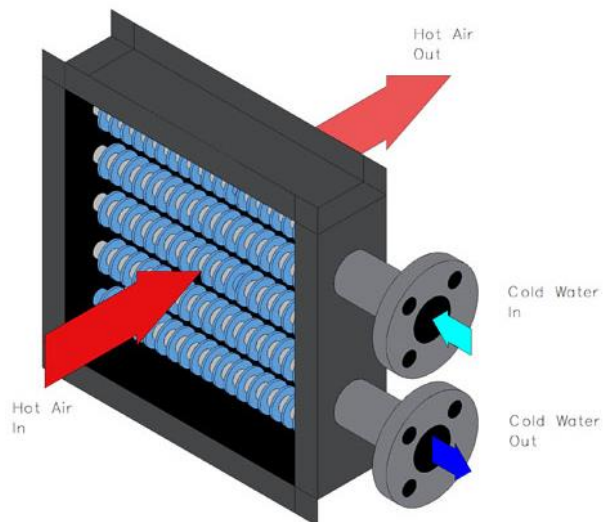


Fig. 60. Intercambiadores de calor de tubos aletados/economizadores [11].

5. Intercambiadores de calor regenerativos

Los intercambiadores de calor regenerativos almacenan temporalmente el calor de un fluido y luego lo transfieren a otro, lo que facilita la recuperación de calor y mejora la eficiencia energética. A diferencia de los intercambiadores de calor típicos, en los que la transferencia de calor se produce simultáneamente entre dos fluidos, los intercambiadores de calor regenerativos utilizan materiales (como metal o cerámica) para absorber y liberar calor de forma alterna [12].

Existen dos tipos principales de intercambiadores de calor regenerativos: los estáticos y los dinámicos. Cada tipo funciona de una manera ligeramente diferente, pero el principio fundamental sigue siendo el mismo: almacenar el calor de una corriente y transferirlo a otra.

Ventajas:

1. Son adecuados para aplicaciones a alta temperatura, como hornos industriales o sistemas de turbinas de gas.



2. Funcionan acumulando calor en un medio sólido, que a continuación transfiere ese calor a un fluido de trabajo.

6. Intercambiadores de calor de contacto directo

Los intercambiadores de calor de contacto directo ponen a dos fluidos en contacto físico directo, lo que permite que el calor se transfiera directamente entre ellos sin una barrera separadora. Esto contrasta con los intercambiadores de calor convencionales, que cuentan con paredes sólidas entre los fluidos. La transferencia de calor se produce por conducción y convección y, en algunos casos, pueden tener lugar cambios de fase, como la condensación o la evaporación [13].

Los intercambiadores de calor de contacto directo se utilizan habitualmente en situaciones en las que los dos fluidos son inmiscibles (no pueden mezclarse) o cuando uno de los fluidos es un gas o vapor. Son especialmente eficientes para aplicaciones específicas, como la refrigeración de agua con aire o la condensación de vapor.

Ventajas:

1. En estos intercambiadores, los fluidos calientes y fríos entran en contacto directo, lo que los hace adecuados para su uso en torres de refrigeración o en determinados sistemas de recuperación de calor geotérmico.
2. Proporcionan una transferencia de calor eficiente para aplicaciones específicas en las que la mezcla de fluidos no supone un problema.

2.2.2 Revalorización del calor residual

Como se ha mencionado anteriormente, los intercambiadores de calor son las tecnologías más comunes utilizadas para capturar el calor residual. Una vez capturado el calor residual, puede utilizarse directamente (**reutilización**) o pueden emplearse diversas **tecnologías activas** para transformarlo en energía térmica a otro nivel de temperatura o convertirlo en energía mecánica o eléctrica.

Reutilización

Los intercambiadores de calor se utilizan no solo para capturar el calor residual, sino también para aprovechar el calor que se ha capturado. Pueden emplearse tanto en sistemas primarios como secundarios:

1. Sistemas primarios: en esta configuración, un intercambiador de calor transfiere el calor directamente del medio de calor residual al medio principal para su posterior transmisión y uso.
2. Sistemas secundarios: en este caso, el calor se recupera del medio de calor residual y se transfiere a un fluido de transferencia (como agua o aceite), que a continuación se dirige a un intercambiador de calor secundario para calentar el medio principal con vistas a su utilización.

Algunos ejemplos de reutilización del calor residual son:

1. Generadores de vapor con recuperación de calor (HRSG): intercambiador de calor que captura y aprovecha el calor residual de los gases de escape calientes para generar vapor.
2. Economizadores: intercambiadores de calor que recuperan el calor residual de los gases de escape o de los fluidos de proceso para precalentar agua o aire.
3. Calderas de recuperación de calor: sistema que funciona de manera similar a una caldera de gas, pero que, en lugar de utilizar gas, aprovecha el calor residual para calentar un medio útil, normalmente agua.



2.2.2.1 Tecnologías activas

Cuando utilizamos el calor residual absorbido para activar un ciclo termodinámico, se dice que estamos empleando tecnologías activas de recuperación de calor residual. De este modo, podemos utilizar el calor para generar calor a otro nivel de temperatura útil o podemos emplearlo para producir energía mecánica o eléctrica.

La utilización del calor residual puede seguir dos enfoques principales. El primero consiste en convertir el calor residual en energía mecánica o eléctrica mediante tecnologías de conversión de calor residual en energía. Los sistemas más comunes se basan en el ciclo de Rankine, ya sea utilizando agua en el ciclo de Rankine de vapor (SRC) o fluidos orgánicos en el ciclo de Rankine orgánico (ORC). También se emplean generadores termoeléctricos para la conversión directa de calor en electricidad. El segundo enfoque consiste en utilizar el calor residual para producir energía térmica a un nivel de temperatura diferente. Esto incluye tecnologías para generar refrigeración, como los sistemas de refrigeración activados térmicamente basados en ciclos de absorción o adsorción, y tecnologías para elevar el calor a una temperatura más alta, como las bombas de calor. Estas bombas de calor pueden ser de accionamiento térmico (mediante ciclos de absorción o adsorción) o basarse en mecanismos de compresión de vapor.

Las tecnologías más comunes son el ciclo de Rankine —también denominado ciclo de Rankine de vapor (SRC)—, generalmente más rentable cuando la temperatura de la fuente de calor supera los 400 °C, y el ciclo de Rankine orgánico (ORC) o ciclo de Kalina, en rangos de temperatura moderados. Asimismo, los generadores termoeléctricos, con rendimientos más bajos pero adecuados para aplicaciones que requieren pequeñas cantidades de potencia de un generador que necesita un mantenimiento mínimo (fig. 61).

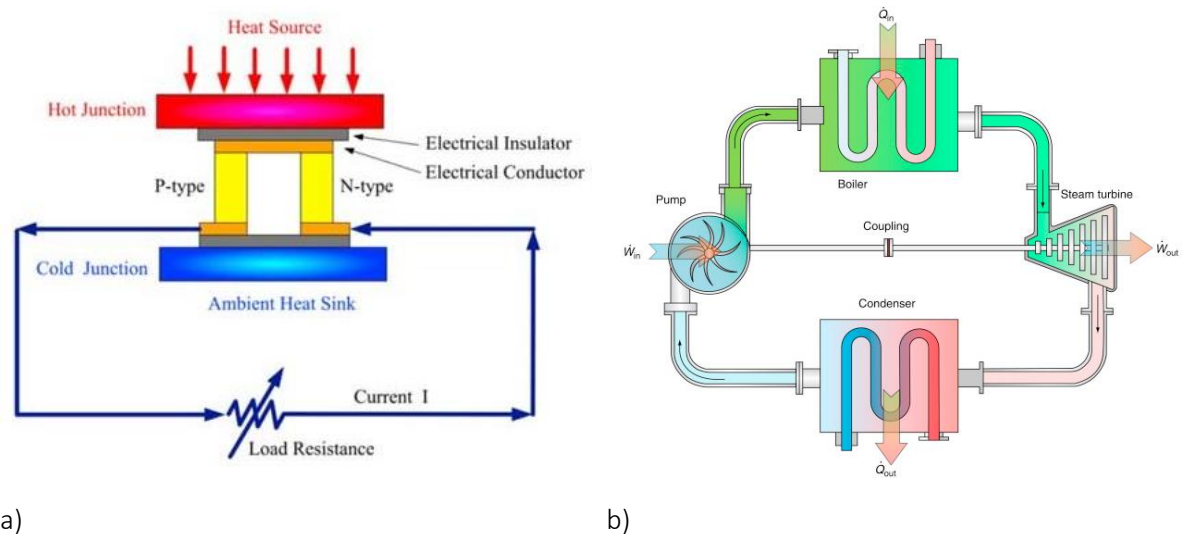


Fig. 61. Tecnologías activas de aprovechamiento del calor residual para la generación de energía: a) termoeléctrica, b) ciclo de Rankine a vapor [14,15].

Ciclos térmicos o de compresión de vapor. Las tecnologías térmicas, como los ciclos de absorción y adsorción, pueden utilizarse para generar frío (sistemas de refrigeración) u obtener temperaturas más elevadas (bombas de calor). Centrándonos en la obtención de temperaturas más elevadas, el ciclo de compresión de vapor es la tecnología más común (fig. 62).

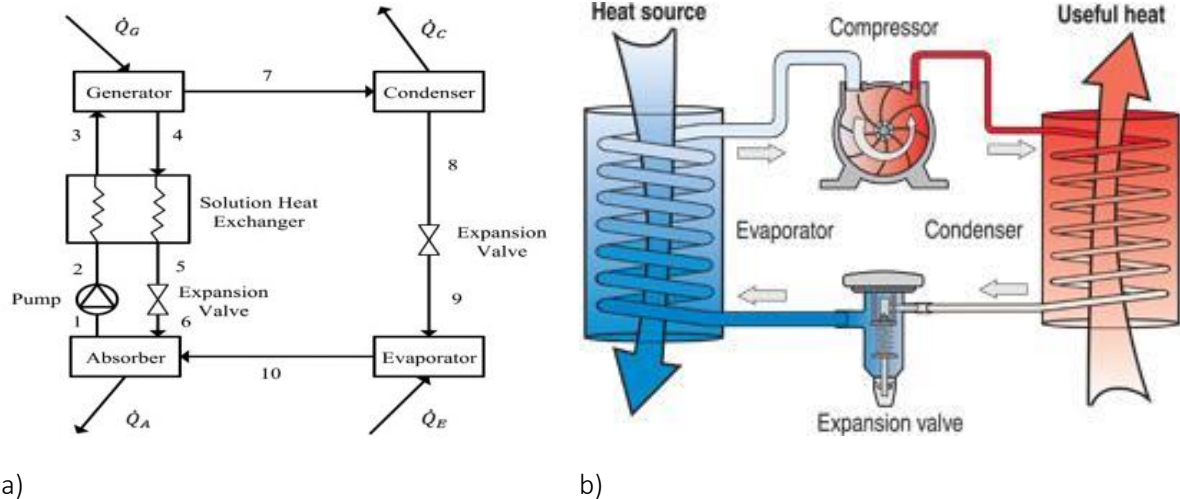


Fig. 62. Tecnologías activas que aprovechan el calor residual para generar frío o calor: a) ciclo de absorción; b) ciclo de compresión de vapor [16-18].

Principios termodinámicos del funcionamiento de una bomba de calor:

Una bomba de calor funciona basándose en principios termodinámicos fundamentales. Transfiere calor desde una fuente a menor temperatura hacia un sumidero a mayor temperatura utilizando energía externa, normalmente trabajo eléctrico o mecánico.

Segunda ley de la termodinámica (afirmación de Clausius): El calor fluye de forma natural de una temperatura más alta a una más baja. Una bomba de calor invierte este proceso utilizando trabajo externo para trasladar el calor de un depósito frío a uno caliente.

Primera ley de la termodinámica (conservación de la energía): La energía total dentro de un sistema permanece constante:

$$Q_{\text{entrada}} + W = Q_{\text{salida}}$$

Q_{entrada} = Calor absorbido de la fuente de baja temperatura (evaporador)

W = Trabajo realizado (energía del compresor)

Q_{salida} = Calor liberado en el sumidero de alta temperatura (condensador)

- **Bombas de calor**

El ciclo de compresión ideal se basa en el concepto de un motor térmico que evoluciona cíclicamente entre dos fuentes de calor a temperaturas $T_2 > T_1$, extrayendo calor del medio a menor temperatura (Q_1) y transfiriendo calor (Q_2) al medio a mayor temperatura gracias al trabajo externo recibido.

El ciclo de Carnot presenta el rendimiento máximo posible de una bomba de calor que evoluciona entre dos temperaturas y consiste en las transformaciones reversibles esbozadas en el diagrama T-s (fig. 63).

1-2; tiene lugar una compresión isentrópica (adiabática y reversible) en la zona de vapor bifásico del diagrama mediante la aplicación de trabajo.

2-3; tiene lugar la condensación completa del vapor mediante la transferencia reversible de calor a presión y temperatura constantes.



3-4: expansión isentrópica desde el punto de líquido saturado (3) hasta la presión correspondiente a la temperatura fría, produciendo así una mezcla bifásica (4) y una cierta cantidad de energía transferida por el sistema.

4-1; vaporización parcial del líquido presente en el estado (4), a presión y temperatura constantes.

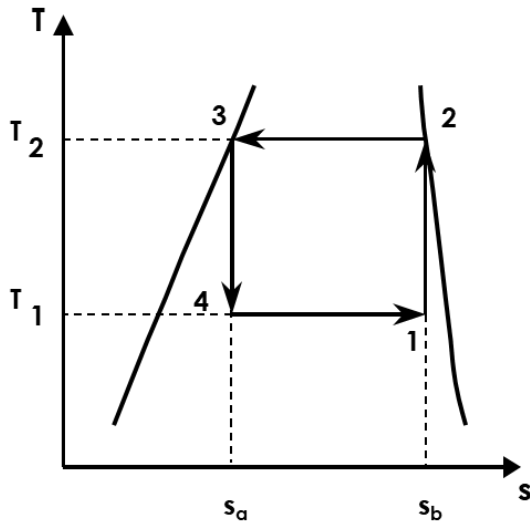


Fig. 63. Ciclo ideal (de Carnot) en el diagrama T-s [19].

El ciclo ideal de Carnot no es viable; su ciclo ideal equivalente implica una serie de modificaciones: 1-2: La compresión se llevará a cabo sobre un gas, por lo que al menos el punto 1 debe ser vapor saturado para evitar choques de líquido. 2-3: Los gases de descarga del compresor se enfriarán hasta la temperatura de saturación y, posteriormente, se condensarán en un intercambiador ideal de superficie infinita. 3-4: Expansión isentálpica, de naturaleza irreversible, en lugar de la que se producía en el ciclo de Carnot, por razones de simplicidad y fiabilidad. 4-1: El fluido bifásico que llega al punto 4 se evapora en un intercambiador infinito hasta alcanzar el vapor saturado, cerrando así el ciclo ideal.

Así pues, el ciclo ideal equivalente representado en el diagrama Ph sería el siguiente (fig. 64):

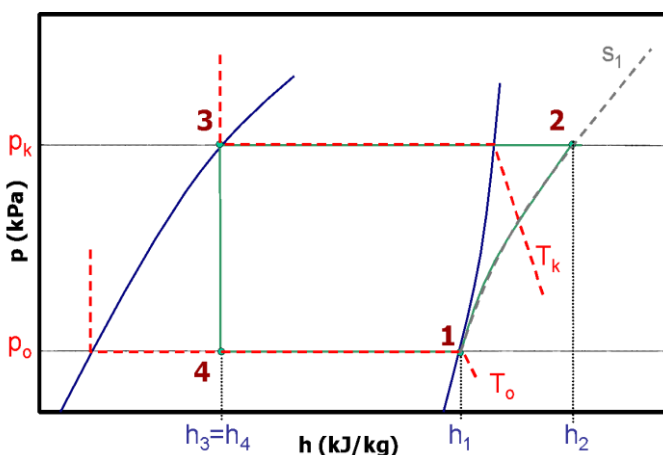


Fig. 64. Ciclo real en el diagrama T-s [19].

Por último, las temperaturas de evaporación (T_e) y condensación (T_k) deben ser inferiores y superiores a las temperaturas de las fuentes correspondientes (T_1 y T_2), con un sobrecalentamiento del vapor en



la entrada del compresor y un subenfriamiento del líquido en la salida del condensador. Además, la compresión real se desvía de la isentrópica. Por lo tanto, el ciclo de compresión es el siguiente:

Como se ha observado, en los sistemas de compresión de vapor es necesario llevar un fluido de trabajo a condiciones de ebullición a baja temperatura para la producción de frío y a condiciones de condensación (o enfriamiento) a alta temperatura para la producción de calor.

Por ello, los sistemas de compresión de vapor emplean varios procesos para completar un ciclo que alcance de forma continua el objetivo deseado (frío o calor). Los componentes principales del sistema, además del fluido de trabajo (refrigerante), son el evaporador, el compresor, el condensador y el dispositivo de expansión (fig. 65).

«El refrigerante es la sustancia que circula por los diferentes elementos del sistema de forma cíclica, absorbiendo calor a bajas temperaturas en el evaporador y liberándolo a temperaturas más altas en el condensador. Por lo general, estos procesos implican un cambio de estado del fluido».

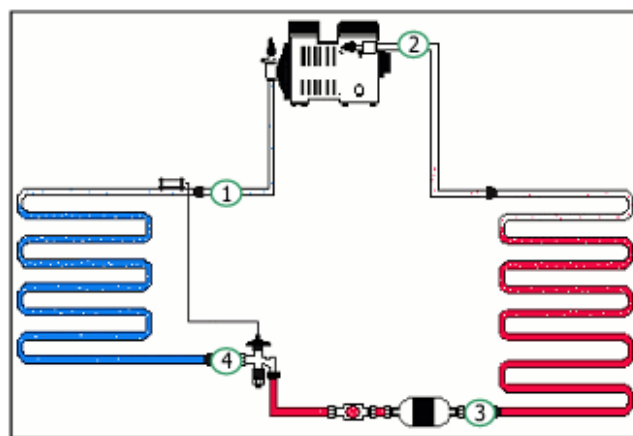


Fig. 65. Esquema del ciclo de compresión de vapor [19].

1. Evaporador

Es un intercambiador de calor al que llega el refrigerante en forma de mezcla bifásica a baja temperatura. El líquido se evapora a la temperatura de saturación correspondiente a la presión reinante en el evaporador, absorbiendo del entorno el calor latente necesario para su evaporación.

2. Compresor

El refrigerante llega al compresor en estado de vapor (normalmente vapor sobrecalentado) a baja presión y temperatura. El compresor aspira mecánicamente los vapores generados en el evaporador creando una presión inferior a la del evaporador, absorbiendo calor sensible a lo largo de su recorrido. Posteriormente, estos vapores se comprimen mecánicamente, aumentando su presión y temperatura.

3. Condensador

El refrigerante llega al condensador desde la descarga del compresor en forma de vapor sobrecalentado a alta presión y temperatura. Dado que la temperatura del entorno será inferior a la temperatura de saturación del refrigerante, se producirá un enfriamiento y la consiguiente condensación. De este modo, el calor latente absorbido en el evaporador y el calor absorbido durante la compresión se transfieren en el condensador al entorno (calor sensible de enfriamiento y calor latente de condensación, que puede utilizarse para aplicaciones de calefacción). El refrigerante sale del condensador en estado líquido (normalmente subenfriado) y se dirige hacia el dispositivo de expansión o el depósito de acumulación.



4. Expansor

El expansor de un ciclo de compresión de vapor reduce la presión y la temperatura del refrigerante, que llega en estado de vapor saturado o sobrecalentado a alta presión procedente del condensador. Al pasar por el expansor, el refrigerante sufre una rápida expansión, lo que provoca un cambio de estado que reduce su temperatura y le permite convertirse en una mezcla de vapor y líquido. Este proceso es crucial, ya que el refrigerante, ahora a baja presión y temperatura, puede absorber calor del ambiente en el evaporador, facilitando así la refrigeración y completando el ciclo de compresión de vapor.

- Tecnologías de bombas de calor

1. Bombas de calor aire-aire

Funcionamiento: Estas bombas funcionan utilizando un ventilador para aspirar aire del exterior, que a continuación pasa por un evaporador donde se calienta. Posteriormente, el aire calentado se hace circular por el interior.

Eficiencia: La eficiencia de estas bombas se mide mediante el coeficiente de rendimiento (COP), aunque este puede descender por debajo de 1 en condiciones de frío extremo.

Usos habituales: Se utilizan ampliamente en climas templados para calefacción y refrigeración, a menudo como parte de sistemas de aire acondicionado.

Mantenimiento: Para mantener la eficiencia, es esencial limpiar los filtros y el intercambiador de calor con regularidad.

2. Bombas de calor aire-agua

Funcionamiento: Son similares a las bombas aire-aire, pero en lugar de transferir el calor extraído al aire, estas bombas lo transfieren al agua. Esta agua calentada puede utilizarse para la calefacción de espacios mediante radiadores o para el suministro de agua caliente sanitaria.

Eficiencia: Estas bombas son bastante eficientes, sobre todo cuando se combinan con sistemas de calefacción de baja temperatura, como la calefacción por suelo radiante.

Usos habituales: Son adecuadas para la calefacción en viviendas unifamiliares y edificios comerciales.

Mantenimiento: Es necesario realizar inspecciones periódicas tanto de la bomba como del circuito de agua para evitar problemas como la corrosión o las fugas.

3. Bombas de calor geotérmicas

Funcionamiento: Las bombas de calor geotérmicas utilizan una red de tuberías enterradas bajo tierra (colectores) para extraer calor del suelo o de las aguas subterráneas. Este calor extraído se transfiere posteriormente al agua que circula por el sistema de calefacción.

Eficiencia: Estos sistemas presentan un elevado coeficiente de rendimiento (COP), ya que las temperaturas del suelo son más estables que las del aire. Pueden alcanzar un COP de 4 o superior.

Usos habituales: Las bombas de calor geotérmicas son ideales para nuevas construcciones en entornos residenciales y comerciales, así como en edificios de mayor tamaño.

Mantenimiento: Por lo general, requieren menos mantenimiento a largo plazo, pero los costes iniciales de instalación pueden ser más elevados debido a la perforación necesaria para los colectores subterráneos.



4. Bombas de calor agua-agua

Funcionamiento: Las bombas de calor de agua captan el calor de masas de agua, como ríos o lagos, y lo transfieren a un circuito de agua con fines de calefacción o refrigeración.

Eficiencia: Estos sistemas son muy eficientes, especialmente en entornos donde la temperatura del agua se mantiene relativamente constante.

Usos habituales: Las bombas de calor de fuente de agua se emplean habitualmente en instalaciones industriales, grandes edificios y sistemas de calefacción urbana.

Mantenimiento: Es necesario realizar un control periódico de la calidad del agua y el mantenimiento de los sistemas de tuberías para garantizar un rendimiento óptimo.

5. Bombas de calor de absorción

Funcionamiento: Los enfriadores por absorción utilizan un refrigerante y un absorbente (como agua o bromuro de litio) en lugar de un compresor eléctrico. Se alimentan de una fuente de calor, como el gas natural, para facilitar su funcionamiento.

Eficiencia: Los enfriadores de absorción pueden ser menos eficientes que los sistemas de compresión, pero resultan ventajosos en aplicaciones en las que se dispone fácilmente de calor residual.

Usos habituales: Estos enfriadores se encuentran habitualmente en grandes edificios, instalaciones industriales y sistemas de refrigeración utilizados en diversos procesos industriales.

Mantenimiento: El mantenimiento periódico es esencial debido a la complejidad del sistema de absorción, lo que garantiza un funcionamiento fiable y eficiente.

6. Bombas de calor híbridas

Funcionamiento: Los sistemas de calefacción híbridos combinan una bomba de calor con una caldera de gas u otro sistema de calefacción alternativo. La bomba de calor actúa como fuente principal de calefacción, mientras que la caldera entra en funcionamiento en condiciones de baja temperatura, cuando se necesita calor adicional.

Eficiencia: Estos sistemas pueden alcanzar una alta eficiencia al adaptarse a las condiciones climáticas variables y optimizar el uso de la energía a lo largo del año.

Usos habituales: Los sistemas híbridos son especialmente adecuados para climas con inviernos fríos y veranos calurosos.

Mantenimiento: Se requiere un mantenimiento periódico tanto de la bomba de calor como de la caldera para garantizar un rendimiento y una fiabilidad óptimos.

7. Bombas de calor de doble función

Funcionamiento: Las bombas de calor con funcionalidad reversible pueden alternar entre calefacción y refrigeración según sea necesario. Utilizan válvulas de inversión para modificar el flujo del refrigerante, lo que permite ambos modos de funcionamiento.

Eficiencia: Estos sistemas son muy eficientes, especialmente en climas en los que se requiere calefacción y refrigeración con frecuencia.



Usos habituales: Se utilizan habitualmente en espacios que necesitan calefacción y refrigeración, como edificios comerciales y estancias específicas en entornos residenciales.

Mantenimiento: El mantenimiento periódico es esencial para garantizar que las funciones de calefacción y refrigeración funcionen de forma fluida y eficiente.

8. Bombas de calor con inversor

Funcionamiento: Las bombas de calor con inversor utilizan tecnología de inversor, lo que permite ajustar la velocidad del compresor en función de la demanda de calefacción o refrigeración. Esto permite que el sistema funcione de forma más eficaz en respuesta a condiciones variables.

Eficiencia: Estos sistemas ofrecen una mayor eficiencia al funcionar a diferentes velocidades, lo que contribuye a reducir el consumo energético en comparación con los sistemas tradicionales.

Usos habituales: Las bombas de calor con inversor se encuentran habitualmente en sistemas de aire acondicionado y en aplicaciones de calefacción de edificios.

Mantenimiento: Por lo general, requieren menos mantenimiento que los sistemas convencionales; sin embargo, la tecnología de inversor puede introducir una complejidad adicional que puede exigir una supervisión más cuidadosa.

9. Bombas de calor de recuperación de calor

Funcionamiento: Los sistemas de recuperación de calor capturan el calor residual de los procesos industriales o de los sistemas de refrigeración y lo reutilizan para aplicaciones de calefacción.

Eficiencia: Estos sistemas son muy eficientes, ya que reducen eficazmente el desperdicio de energía y maximizan el aprovechamiento de la energía disponible.

Usos habituales: Los sistemas de recuperación de calor se utilizan habitualmente en entornos industriales, así como para la calefacción de edificios.

Mantenimiento: Para garantizar un rendimiento óptimo, estos sistemas requieren un diseño cuidadoso y un seguimiento periódico para mantener la eficiencia del proceso de recuperación de calor.

- Clasificación de las bombas de calor: en función de la temperatura de producción

Las bombas de calor se clasifican en función de la temperatura del calor que producen, lo que determina su idoneidad para diferentes aplicaciones. La clasificación suele incluir:

a) Bombas de calor de baja temperatura (<45 °C):

Temperatura de suministro típica: 30 °C - 45 °C (calefacción de espacios)

b) Bombas de calor de temperatura media (45 °C – 75/90 °C)

Temperatura de suministro típica: 45 °C - 75 °C

Aplicaciones:



1. Producción de agua caliente sanitaria (ACS).
2. Sistemas de calefacción con radiadores (rehabilitación de edificios antiguos).
3. Calefacción industrial para los sectores alimentario, textil y químico.

c) Bombas de calor de alta temperatura (>75/90 °C)

Temperatura de suministro típica: 75 °C - 150 °C y más

Aplicaciones:

1. Calefacción para procesos industriales (secado, esterilización y procesos químicos).
 2. Redes de calefacción urbana.
 3. Producción de vapor para generación de energía y uso industrial.
- Aplicación de bombas de calor en el aprovechamiento del calor residual

Como se ha mencionado anteriormente, el calor residual se puede clasificar en cuatro niveles de temperatura, siendo el calor de baja temperatura el más adecuado para las bombas de calor. El calor de baja temperatura se refiere al calor a temperaturas inferiores a 100 °C. Aunque estas temperaturas suelen ser demasiado bajas para su uso directo en procesos industriales, pueden resultar valiosas para la calefacción de espacios y el calentamiento de agua en edificios residenciales y comerciales, o para mejorar la eficiencia de determinadas operaciones industriales.

Las bombas de calor pueden aprovechar el calor de baja temperatura elevando su temperatura a un nivel más adecuado, en función de los requisitos específicos. Además, el calor industrial de baja temperatura puede captarse del agua de refrigeración en los procesos industriales. Entre las aplicaciones más comunes de las bombas de calor para la recuperación de calor residual se incluyen:

1. Destilerías
 2. Lavanderías industriales
 3. Calefacción urbana a partir de calor residual
 4. Supermercados
 5. Centros de datos
- Configuraciones y conexiones de bombas de calor para diversas fuentes de calor residual

1. Conexión directa al circuito primario

Aplicación: Este método se utiliza con frecuencia cuando el calor residual procede de un proceso en el que interviene un fluido en circulación, como agua caliente o gases de escape.

Configuración: En esta configuración, el intercambiador de calor de la bomba de calor se conecta directamente al circuito de la fuente de calor residual. Esto permite que el fluido residual fluya a través del evaporador o del condensador de la bomba de calor.

Ventajas: Esta configuración reduce la pérdida de temperatura y mejora la eficiencia, al eliminar la necesidad de intercambiadores de calor intermedios.

Desventajas: Requiere una compatibilidad total en cuanto a materiales y temperaturas entre la bomba y la fuente de calor, lo que puede limitar las opciones de diseño.

2. Intercambiador de calor intermedio (sistema indirecto)



Aplicación: Este método resulta beneficioso cuando el fluido de calor residual es corrosivo, contiene contaminantes o presenta temperaturas que superan los límites del equipo de la bomba de calor.

Configuración: Se instala un intercambiador de calor adicional, por ejemplo, de placas o de tubos, para transferir el calor del fluido residual a un fluido intermedio, que a continuación se conduce al evaporador de la bomba.

Ventajas: Esta configuración protege el sistema de la bomba de calor frente a los contaminantes y permite la modulación de la temperatura.

Desventajas: Introduce resistencia térmica y requiere un mantenimiento adicional.

3. Sistema de circuito cerrado con fluidos térmicos secundarios

Aplicación: Este enfoque es ideal para recoger calor de diversas fuentes de residuos distribuidas, como el aire de ventilación de edificios o distintos puntos de procesos industriales.

Configuración: Un circuito de fluido secundario recoge el calor de estas diferentes fuentes y lo transporta a un intercambiador de calor conectado a la bomba de calor.

Ventajas: Permite la captación de calor de múltiples fuentes y optimiza la gestión térmica entre las fuentes de calor residual distribuidas.

Desventajas: Esta configuración requiere una infraestructura de tuberías adicional y, posiblemente, sistemas de bombeo adicionales para el fluido secundario.

4. Sistemas de almacenamiento (depósitos de almacenamiento térmico)

Aplicación: Esta configuración es ideal para fuentes de calor residual que presentan un flujo de calor variable o intermitente.

Configuración: En esta configuración, el calor residual se almacena en un depósito térmico. La bomba de calor se conecta a este depósito para absorber calor durante los picos de demanda o cuando la fuente de calor no está operativa.

Ventajas: Maximiza el aprovechamiento del calor residual, especialmente cuando la demanda de la bomba de calor no coincide con la disponibilidad de calor.

Desventajas: Requiere espacio adicional para el depósito térmico y un control preciso para optimizar los procesos de carga y descarga térmica.

5. Integración con flujos de aire o gas

Aplicación: Esta configuración está diseñada para capturar el calor residual de los gases de escape o de los sistemas de ventilación.

Configuración: Se conecta un intercambiador de calor aire-agua o aire-refrigerante a la entrada de la bomba de calor, lo que facilita la transferencia de calor desde los flujos de gas.

Ventajas: Captura de manera eficiente tanto el calor sensible (relacionado con la temperatura) como el calor latente (relacionado con la humedad) de los gases de escape.

Desventajas: Mantener una eficiencia óptima en la transferencia térmica puede resultar complejo debido a la necesidad de realizar ajustes precisos en los caudales de aire o gas.



2.3 Fuentes seleccionadas de calor residual urbano para la calefacción urbana

El calor residual representa una fuente de energía valiosa, aunque a menudo infrautilizada, en los sistemas de calefacción urbana. Al capturar la energía térmica que, de otro modo, se perdería durante los procesos industriales, la generación de electricidad o las operaciones comerciales, las comunidades energéticas pueden mejorar significativamente la eficiencia y la sostenibilidad generales. La integración del calor residual en las redes de calefacción urbana reduce el consumo de energía primaria, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la viabilidad económica del sistema.

2.3.1 Calor residual de los centros de datos

Los centros de datos se encuentran entre los consumidores de energía de más rápido crecimiento en la economía digital. En 2010, el consumo mundial de electricidad de los centros de datos alcanzó los 350 TWh, lo que supuso más del 1 % del consumo eléctrico mundial. En Europa, el consumo fue de 56 TWh/año en 2007 y se preveía que aumentara hasta los 104 TWh/año para 2020, impulsado por tendencias como los servicios de streaming y el Internet de las cosas (IoT).

Los sistemas de refrigeración son esenciales para mantener unas condiciones de funcionamiento seguras para los equipos informáticos y representan aproximadamente el 40 % del consumo energético total de un centro de datos. Este proceso de refrigeración genera cantidades significativas de calor residual, que puede recuperarse y utilizarse en redes de calefacción urbana.

Por ejemplo, un centro de datos de tamaño medio con una capacidad informática de 1 MW emite alrededor de 3 700 MWh de calor al año a través de sus sistemas de refrigeración. Esto equivale a aproximadamente 0,46 MWh de energía térmica por cada 1 MWh de energía eléctrica consumida. Las instalaciones más grandes pueden alcanzar una potencia informática de 5 MW, mientras que la mayoría de los centros operan por debajo de los 500 kW, y muchos se sitúan en el rango de entre 500 kW y 5 MW.

El calor recuperado de los centros de datos puede integrarse en los sistemas de calefacción urbana mediante intercambiadores de calor y, cuando sea necesario, bombas de calor para elevar la temperatura hasta el nivel requerido. Este enfoque transforma una necesidad de refrigeración en un valioso recurso energético, mejorando la eficiencia energética global y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3.2 Calor residual de los túneles de metro

Las redes de metro representan una fuente significativa de calor residual de baja temperatura, generado principalmente durante el frenado de los trenes y la ventilación de los vagones. Este calor, que a menudo se disipa al entorno, puede captarse e integrarse en las redes de calefacción urbana, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas.

A nivel mundial, las redes de metro operan en 148 ciudades, cubren aproximadamente 11 000 km de líneas y prestan servicio a 151 millones de pasajeros al día. Dentro de la Unión Europea, hay alrededor de 50 ciudades medianas y grandes con sistemas de metro, que suman un total de 2 800 km de líneas y transportan a 31 millones de pasajeros diariamente. El potencial estimado de calor residual de estos sistemas oscila entre 6,7 y 11,2 TWh al año.

Las estaciones suelen estar separadas por unos 1 km, lo que ofrece frecuentes oportunidades para la recuperación de calor. Mediante la instalación de intercambiadores de calor en los pozos de ventilación o el uso de bombas de calor para elevar la temperatura, esta energía que, de otro modo, se perdería,



puede transformarse en un valioso recurso para la calefacción urbana, reduciendo la demanda de energía primaria y mejorando la sostenibilidad.

2.3.3 Calor residual de las redes de alcantarillado mediante bombas de calor

Las redes de alcantarillado urbanas proporcionan una fuente estable y accesible de calor de baja temperatura que puede recuperarse para la calefacción urbana. Las aguas residuales suelen mantener una temperatura media anual de entre 10 y 15 °C, y en verano pueden alcanzar hasta los 20 °C, lo que las hace adecuadas para aplicaciones con bombas de calor.

Mediante la instalación de intercambiadores de calor en las redes de alcantarillado y su combinación con bombas de calor, las ciudades pueden transformar esta energía latente en un recurso valioso. En los municipios con más de 10 000 habitantes, la recuperación de calor de las aguas residuales puede cubrir hasta el 5 % de la demanda total de calor, lo que equivale a unos 150 TWh al año en toda Europa. Solo en Alemania, esta tecnología podría suministrar energía para calefacción al 20 % del parque inmobiliario.

Ya se han llevado a cabo varios proyectos con éxito, entre ellos sistemas en Colonia y Niza, que demuestran la viabilidad técnica y el potencial económico de este enfoque. La recuperación de calor de las aguas residuales no solo reduce el consumo de energía primaria, sino que también contribuye a la descarbonización de los sistemas de calefacción urbanos.

Los principales componentes de un sistema que aprovecha las pérdidas de calor de las aguas residuales son los siguientes:

Red de alcantarillado: una gran tubería subterránea que transporta las aguas residuales de las zonas urbanas. Constituye la principal fuente de calor de baja temperatura para su recuperación.

Aguas residuales: el agua que circula por el interior de la red de alcantarillado, que suele tener una temperatura de entre 10 y 15 °C durante todo el año y de hasta 20 °C en verano, lo que la hace adecuada para la extracción de calor.

Intercambiador de calor de aguas residuales: dispositivo instalado en el interior o cerca de la red de alcantarillado para transferir el calor de las aguas residuales a un circuito de agua secundario sin mezclar ambos fluidos. Este es el primer paso para capturar la energía térmica.

Bomba de circulación: Garantiza el flujo continuo del circuito de agua secundario a través del intercambiador de calor y hacia la bomba de calor, manteniendo una transferencia de calor eficiente.

Bomba de calor agua-agua: eleva la temperatura del calor a baja temperatura procedente de las aguas residuales a una temperatura más alta, adecuada para la calefacción urbana. Para ello, utiliza un ciclo de refrigeración cerrado.

2.3.4 Aprovechamiento del calor residual: el consumidor se convierte en prosumidor

La recuperación del calor residual está transformando el funcionamiento de las comunidades energéticas. Tradicionalmente, los consumidores eran receptores pasivos del calor suministrado por sistemas centralizados. Hoy en día, gracias a tecnologías como los intercambiadores de calor, las bombas de calor y la integración inteligente, los consumidores pueden convertirse en «prosumidores», es decir, a la vez productores y consumidores de energía térmica.



Al aprovechar el calor residual procedente de fuentes como los centros de datos, los túneles de metro y las redes de alcantarillado, los edificios y las instalaciones contribuyen activamente a la red de calefacción urbana. Este enfoque reduce la demanda de energía primaria, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la resiliencia del sistema. Además, genera oportunidades económicas, ya que los prosumidores pueden compensar los costes energéticos o incluso generar ingresos mediante el suministro del calor excedente.

La transición de consumidor a prosumidor representa un cambio de paradigma en la calefacción urbana: de un modelo de suministro unidireccional a un ecosistema energético colaborativo. El aprovechamiento del calor residual no es solo una solución técnica, sino una piedra angular de las estrategias energéticas urbanas sostenibles.



3. Cogeneración (CHP)

3.1 Introducción a los sistemas de cogeneración

La cogeneración (CHP), también conocida como «cogeneración», es un método eficiente para generar electricidad y calor simultáneamente a partir de la misma fuente de energía. A diferencia de los sistemas convencionales, en los que la electricidad y el calor se producen por separado, los sistemas de cogeneración recuperan el calor residual de la generación de electricidad para proporcionar energía térmica útil, como vapor o agua caliente, para procesos industriales, calefacción o refrigeración [20]. Los sistemas de cogeneración se clasifican en dos tipos:

a) Ciclo de cogeneración de «cabeza» (ciclo Topping)

Descripción: En este tipo de ciclo, primero se genera electricidad (en la «parte inicial» del ciclo) y, a continuación, el exceso de calor producido durante este proceso se utiliza con fines de calefacción (en la «parte final» del ciclo) (fig. 66).

Proceso:

El combustible (como el gas natural o la biomasa) se quema en un motor primario, como una turbina de gas o un motor de combustión interna, para generar electricidad.

A continuación, los gases de escape calientes producidos por el motor o la turbina se recogen y se utilizan para producir vapor o agua caliente para aplicaciones de calefacción.

Este ciclo se utiliza habitualmente en entornos industriales o en sistemas de calefacción urbana, donde existe una demanda constante tanto de electricidad como de calor [21].

Ventajas: Este tipo de ciclo aprovecha al máximo los gases de escape a alta temperatura, produciendo primero electricidad y utilizando la energía restante para calefacción. Resulta más eficiente cuando la demanda de electricidad es elevada y el calor generado puede aprovecharse por completo.

Aplicaciones habituales: Se utiliza habitualmente en procesos industriales, edificios de gran envergadura y sistemas de calefacción urbana.

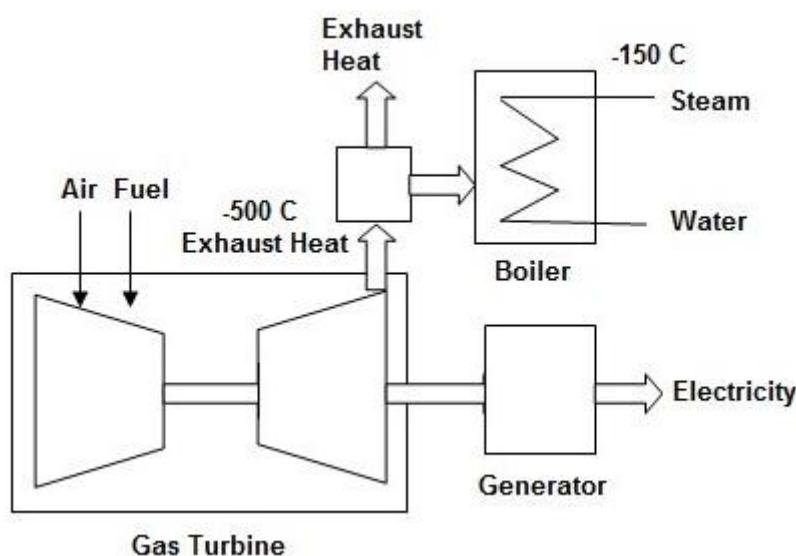




Fig. 66. Ciclo de cogeneración de cabecera [19].

b) Ciclo de cogeneración de cola (ciclo de fondo)

Descripción: En un ciclo de cogeneración de cola o de fondo, primero se produce el calor (en la «cola» del ciclo) y, posteriormente, se genera la electricidad aprovechando este calor (Fig. 67).

Proceso:

El sistema comienza produciendo calor, normalmente a través de una fuente de calor convencional, como una caldera o el calor residual industrial.

A continuación, este calor se utiliza para producir vapor, que acciona una turbina de vapor para generar electricidad. En algunos casos, esto también puede combinarse con un ciclo secundario para generar electricidad adicional.

El proceso es menos habitual que el ciclo de cabeza, pero a veces se utiliza en instalaciones en las que el calor es la necesidad principal y la generación de electricidad es secundaria [21].

Ventajas: Es ideal para procesos en los que se dispone de una cantidad significativa de calor residual y el objetivo principal es la generación de calor, siendo la electricidad un subproducto. También puede resultar útil en instalaciones en las que se dispone fácilmente de recuperación de calor procedente de procesos industriales o de calor residual.

Aplicaciones habituales: Se utiliza a menudo en plantas de valorización energética de residuos, donde el calor procedente del proceso de incineración de residuos puede utilizarse para generar electricidad.

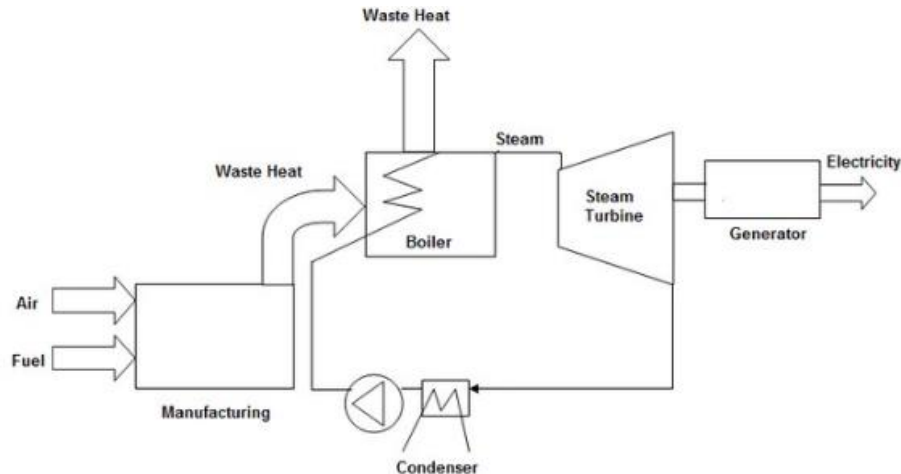


Fig. 67. Ciclo de cogeneración de cola [19].

Diferencias clave

1. **La cogeneración de cabeza** se centra primero en la generación de electricidad, para después utilizar el calor residual para la calefacción, mientras que **la cogeneración de cola** se centra primero en la producción de calor, siendo la electricidad un beneficio secundario.
2. **Eficiencia:** La cogeneración de cabeza suele ser más eficiente en sistemas en los que existe una demanda significativa tanto de electricidad como de calor, ya que garantiza que la electricidad se produzca a partir de la fuente de mayor temperatura. La cogeneración de cola puede resultar



más beneficiosa en sistemas en los que la recuperación del calor residual o las necesidades de calor son la prioridad.

La energía eléctrica generada suele representar entre el 30 % y el 40 % del contenido energético del combustible. Incluso en las centrales eléctricas más avanzadas, este porcentaje alcanza un máximo de aproximadamente el 60 % (Comisión Europea, 2017).

Se han desarrollado diversas tecnologías de cogeneración, clasificadas en dos grupos principales:

- **Unidades flexibles:**

Estos sistemas pueden ajustar su relación entre electricidad y calor en función de la demanda de calor. Suelen utilizar turbinas de vapor, en las que se extrae parcialmente el vapor en puntos específicos para proporcionar calor. Sin embargo, el vapor extraído no puede utilizarse para la generación de electricidad, lo que da lugar a un compromiso entre la producción de electricidad y la de calor [21]. Estas unidades pueden funcionar en:

a) **Modo de cogeneración completa:** máxima generación de calor.

b) **Modo de condensación total:** máxima generación de electricidad sin calor útil. El funcionamiento depende de la demanda específica de calor.

Diferentes tecnologías de cogeneración:

1. Turbina de gas de ciclo combinado con recuperación de calor, que incluye una turbina de extracción con condensación de vapor: relación flexible entre electricidad y calor.
2. Turbina de gas de ciclo combinado con recuperación de calor sin turbina de extracción de vapor de condensación.
3. Turbina de contrapresión de vapor.
4. Turbina de extracción con condensación de vapor: relación flexible entre electricidad y calor.
5. Turbina de gas con recuperación de calor.
6. Motor de combustión interna.
7. Microturbinas.
8. Motores Stirling.
9. Pilas de combustible.
10. Motores de vapor.
11. Ciclos de Rankine orgánicos.

Motores alternativos

Rango de potencia: de 10 kW a 10 MW

Aplicaciones: universidades, hospitales, instalaciones de tratamiento de aguas, instalaciones industriales, edificios comerciales y viviendas plurifamiliares.

Turbinas de gas

Rango de potencia: de 1 MW a 300 MW

Aplicaciones: hospitales, universidades, plantas químicas, refinerías, industria alimentaria, industria papelera y bases militares.

Microturbinas



Rango de potencia: de 30 kW a 330 kW (paquetes modulares que superan 1 MW)

Aplicaciones: viviendas plurifamiliares, hoteles, residencias de ancianos, tratamiento de aguas residuales, producción de gas y petróleo.

Pilas de combustible

Rango de potencia: de 5 kW a 2,8 MW

Aplicaciones: centros de datos, hoteles, edificios de oficinas, tratamiento de aguas residuales

La fig. 68 muestra el rango de potencia de las tecnologías de cogeneración mencionadas anteriormente.



Fig. 68. Rango de potencia de las tecnologías de cogeneración [22].

Configuración estándar de una instalación de cogeneración (según la Decisión 2008/952/CE de la Comisión) [23]

Los principales componentes necesarios para el funcionamiento de una instalación de cogeneración impulsada por vapor (tecnologías 1-5) incluyen (fig. 69):

1. Una caldera para generar vapor.
2. Una turbina que convierte el vapor en energía cinética.
3. Un generador para transformar la energía cinética en energía eléctrica.
4. Un intercambiador de calor para suministrar calor útil a una red de calefacción urbana.
5. En aplicaciones industriales, los gases de escape a menudo pueden utilizarse directamente con fines de calefacción.

A menudo se instalan calderas adicionales como respaldo o para reforzar el sistema durante los periodos de alta demanda de calor, como en invierno. Estas calderas no se consideran parte de las unidades de cogeneración.

En algunos casos, la caldera que suministra vapor a la unidad de cogeneración puede tener una doble función, produciendo vapor tanto para la unidad de cogeneración como, por ejemplo, para clientes industriales (caldera de doble uso).

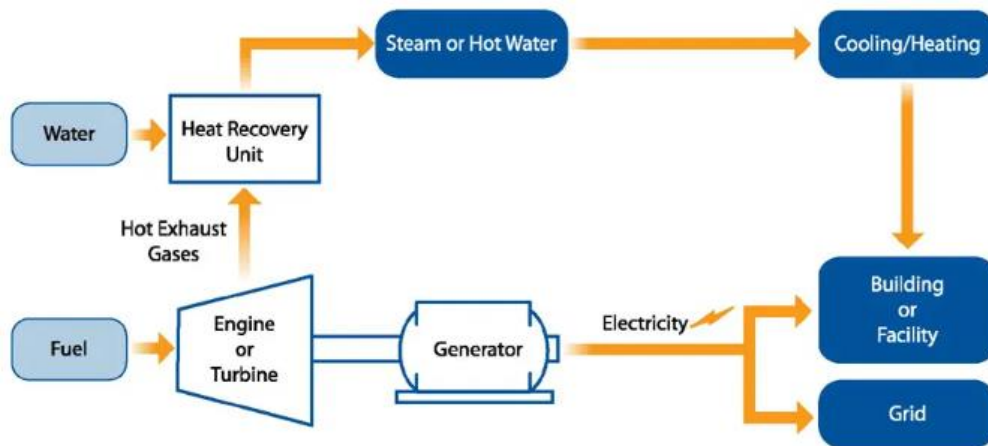


Fig. 69. Componentes principales del ciclo de cogeneración [22].

Parámetros principales (ecuaciones (1-5))

$$\text{Potencia eléctrica } (\dot{P}_e): \dot{P}_e = \frac{\dot{Q}_{fuel} \times \eta_{generator}}{\text{Inlet temperature of fluid}} \quad (1)$$

$$\text{Potencia térmica } (\dot{Q}_t): \dot{Q}_t = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$\text{Eficiencia global } (\eta_x): \eta_x = \frac{\dot{P}_e + \dot{Q}_t}{\dot{Q}_{fuel}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Relación calor-electricidad (C/E): } \frac{C}{E} = \frac{\dot{Q}_t}{\dot{Q}_e} \quad (4)$$

$$\text{Factor de carga: } FL = \frac{P_{average}}{P_{max}} \quad (5)$$

3.2 El papel de los sistemas de cogeneración en la producción de calor y su integración en diversas tecnologías, como las redes de calefacción urbana (DHN)

Los sistemas de cogeneración desempeñan un papel importante en la producción de calor, ya que generan simultáneamente electricidad y energía térmica útil a partir de una única fuente de combustible. Esta doble producción mejora la eficiencia energética al aprovechar el calor que, de otro modo, se desperdiciaría en los métodos convencionales de generación de electricidad. En lo que respecta a la producción de calor, los sistemas de cogeneración pueden suministrar calor a procesos industriales, edificios comerciales o sistemas de calefacción urbana. Esto permite una mayor eficiencia en comparación con las calderas tradicionales, ya que el calor que, de otro modo, se desperdiciaría en la generación de electricidad se utiliza para calentar agua o aire. Además, al generar electricidad in situ, los sistemas de cogeneración reducen las pérdidas asociadas al transporte de electricidad a larga distancia [24].

Eficiencias de la cogeneración



a) Si una unidad de cogeneración que utilice una tecnología de las enumeradas en los puntos 3 y del 5 al 11 alcanza una eficiencia global del 75 % o superior, se puede suponer que funcionó en modo de cogeneración completa durante el período observado o medido. Por lo tanto, toda la electricidad medida en las pinzas del generador se considera electricidad de cogeneración.

b) Si una unidad de cogeneración que utiliza una de las tecnologías enumeradas en los puntos 1, 2 y 4 alcanza una eficiencia global del 80 % o superior, se puede suponer que funcionó en modo de cogeneración completa durante el período observado. Por lo tanto, toda la electricidad medida en las pinzas del generador se considera electricidad de cogeneración.

c) Si la eficiencia global de la unidad de cogeneración se sitúa por debajo de estos umbrales mínimos, se puede suponer que la unidad no funcionó en modo de cogeneración completa durante el período de observación. En consecuencia, es probable que se generara tanto electricidad de cogeneración como electricidad no procedente de cogeneración.

Proceso de integración en la red de calefacción urbana (fig. 70)

1. Recuperación de calor: En un sistema de cogeneración, el exceso de calor producido al generar electricidad se captura y se utiliza con fines de calefacción. Este calor recuperado se inyecta posteriormente en la red de calefacción urbana (DHN). La conexión del sistema de cogeneración a la red permite suministrar calor a los usuarios residenciales, comerciales o industriales de la red.

2. Unidades de intercambio de calor: Un intercambiador de calor transfiere la energía térmica de los fluidos calientes del sistema de cogeneración (como los gases de escape o el refrigerante) al agua de calefacción urbana que circula por la red de calefacción urbana. El intercambiador de calor garantiza que la energía térmica se transfiera de manera eficiente sin mezclar las dos corrientes de fluido.

3. Equilibrio de la carga: Las redes de calefacción urbana suelen presentar una demanda de calor variable en función de la hora del día o la estación del año. La integración de sistemas de cogeneración puede ayudar a equilibrar esta carga. Durante los periodos de alta demanda, el sistema de cogeneración puede aumentar su producción de calor, mientras que durante los periodos de baja demanda puede reducir la generación de calor y centrarse más en la producción de electricidad.

4. Almacenamiento y regulación de energía: Para mejorar aún más la integración, pueden utilizarse sistemas de almacenamiento de calor (como los depósitos de almacenamiento de energía térmica). Estos sistemas almacenan el exceso de calor cuando la producción supera la demanda y lo liberan cuando la demanda supera el calor disponible del sistema de cogeneración. Esto mejora la flexibilidad de la red de calefacción urbana y garantiza un suministro de calor constante.

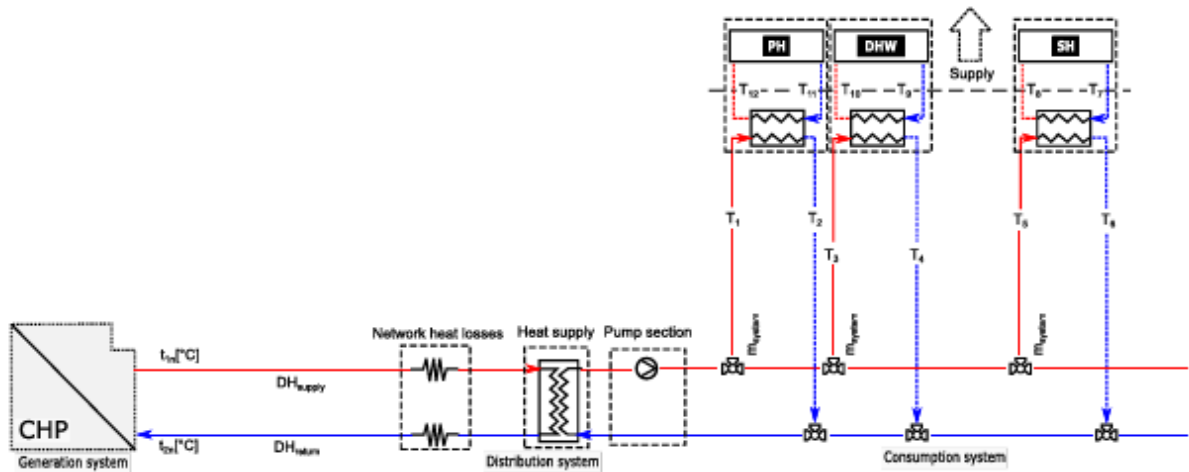


Fig. 70. Componentes principales del ciclo de cogeneración [25].

Ventajas de la tecnología de cogeneración

Ventajas generales de la cogeneración:

1. **Eficiencia energética:** La cogeneración permite la producción simultánea de electricidad y calor útil, lo que aumenta la eficiencia global del sistema y reduce el consumo de combustible.
2. **Reducción de emisiones:** Al mejorar la eficiencia, el sistema reduce las emisiones de contaminantes, lo que contribuye a la sostenibilidad.
3. **Flexibilidad:** Los sistemas de cogeneración pueden adaptarse a diferentes tipos de combustible y necesidades energéticas.
4. **Seguridad energética:** La diversificación de las fuentes de energía y la generación de energía a nivel local mejoran la seguridad del suministro.
5. **Reducción de los costes operativos:** La mayor eficiencia en el uso de los recursos puede reducir los costes operativos a largo plazo.

En el contexto de la red de calefacción y refrigeración urbana (DHN):

1. Energía

Mayor eficiencia: La cogeneración permite un uso más eficiente del calor residual de la producción de electricidad, lo que mejora el rendimiento general del sistema de calefacción y refrigeración.

Optimización de la carga térmica: La producción simultánea de calor y electricidad permite un mejor ajuste de la carga térmica en función de la demanda.

2. Medio ambiente



Reducción de emisiones: Al aprovechar el calor residual de la generación de electricidad, se reduce la necesidad de utilizar combustibles fósiles adicionales para la producción de calor, lo que disminuye las emisiones de CO₂.

Uso eficiente de los recursos: La cogeneración optimiza el uso de las fuentes de energía, lo que contribuye a la transición hacia sistemas más sostenibles.

3. Aspectos económicos

Ahorro en los costes energéticos: Al combinar la producción de electricidad y calor en un único proceso, se puede reducir el coste total de la energía suministrada a una red de calefacción urbana.

Incentivos económicos: Muchos sistemas de cogeneración reciben incentivos fiscales o subvenciones por su eficiencia energética, lo que mejora la rentabilidad de la inversión.

3.3 Retos operativos y técnicos de la integración de la cogeneración en las redes de calefacción urbana

Flexibilidad en el funcionamiento:

Variabilidad de la demanda: Las redes de calefacción urbana suelen experimentar una demanda de calor variable a lo largo del día, de las estaciones e incluso entre las diferentes regiones de la red. Los sistemas de cogeneración, sin embargo, suelen estar diseñados para un funcionamiento continuo a plena carga. Gestionar este desajuste requiere estrategias de control sofisticadas y sistemas de respaldo para garantizar un suministro adecuado.

Interacción con la red eléctrica: Las unidades de cogeneración deben ser capaces de ajustar su producción para adaptarse tanto a la demanda de calor en la red de calefacción urbana como a la demanda de energía en la red eléctrica, lo que puede resultar difícil en tiempo real. Esto aumenta la complejidad operativa, especialmente cuando se utilizan fuentes de energía renovables o intermitentes.

Integración con la infraestructura existente:

Retos de la adaptación: La adaptación de un sistema de cogeneración a una red de calefacción urbana existente puede implicar costosas mejoras en las tuberías, los intercambiadores de calor y los depósitos de almacenamiento. La integración de un sistema de cogeneración en redes más antiguas puede requerir infraestructura adicional, como depósitos de expansión, bombas o sistemas de alivio de presión, para dar cabida al calor generado.

Adaptación de la temperatura y la presión: Los niveles de temperatura y presión de la salida del sistema de cogeneración deben ajustarse a las especificaciones de la red de calefacción urbana existente. Si hay una discrepancia, podrían ser necesarios equipos adicionales, como intercambiadores de calor o dispositivos de control de presión, lo que puede aumentar la complejidad y el coste del sistema.

Fiabilidad del sistema:

Dependencia tanto del calor como de la electricidad: Los sistemas de cogeneración (CHP) proporcionan tanto electricidad como calor, lo que los convierte en elementos fundamentales para ambos suministros energéticos. Un fallo en una unidad de cogeneración puede interrumpir ambos servicios, afectando a la



calefacción en los meses de invierno o provocando cortes de electricidad. Por lo tanto, un mantenimiento regular y unos altos estándares operativos son esenciales para minimizar el tiempo de inactividad.

Redundancia y sistemas de respaldo: Para mejorar la fiabilidad, las redes de calefacción urbana deben contar con fuentes de calor de respaldo o sistemas de almacenamiento que garanticen que se pueda seguir suministrando calefacción en caso de fallo de la cogeneración. Esto conlleva costes de capital y operativos adicionales para mantener dichos sistemas de respaldo.

Control de combustibles y emisiones:

Suministro y disponibilidad de combustible: En el caso de los sistemas de cogeneración que funcionan con combustibles fósiles, como el gas natural, es esencial garantizar un suministro estable y rentable de combustible. Para los sistemas de cogeneración basados en biomasa, la disponibilidad de fuentes de combustible sostenibles debe ser constante. Estas dependencias de la cadena de suministro pueden complicar la planificación y las operaciones.

Cumplimiento de la normativa medioambiental: Muchas regiones cuentan con normativas estrictas en materia de emisiones, especialmente en lo que respecta al CO_2 , los NO_x y las partículas en suspensión. Los sistemas de cogeneración deben estar equipados con tecnología para controlar las emisiones, como depuradores, filtros o técnicas avanzadas de combustión. La gestión de estas emisiones en tiempo real, especialmente ante una demanda variable, añade un nivel adicional de complejidad. Además, la integración de la cogeneración con fuentes de energía renovables, como el biogás o el calor residual, requiere una planificación adicional en cuanto a la calidad del combustible y la gestión de las emisiones.

Eficiencia energética

Mayor eficiencia: Los sistemas de cogeneración suelen ser mucho más eficientes que la generación separada de calor y electricidad. En los sistemas convencionales, se desperdicia energía al producir electricidad y se necesita combustible adicional para la producción de calor. La cogeneración aprovecha este calor «residual» para satisfacer las necesidades de calefacción, lo que la hace más eficiente al recuperar y utilizar la energía térmica que, de otro modo, se perdería.

Aumento de la eficiencia: Un sistema típico de cogeneración puede alcanzar eficiencias globales del 60-80 %, frente al 35-45 % de la producción convencional separada de calor y electricidad. En aplicaciones de calefacción urbana, el calor residual puede suministrarse a edificios residenciales, industriales o comerciales, lo que reduce el consumo energético global.

Flexibilidad operativa: La cogeneración puede responder de forma dinámica a las demandas de calefacción, ajustando la producción de electricidad y calor para adaptarse a las variaciones de la carga, lo que optimiza aún más el uso de la energía.

Ahorro

Reducción de los costes energéticos: Al generar tanto calor como electricidad a partir de una única fuente de combustible, los sistemas de cogeneración reducen el consumo de combustible en comparación con los sistemas de producción separada. Esto se traduce en menores costes operativos, especialmente cuando la demanda de electricidad y calor es elevada. El sistema también puede beneficiarse de economías de escala, lo que reduce aún más los costes.

Seguridad energética: En regiones con redes eléctricas poco fiables, la cogeneración proporciona seguridad energética al ofrecer una generación de energía descentralizada. Esto puede reducir la



dependencia de fuentes de energía externas, estabilizar los precios de la energía y generar ahorros a largo plazo.

Inversión y amortización (ecuación (6)): La inversión de capital inicial para los sistemas de cogeneración puede ser elevada, pero ofrecen ahorros a largo plazo gracias a la reducción de los costes energéticos y a posibles incentivos. Los periodos de amortización suelen oscilar entre 5 y 10 años, dependiendo del tamaño del sistema, el tipo de combustible y los precios locales de la energía.

$$\text{Payback time} = \frac{\text{Initial investment}}{\text{Annual savings}} \quad (6)$$

Ejemplo práctico (Epperson y Jane):

La turbina de gas funciona 7 800 horas al año; [la tabla 1](#) presenta los datos económicos.

Ahorro anual total	1 650 000 \$
Coste de capital estimado	9 075 000 \$
Amortización simple	5,5 años

Tabla 1. Datos económicos del caso práctico de Epperson & Jane.

Impacto medioambiental

Menores emisiones de carbono: Al aprovechar el calor residual y reducir la necesidad de centrales eléctricas independientes, los sistemas de cogeneración pueden reducir significativamente las emisiones de carbono. Las mejoras en la eficiencia reducen la cantidad total de combustible necesaria, lo que se traduce directamente en menores emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, al utilizar gas natural, un sistema de cogeneración puede reducir las emisiones de CO₂ entre un 20 % y un 40 % en comparación con la producción separada de calor y electricidad.

Energía más limpia: Los sistemas de cogeneración pueden funcionar con diversos combustibles, incluidos los renovables como la biomasa o el biogás, lo que reduce aún más su huella medioambiental. La transición del carbón o el petróleo a fuentes más limpias, como el gas natural o la biomasa renovable, puede reducir drásticamente los contaminantes como los NO_x, los SO_x y las partículas en suspensión.

Eficiencia en la conversión de energía (ecuación (7)): La cogeneración contribuye a un sistema energético más sostenible al reducir el consumo de combustible, disminuir el impacto medioambiental global y mejorar la eficiencia en el uso de la energía en múltiples sectores (generación de electricidad, calefacción, etc.).

$$E_{CO_2} = \frac{Q_{fuel} \times \text{Emission factor}}{\text{Calorific value of the fuel}} \quad (7)$$



4. Aspectos económicos y medioambientales de las redes de calefacción urbana

4.1 Introducción

Teniendo en cuenta la demanda de calefacción (fig. 71), la producción de calefacción urbana se mantuvo relativamente similar a la del año anterior en 2022, cubriendo alrededor del 9 % de las necesidades finales de calefacción a nivel mundial en edificios e industria. Tal y como demuestran las redes con mejores resultados, la calefacción urbana ofrece un gran potencial para la integración a gran escala, eficiente, rentable y flexible de fuentes de energía de bajas emisiones en la combinación energética de calefacción. Sin embargo, el potencial de descarbonización de la calefacción urbana está en gran medida sin explotar, ya que los combustibles fósiles siguen dominando el suministro de las redes de calefacción urbana (como en Europa, fig. 72) a nivel mundial (alrededor del 90 % de la producción total de calor), especialmente en los dos mayores mercados: China y Rusia. Alinearse con el escenario de «Emisiones netas cero para 2050» (NZE) requiere esfuerzos significativamente mayores para mejorar rápidamente la eficiencia energética de las redes existentes y sustituirlas por fuentes de calor renovables (como la bioenergía, la energía solar térmica, las bombas de calor a gran escala y la energía geotérmica) [26].

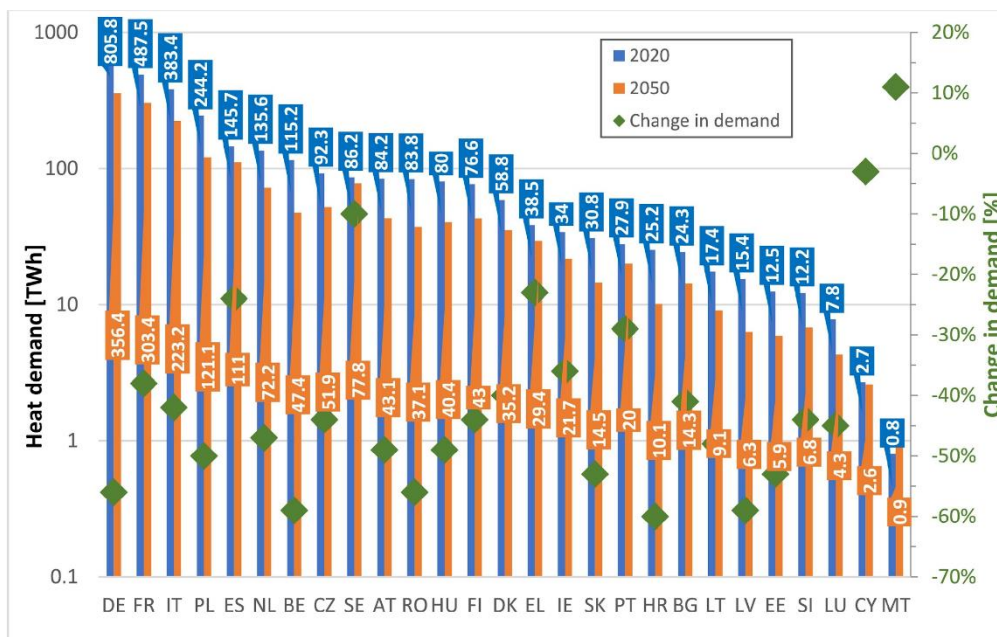


Fig. 71. Niveles de demanda de calor útil (TWh) en 2020 y 2050, y los cambios relativos en los sectores residencial y terciario (eje Y secundario) según el escenario más optimista [27].

En Europa, la calefacción urbana ha logrado avances significativos en la integración de fuentes de energía renovables y en la mejora de la eficiencia energética. Según datos de 2022, más de 19 000 redes de calefacción urbana en los países europeos analizados suministran calefacción a más de 77,3 millones de personas. Estas redes han alcanzado una cuota del 42,6 % de fuentes de calor renovables y de residuos. Países como Finlandia y Dinamarca están a la vanguardia en la adopción de estas soluciones. En Finlandia, la calefacción urbana representa aproximadamente el 50 % del mercado total de la calefacción, y más del 90 % de los edificios de viviendas están conectados a estas redes.

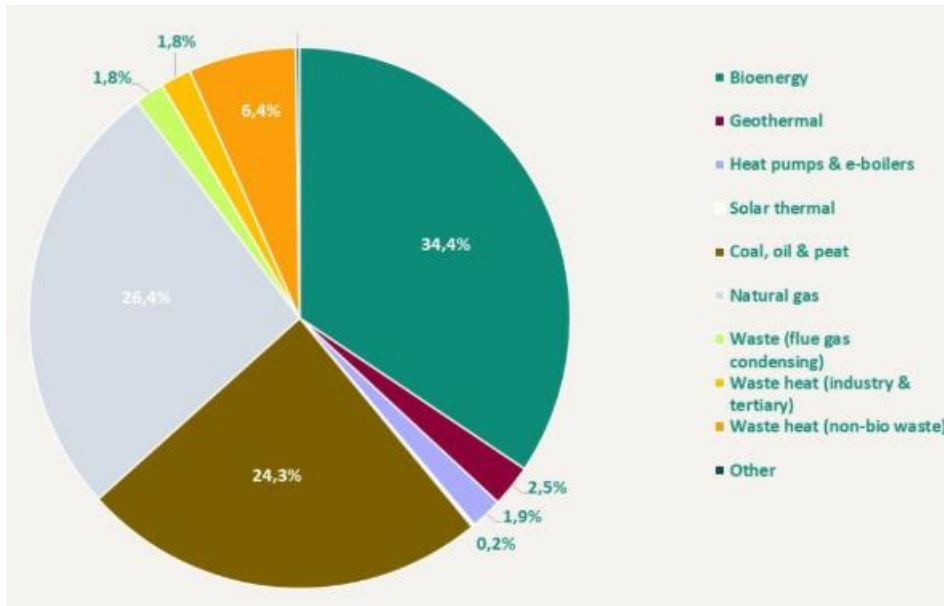


Fig. 72. Fuentes de energía en la calefacción urbana europea en 2022 [27].

4.2 Análisis económico en profundidad de los sistemas de producción de calor

Análisis económico - Introducción:

Definición: El análisis económico en la producción de calor evalúa la rentabilidad, la viabilidad financiera y la sostenibilidad a largo plazo de las diferentes tecnologías.

Indicadores clave [28]:

1. Gastos de capital (CAPEX).
2. Gastos de explotación (OPEX).
3. Coste nivelado de la calor (LCOH).
4. Rentabilidad de la inversión (ROI).
5. Período de amortización.

1. Gastos de capital (CAPEX):

Los gastos de capital (CAPEX) se refieren a las inversiones realizadas por una empresa en activos fijos a largo plazo, como edificios, maquinaria y tecnología, que son esenciales para su funcionamiento y crecimiento. Estas inversiones pueden clasificarse en dos categorías principales:

CAPEX de mantenimiento: inversiones destinadas a mantener o reparar los activos existentes para garantizar su correcto funcionamiento.

CAPEX de expansión: inversiones centradas en la adquisición de nuevos activos o en la mejora de los ya existentes para aumentar la capacidad de producción o entrar en nuevos mercados.

Entre los componentes típicos del CAPEX se incluyen:

1. Equipos
2. Instalación
3. Infraestructura
4. Costes de integración de sistemas



2. Gastos de explotación (OPEX)

Los OPEX incluyen los costes recurrentes para el funcionamiento y mantenimiento eficientes de un sistema de calefacción y refrigeración centralizados (DHC). Los componentes clave son:

1. **Energía/combustible:** los costes suponen un gasto significativo que se ve afectado por las fluctuaciones del precio del combustible. Las fuentes renovables ofrecen costes más estables a largo plazo.
2. **Mantenimiento:** Abarca inspecciones, reparaciones e intervenciones imprevistas para garantizar la fiabilidad.
3. **Costes de mano de obra:** salarios y prestaciones del personal operativo, que suelen representar entre el 30 % y el 50 % del OPEX total.
4. **Supervisión del sistema:** software, análisis y formación para el seguimiento del rendimiento en tiempo real, lo que mejora la eficiencia y reduce los costes.

3. Coste nivelado de la calefacción (LCOH):

El coste nivelado de la calor (LCOH) es un indicador que evalúa el coste medio de producir calor a lo largo de la vida útil de un sistema de calefacción. Incluye todos los gastos relevantes, como la inversión inicial de capital, los costes operativos y de mantenimiento, y los gastos en combustible, normalizados sobre la producción total de calor. Este indicador permite realizar una comparación coherente entre diferentes tecnologías y sistemas de calefacción.

Definición y fórmula:

El LCOH se calcula mediante la siguiente fórmula (ecuación (8)):

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{I_t + O_t + F_t}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{t=1}^n \left(\frac{\dot{Q}_t}{(1+r)^t} \right)} \quad (8)$$

Donde:

I_t = Gastos de inversión en el año t

O_t = Costes de explotación y mantenimiento en el año t

F_t = Costes de combustible en el año t

$\dot{Q}_t$ = Calor producido en el año t

r = Tasa de descuento

n = Vida útil prevista del sistema

La fórmula mencionada anteriormente calcula el valor actual de los costes totales a lo largo de la vida útil del sistema, dividido por el valor actual del calor total producido, lo que proporciona un coste uniforme por unidad de calor generado.

Importancia en la evaluación económica

El LCOH es fundamental por varias razones:



1. Comparación de tecnologías: ofrece un método estandarizado para comparar el rendimiento económico de diversas tecnologías de calefacción, lo que facilita la toma de decisiones fundamentadas.
2. Decisiones de inversión: al comprender el LCOH, las partes interesadas pueden evaluar la viabilidad financiera a largo plazo de los proyectos de calefacción, lo que ayuda a destinar los recursos a las soluciones más rentables.
3. Elaboración de políticas: Los responsables políticos pueden utilizar los análisis del LCOH para diseñar incentivos y normativas que promuevan tecnologías de calefacción eficientes y sostenibles.

4. Rentabilidad de la inversión (ROI) y periodo de amortización

En el contexto de los sistemas de calefacción y refrigeración urbanas (DHC), evaluar indicadores de eficiencia como el coste por MWh de calor producido y el retorno de la inversión (ROI) junto con los periodos de amortización es esencial para valorar su viabilidad económica y su rendimiento.

Coste por MWh de calor producido:

El coste por megavatio-hora (MWh) de calor producido en los sistemas de DHC varía en función de factores como las fuentes de energía, la eficiencia del sistema y las condiciones económicas regionales. Por ejemplo, un estudio sobre sistemas eficientes de DHC en la UE puso de relieve que el coste por MWh puede variar significativamente en función de la combinación de fuentes de calor y tecnologías de generación.

Rentabilidad de la inversión (ROI) y periodos de amortización:

Los gastos de capital iniciales, los costes operativos y las fuentes de ingresos influyen en el ROI y los periodos de amortización de los sistemas de calefacción y refrigeración centralizados. Un informe sobre los factores que determinan los costes en los sistemas de calefacción urbana señaló que los sistemas de calefacción y refrigeración centralizados neerlandeses, por ejemplo, presentan variaciones en el coste por MWh producido, lo que puede afectar al ROI global y a los periodos de amortización.

Estudios de caso y comparación económica

Corea del Sur [29]:

Los sistemas de calefacción urbana de mayor tamaño se benefician de las economías de escala, que reducen los costes medios a medida que aumenta el tamaño del sistema. Como resultado, la rentabilidad mejora con la expansión del sistema, lo que hace que las implantaciones a mayor escala resulten más ventajosas desde el punto de vista económico.

Cogeneración frente a bombas de calor: rendimiento económico:

Los sistemas de cogeneración ofrecen una eficiencia de aproximadamente el 70 % y unos costes operativos más bajos, pero requieren una elevada inversión de capital, que suele oscilar entre 1.250 y 3.300 dólares por kilovatio. Las bombas de calor también ofrecen bajos costes operativos, con una eficiencia que depende del coeficiente de rendimiento (COP) y de la fuente de electricidad; sin embargo, también implican unos costes iniciales significativos.

Europa:



La calefacción urbana facilita la integración a gran escala de fuentes de energía con bajas emisiones de carbono, lo que contribuye a unos sistemas energéticos más sostenibles. A medida que estas redes se expanden, ofrecen mayor flexibilidad, mayor eficiencia y mayor rentabilidad.

Conclusión:

La ampliación de los sistemas de calefacción y refrigeración urbanísticas (DHC) mejora la eficiencia y reduce los costes, lo que favorece la calefacción y la refrigeración urbanas sostenibles.

Factores que influyen en los costes de cada sistema

1. Sistemas de cogeneración:

Costes de combustible: El precio y la disponibilidad del combustible principal (por ejemplo, el gas natural) influyen directamente en los gastos operativos.

Gastos de capital (CAPEX): Altos costes iniciales debido a los requisitos de equipamiento, instalación e infraestructura.

Costes de mantenimiento: Es necesario un mantenimiento periódico para garantizar un rendimiento óptimo, lo que se suma a los gastos operativos.

2. Bombas de calor:

Costes de electricidad: Los costes operativos dependen de los precios de la electricidad y de la eficiencia del sistema.

Costes de instalación: Los gastos relacionados con el equipo y la puesta en marcha pueden ser considerables, especialmente en el caso de sistemas que requieren una red de conductos extensa o instalaciones geotérmicas.

Variabilidad del rendimiento: La eficiencia puede disminuir a temperaturas extremas, lo que podría aumentar los costes operativos.

4.3 Impacto medioambiental del sistema de producción de calor

Impacto medioambiental: Introducción:

Las evaluaciones de impacto ambiental (EIA) son procesos sistemáticos diseñados para evaluar las posibles consecuencias medioambientales de los proyectos o desarrollos propuestos antes de que se pongan en marcha. El objetivo principal de una EIA es garantizar que los responsables de la toma de decisiones tengan en cuenta los impactos medioambientales junto con los factores económicos y sociales, promoviendo el desarrollo sostenible y minimizando los efectos medioambientales adversos [30].

Importancia de la evaluación ambiental [30]

La realización de una EIA es fundamental por varias razones:

1. **Toma de decisiones fundamentada:** Las EIA proporcionan datos exhaustivos sobre los posibles impactos medioambientales, lo que permite a las partes interesadas tomar decisiones bien fundamentadas que equilibran las necesidades de desarrollo con la preservación del medio ambiente.



2. Cumplimiento normativo: Muchas jurisdicciones exigen la realización de EIA para proyectos específicos con el fin de garantizar el cumplimiento de la normativa y las normas medioambientales.
3. Participación pública: El proceso de la EIA suele incluir consultas públicas, lo que fomenta la transparencia y permite a las comunidades expresar sus preocupaciones y contribuir a la planificación del proyecto.
4. Mitigación de los impactos negativos: Al identificar de forma temprana los posibles efectos adversos, las EIA facilitan el desarrollo de estrategias para evitar, minimizar o compensar el daño medioambiental.

Factores clave analizados

Una EIA suele examinar una serie de factores para evaluar la huella medioambiental de un proyecto:

1. Escala y naturaleza del proyecto.
2. Características del emplazamiento.
3. Posibles impactos medioambientales.
4. Efectos acumulativos.
5. Medidas de mitigación.
6. Marco normativo.

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son un factor fundamental a la hora de evaluar el impacto medioambiental de los sistemas de calefacción. Dos tecnologías muy extendidas, los sistemas de cogeneración y las bombas de calor, presentan diferencias significativas en sus perfiles de emisiones de GEI.

Emisiones de CO₂ en los sistemas de cogeneración:

Los sistemas de cogeneración producen simultáneamente electricidad y calor a partir de una única fuente de combustible, normalmente gas natural. Este proceso de producción dual mejora la eficiencia energética global en comparación con los métodos de generación separados. Según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), un sistema convencional de cogeneración alimentado con gas natural de 1 megavatio (MW) puede reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 50 % en comparación con la generación tradicional separada de calor y electricidad, lo que equivale a una reducción de unas 4.100 toneladas de CO₂ al año [\[31\]](#).

Sin embargo, las emisiones exactas dependen de factores como el tipo de combustible utilizado, la eficiencia del sistema y las prácticas operativas. Aunque los sistemas de cogeneración ofrecen reducciones sustanciales de CO₂ en comparación con los métodos convencionales, no están totalmente libres de emisiones debido a su dependencia de los combustibles fósiles.

Emisiones bajas o nulas con bombas de calor

Las bombas de calor transfieren calor utilizando electricidad, y sus emisiones dependen de la intensidad de carbono de la red eléctrica. En regiones con electricidad baja en carbono, pueden alcanzar emisiones casi nulas. Incluso las redes con alta intensidad de carbono emiten al menos un 20 % menos de gases



de efecto invernadero que las calderas de gas, llegando a reducciones de hasta el 80 % con redes más limpias (AIE). Los avances en los refrigerantes y la descarbonización de la red eléctrica potenciarán aún más sus ventajas, lo que convertirá a las bombas de calor en una solución clave para la calefacción con bajas emisiones [32].

Utilización de recursos:

Combustibles fósiles: Recursos finitos que requieren extracción y transporte, lo que provoca daños medioambientales y elevadas emisiones de gases de efecto invernadero.

Electricidad renovable: Fuentes que se reponen de forma sostenible (eólica, solar, hidroeléctrica, etc.) con menores emisiones y un mayor rendimiento energético a lo largo de su vida útil.

La fig. 73 muestra una comparación entre los combustibles fósiles y la energía limpia (electricidad renovable) con una previsión hasta 2030.

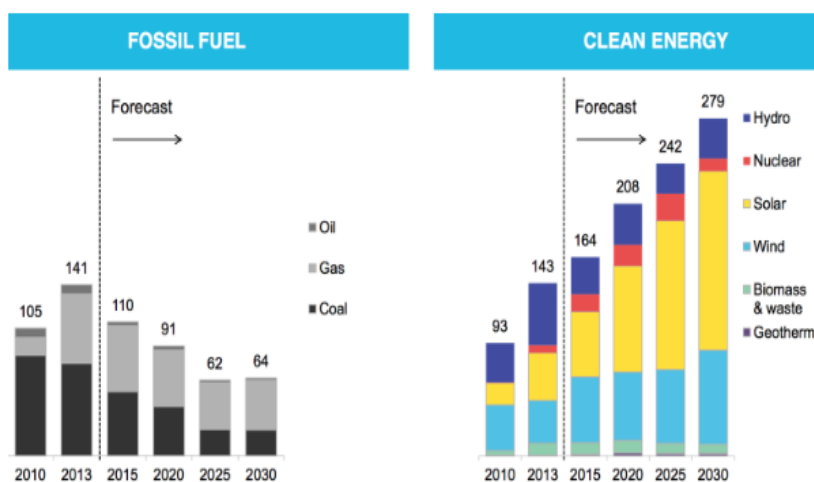


Fig. 73. Previsión de la capacidad de generación de los combustibles fósiles frente a la de la energía limpia [33].

Eficiencia y sostenibilidad:

Eficiencia: Las energías renovables convierten la energía con pérdidas mínimas, a diferencia de los combustibles fósiles, que adolecen de elevadas ineficiencias en la extracción y la conversión.

Sostenibilidad: Las fuentes renovables garantizan la disponibilidad de energía a largo plazo con un impacto medioambiental mínimo, preservando los recursos para las generaciones futuras.

Contaminantes y calidad del aire

NO_x, SO_x y partículas procedentes de la cogeneración: Los sistemas de cogeneración, especialmente los que utilizan combustibles fósiles, emiten contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y partículas en suspensión. Aunque los sistemas de cogeneración son más eficientes que la generación separada de calor y electricidad, lo que reduce las emisiones totales, siguen contribuyendo a la contaminación atmosférica. Los niveles exactos de emisión dependen del tipo de combustible y de la tecnología utilizada.



Emisiones insignificantes de **las bombas de calor**: Las bombas de calor funcionan transfiriendo calor en lugar de generarlo mediante combustión, lo que da lugar a emisiones in situ mínimas de NO_x , SO_x o partículas. Su impacto medioambiental depende principalmente de la intensidad de carbono de la electricidad utilizada para alimentarlas. A medida que las redes eléctricas incorporan más fuentes de energía renovable, las emisiones indirectas asociadas a las bombas de calor siguen disminuyendo, lo que las convierte en una alternativa más limpia para las necesidades de calefacción y refrigeración.

Evaluación del ciclo de vida (LCA)

El análisis del ciclo de vida (ACV) (fig. 74) evalúa los impactos medioambientales de un producto o sistema a lo largo de toda su vida útil, desde la extracción de las materias primas hasta su eliminación. En el ámbito de las tecnologías de calefacción, el ACV compara de forma exhaustiva los sistemas de cogeneración y las bombas de calor.

Evaluación del impacto desde la producción hasta el desmantelamiento

Sistemas de cogeneración: Las unidades de cogeneración generan electricidad y calor a partir de una única fuente de combustible, a menudo gas natural o biomasa. El ACV de los sistemas de cogeneración comprende varias etapas:

1. Extracción y procesamiento del combustible
2. Fabricación e instalación.
3. Fase operativa.
4. Desmantelamiento y eliminación.

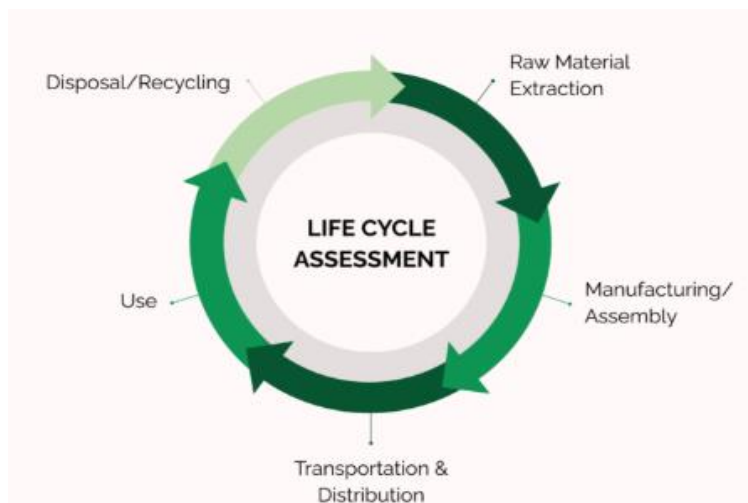


Fig. 74. Ciclo de producción del ACV [34].

Bombas de calor:

1. PGE: Las bombas de calor tienen un PGE más bajo; los sistemas en cascada lo reducen en un 85,4 % en comparación con las calderas de gas.
2. Contaminación atmosférica: La cogeneración emite NO_x y partículas; las bombas de calor tienen emisiones directas insignificantes.
3. Eficiencia: La cogeneración reutiliza el calor residual, pero depende del combustible; las bombas de calor (con una eficiencia del 300-400 %) son más sostenibles con energías renovables.
4. Impacto del ciclo de vida: Las bombas de calor tienen un mayor impacto en la fase de producción, pero lo compensan gracias a un funcionamiento más limpio.



Consumo de agua y contaminación térmica

Consumo de agua en la cogeneración: Los sistemas de cogeneración suelen requerir una cantidad significativa de agua para los procesos de refrigeración. Este consumo puede suponer una carga para los recursos hídricos locales, especialmente en regiones con escasez de agua.

Impacto mínimo con las bombas de calor: Las bombas de calor suelen tener una huella hídrica menor y no dependen de procesos de refrigeración que requieran un uso intensivo de agua. Sin embargo, las bombas de calor de fuente de agua pueden causar contaminación térmica localizada al verter agua calentada de nuevo en masas de agua naturales, lo que podría afectar a los ecosistemas acuáticos.

Si bien los sistemas de cogeneración pueden ejercer presión sobre los recursos hídricos y contribuir a la contaminación térmica, las bombas de calor suelen representar una alternativa más respetuosa con el medio ambiente en lo que respecta al consumo de agua, con algunas consideraciones para tipos específicos como las bombas de calor de fuente de agua.

Estudio de caso: Impacto medioambiental (cogeneración) [35]

Se llevó a cabo una evaluación ambiental comparativa de la configuración de una planta de cogeneración para la industria mexicana del petróleo y el gas. El estudio evaluó tres escenarios:

1. Caso 1: Utilización de generadores de turbina de vapor con una eficiencia del 58 %.
2. Caso 2: Implementación de una turbina de gas acoplada a un generador de vapor con recuperación de calor, con una eficiencia combinada del 87 %.
3. Caso 3: Incorporación de la captura de CO₂ tras la combustión al Caso 2.

Los resultados indicaron que el caso 2 reducía los impactos medioambientales en todas las categorías evaluadas en comparación con el caso de referencia. Concretamente, el potencial de calentamiento global (GWP) disminuyó de 626 kg de CO₂e/MWh en el caso de referencia a 460 kg de CO₂e/MWh en el caso 2. Además, el caso 3 alcanzó un GWP de 42 kg de CO₂e/MWh, capturando aproximadamente 1 075 toneladas de CO₂ al día con una eficiencia de recuperación del 95 %.

Estudio de caso: Impacto medioambiental (bomba de calor) [36]

Se llevó a cabo una evaluación medioambiental exhaustiva de la rehabilitación de la Hopkins Academy, un colegio de Massachusetts, que pasó de un sistema de calefacción a gasóleo a una bomba de calor geotérmica. El estudio reveló importantes beneficios medioambientales:

1. **Consumo energético:** La rehabilitación redujo el consumo energético del colegio de aproximadamente 5.120 gigajulios (GJ) a 1.580 GJ al año, lo que supone un ahorro de unos 3.540 GJ.
2. **Emisiones de gases de efecto invernadero:** Las emisiones anuales de GEI disminuyeron de 362 toneladas métricas a 37 toneladas métricas, lo que supone una reducción de 325 toneladas métricas.

La transición a una bomba de calor geotérmica en la Hopkins Academy también redujo significativamente las emisiones de contaminantes atmosféricos. Las emisiones anuales se redujeron en aproximadamente 312 kilogramos, pasando de 392 kilogramos a 80 kilogramos.



4.4 Tendencias del mercado y del sector, precios y competencia en el mercado de la cogeneración y las bombas de calor

Tendencias del mercado – Introducción

Evolución de las tecnologías de producción de calor: Los métodos de calefacción han avanzado significativamente, pasando de las tradicionales calderas de carbón a soluciones modernas y eficientes desde el punto de vista energético. Los primeros sistemas dependían en gran medida de la quema de combustibles sólidos, lo que suponía un uso intensivo de mano de obra y era perjudicial para el medio ambiente. La Revolución Industrial introdujo la calefacción por vapor y eléctrica, mejorando la eficiencia y el control. En las últimas décadas, la atención se ha desplazado hacia las tecnologías sostenibles, y las bombas de calor se han convertido en una solución líder debido a su capacidad para utilizar fuentes de energía renovables.

El papel cada vez más importante de las bombas de calor: Las bombas de calor han ganado protagonismo como solución de calefacción sostenible, y su cuota en la calefacción de espacios a nivel mundial ascendió a alrededor del 10 % en 2021. Este crecimiento viene impulsado por su alta eficiencia y su compatibilidad con las fuentes de energía renovables. Sin embargo, la dinámica del mercado puede fluctuar; por ejemplo, en 2024, las ventas de bombas de calor en Europa experimentaron un descenso del 23 %, volviendo a los niveles anteriores a 2022, debido a la incertidumbre política y a factores económicos. A pesar de estos retos, algunas regiones, como el Reino Unido, registraron un aumento del 63 % en las ventas, lo que indica que las tasas de adopción varían entre los distintos mercados [37].

Crecimiento de las bombas de calor

Impulsado por los objetivos de descarbonización: Las bombas de calor son esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en consonancia con los esfuerzos globales de descarbonización. Su adopción puede reducir significativamente las emisiones de CO₂, con reducciones potenciales de al menos 500 millones de toneladas métricas para 2030, lo que equivale a las emisiones anuales de todos los coches europeos. En Estados Unidos, para lograr una reducción del 50 % al 52 % en las emisiones domésticas de combustibles fósiles para 2030 es necesario un crecimiento sustancial de las instalaciones de bombas de calor, con tasas de crecimiento anual previstas de entre el 10 % y el 15 % durante la próxima década [38].

Avances tecnológicos: Las innovaciones recientes han mejorado la eficiencia de las bombas de calor y ampliado su aplicabilidad. Entre los avances se incluyen los compresores de velocidad variable que se ajustan a las demandas de calefacción, mejorando la eficiencia energética y el rendimiento en diversos climas. Además, las bombas de calor modernas pueden alcanzar mayores capacidades de calefacción sin requerir modificaciones significativas en la infraestructura existente, lo que facilita su integración en hogares y empresas. Estos avances convierten a las bombas de calor en una opción más viable y atractiva para los consumidores, lo que refuerza su creciente papel en las soluciones de calefacción sostenible. La fig. 75 ofrece información sobre el tamaño del mercado de las bombas de calor.

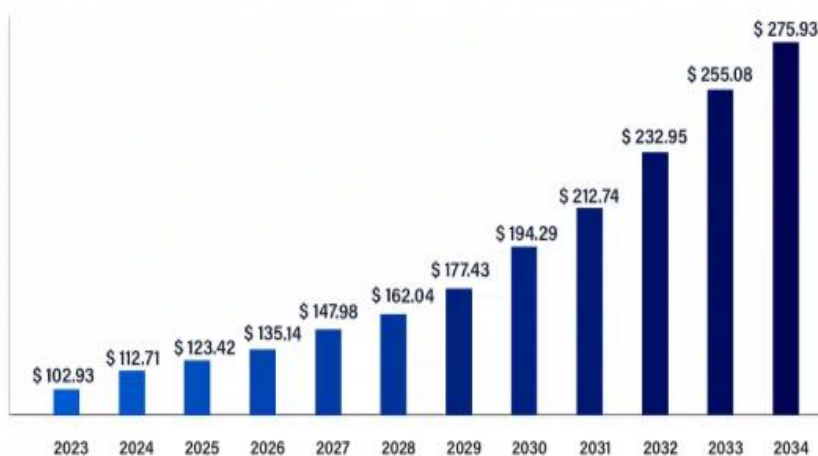


Fig. 75. Tamaño del mercado de las bombas de calor de 2023 a 2034 (miles de millones de dólares) [39].

Tendencias del mercado de la cogeneración

Enfoque en la mejora de la eficiencia: Los sistemas de cogeneración gozan de un reconocimiento cada vez mayor por su alta eficiencia, ya que alcanzan niveles operativos de hasta el 80 %, superando con creces la eficiencia de aproximadamente el 50 % de los métodos tradicionales de generación separada de calor y electricidad. Esta eficiencia se debe principalmente a la producción simultánea de electricidad y energía térmica a partir de una única fuente de combustible, lo que reduce el desperdicio de energía. Se prevé que el sector industrial, en particular, experimente una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) superior al 6 % para 2032 en la adopción de la cogeneración, impulsada por la necesidad de eficiencia energética y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Integración con energías renovables: La integración de los sistemas de cogeneración con fuentes de energía renovables se está convirtiendo en un enfoque estratégico para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad energéticas. Al combinar la cogeneración con tecnologías como las bombas de calor, que funcionan a bajos precios de la electricidad gracias al excedente de energía renovable, las instalaciones pueden optimizar el uso de la energía y estabilizar los mercados eléctricos. Este enfoque híbrido permite un funcionamiento flexible, en el que las plantas de cogeneración pueden generar electricidad y calor durante los picos de demanda. Por el contrario, las bombas de calor aprovechan el exceso de energía renovable, mejorando la eficiencia general del sistema y reduciendo las emisiones de carbono. La fig. 76 ofrece información sobre el tamaño del mercado de la cogeneración [40].

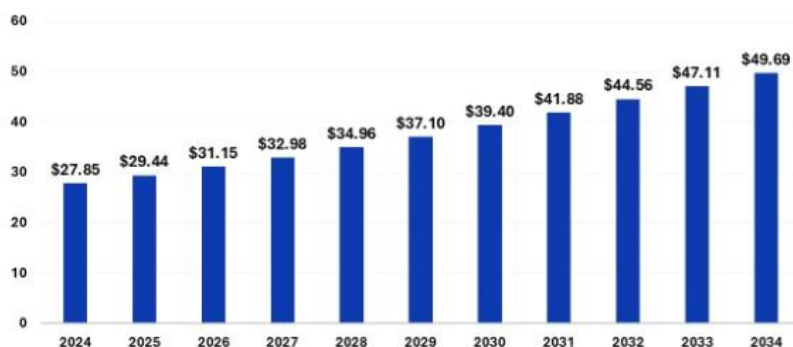


Fig. 76. Volumen del mercado de la cogeneración de 2024 a 2034 (en miles de millones de dólares) [39].



Dinámica de los precios

Precios de la energía y su impacto: Las fluctuaciones en los precios de la energía influyen significativamente en la adopción y los costes operativos de los sistemas de cogeneración y las bombas de calor. Entre 2019 y 2022, los precios minoristas de la energía experimentaron aumentos notables: los precios de la electricidad subieron entre un 6 % y un 14 %, los del gas natural entre un 22 % y un 46 %, los del gasóleo de calefacción un 35 % y los del propano entre un 33 % y un 50 %. Estos cambios afectan a la rentabilidad de las tecnologías de calefacción, ya que las bombas de calor dependen principalmente de la electricidad, mientras que los sistemas de cogeneración suelen utilizar gas natural. En consecuencia, el aumento de los precios del gas natural puede hacer que los sistemas de cogeneración resulten menos económicos que las bombas de calor, cuya competitividad depende de que los precios de la electricidad se mantengan estables o tiendan a bajar.

Papel del desarrollo tecnológico: Los avances tecnológicos tienen un profundo impacto en el coste y la eficiencia tanto de los sistemas de cogeneración como de las bombas de calor. Por ejemplo, la integración de la microcogeneración con bombas de calor eléctricas, almacenamiento térmico y sistemas fotovoltaicos ha demostrado eficiencias anuales superiores al 130 % en la generación de calor, frío y agua caliente. Estas innovaciones mejoran el rendimiento y reducen los costes operativos, lo que hace que estos sistemas resulten más atractivos para los consumidores. Los análisis económicos indican que las bombas de calor son rentables, con un periodo de amortización máximo de 16 años, lo que incentiva aún más su adopción [\[41-43\]](#).

Posición en el mercado

La competencia entre las bombas de calor (BC) y los sistemas de cogeneración en el sector energético viene determinada por sus características operativas y ámbitos de aplicación distintivos. Las bombas de calor, que aprovechan la electricidad para transferir calor de niveles de temperatura más bajos a más altos, gozan de una preferencia cada vez mayor en las estrategias de calefacción con bajas emisiones de carbono. Su posición en el mercado se está fortaleciendo gracias a los avances en eficiencia, la integración con fuentes de energía renovables y las políticas de descarbonización.

Por el contrario, los sistemas de cogeneración, que generan simultáneamente electricidad y calor útil a partir de una única fuente de combustible, han ocupado tradicionalmente una posición sólida en aplicaciones industriales y de calefacción urbana. Su elevada eficiencia global y su capacidad para proporcionar generación de energía in situ han mantenido su relevancia, especialmente en zonas con una infraestructura de gas consolidada. Sin embargo, el creciente énfasis en la reducción de las emisiones de carbono ha supuesto un reto para su expansión en el mercado, sobre todo cuando los combustibles fósiles son la principal fuente de energía.

Factores que influyen en la competitividad:

1. Eficiencia energética y rendimiento.
2. Huella de carbono y sostenibilidad.
3. Costes energéticos y viabilidad económica.
4. Marco normativo y regulatorio.
5. Consideraciones sobre la infraestructura y la red eléctrica.
6. Requisitos específicos de cada aplicación.

Innovaciones tecnológicas

Bombas de calor de alta temperatura



Las bombas de calor de alta temperatura (HTHP) se están imponiendo como una innovación clave en el sector de la calefacción. A diferencia de las bombas de calor convencionales, las HTHP pueden suministrar temperaturas superiores a 100 °C, lo que las hace adecuadas para aplicaciones industriales y redes de calefacción urbana. El desarrollo de refrigerantes avanzados, las mejoras en las tecnologías de los compresores y la integración con sistemas de recuperación de calor residual han potenciado su eficiencia y viabilidad. Estas innovaciones permiten que las HTHP sustituyan a los sistemas de calefacción basados en combustibles fósiles en sectores como el procesamiento de alimentos, la fabricación de productos químicos y la producción de papel, contribuyendo así a los esfuerzos de descarbonización.

Sistemas híbridos (cogeneración + energías renovables)

Los sistemas híbridos que combinan la cogeneración con fuentes de energía renovables, como la energía solar térmica, la biomasa y la geotérmica, representan una vía prometedora para aumentar la sostenibilidad. Estos sistemas optimizan el aprovechamiento de la energía al integrar la fiabilidad de la cogeneración con la naturaleza intermitente de las energías renovables. Por ejemplo, los colectores solares térmicos pueden suministrar calor adicional durante las horas de mayor insolación, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles. Además, las unidades de cogeneración alimentadas con biomasa ofrecen una alternativa neutra en carbono a la cogeneración convencional basada en el gas. Al mejorar la flexibilidad y reducir las emisiones, los sistemas híbridos de cogeneración y energías renovables están llamando la atención por su papel en la consecución de los objetivos de la transición energética.

Líderes del sector y casos prácticos

Principales actores del mercado

Los mercados de las bombas de calor y la cogeneración están liderados por varias empresas destacadas, conocidas por su innovación y su amplia oferta de productos:

1. **General Electric (GE):** actor clave en el mercado de la cogeneración, GE ofrece tecnología avanzada y cuenta con una cuota de mercado significativa gracias a sus sistemas de cogeneración fiables y de alta eficiencia.
2. **Siemens Energy:** esta empresa alemana es un proveedor líder de soluciones de cogeneración y ofrece una gama de productos que se adaptan a diversas aplicaciones industriales.
3. **Veolia:** Con sede en Francia, Veolia es un actor clave en el mercado de la cogeneración, conocida por sus servicios y soluciones energéticas integrales.
4. **Wärtsilä:** empresa finlandesa reconocida por sus innovadores sistemas de cogeneración y con una fuerte presencia en el mercado.
5. **2G Energy:** Esta empresa alemana se especializa en la fabricación de sistemas de cogeneración y destaca por sus avances tecnológicos en este campo.

Implementaciones exitosas

Varios casos prácticos ponen de relieve la eficaz implantación de las tecnologías de bombas de calor y de cogeneración:

1. **Taber Aquafun Centre, Alberta (Canadá):** La instalación incorporó una solución de micro-cogeneración de 70 kW, cuya puesta en marcha se completó en dos semanas con una



interrupción mínima. Esta implementación ha mejorado la eficiencia energética y ha reducido los costes operativos.

2. **Proyecto Bornem – Barl’lo, Bélgica:** Este proyecto demuestra el uso de bombas de calor tanto para calefacción como para refrigeración en edificios prácticamente neutros desde el punto de vista energético, lo que pone de manifiesto el potencial de las bombas de calor en la construcción sostenible.
3. **Renovación de sesenta apartamentos, Turín, Italia:** Un proyecto de renovación combinó una bomba de calor aerotérmica con dos calderas de gas, integrando con éxito estos sistemas para minimizar el consumo energético, especialmente durante la temporada intermedia.

4.5 Instrumentos políticos y marcos normativos de la cogeneración y las bombas de calor

Instrumentos políticos: Introducción

Importancia de las políticas en la producción de calor [44]:

Los instrumentos políticos son esenciales para orientar el sector de la producción de calefacción hacia la descarbonización y la sostenibilidad. Establecen marcos e incentivos que promueven la adopción de tecnologías con bajas emisiones de carbono, mejoran la eficiencia energética y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Unas políticas eficaces pueden impulsar la innovación, reducir los costes y facilitar la transición hacia fuentes de energía más limpias. Sin un apoyo político sólido, las barreras del mercado pueden obstaculizar el despliegue de soluciones de calefacción renovables, lo que dificultaría los esfuerzos para combatir el cambio climático. En conclusión, los instrumentos políticos son esenciales para transformar el sector de la producción de calor a nivel mundial. Es fundamental adoptar enfoques adaptados que tengan en cuenta las disparidades y los retos regionales para promover de manera eficaz la adopción de soluciones de calefacción sostenibles y alcanzar los objetivos climáticos generales.

Contexto global: Las políticas tienen como objetivo limitar el calentamiento a 1,5 °C mediante la descarbonización de la producción de calor, lo que varía según la región en función de factores económicos y políticos.

Iniciativas de la UE: El Plan REPowerEU tiene como objetivo alcanzar los 20 millones de bombas de calor para 2026 y los 60 millones para 2030, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Retos del Sur Global: Los elevados costes de financiación dificultan la adopción de energías limpias; la COP29 y el G20 hacen hincapié en la financiación climática a través de impuestos sobre el carbono y canjes de deuda.

Las políticas deben adaptarse a cada región para impulsar la adopción de sistemas de calefacción sostenibles y cumplir los objetivos climáticos.

Subvenciones e incentivos en los sistemas energéticos

Subvenciones: Ayuda financiera proporcionada por gobiernos u organizaciones para apoyar el desarrollo de proyectos de energía renovable, como los sistemas eólicos, solares y geotérmicos. Estas subvenciones reducen el coste inicial de capital, lo que hace que estas tecnologías sean más accesibles.



Créditos fiscales: Reducciones fiscales a las que tienen derecho las empresas o los particulares que invierten en tecnologías de energía renovable. Entre los ejemplos se incluyen el crédito fiscal a la inversión (ITC) y el crédito fiscal a la producción (PTC), que incentivan la instalación y el funcionamiento de sistemas renovables.

Tarifas reguladas (FiT): Pagos garantizados o incentivos que se abonan a los productores de energía por suministrar electricidad a la red. Estas tarifas están diseñadas para fomentar el desarrollo de fuentes de energía renovables al garantizar unos ingresos estables a los productores.

Repercusión en la adopción de los sistemas

1. **Aumento de las tasas de adopción:** Las subvenciones y los incentivos reducen la carga financiera para los consumidores y las empresas, lo que impulsa una adopción más rápida de las tecnologías sostenibles.
2. **Expansión del mercado:** Fomentan la innovación y la competencia en el mercado de las energías renovables, lo que se traduce en menores costes y opciones más accesibles.
3. **Sostenibilidad a largo plazo:** Aunque el apoyo inicial es crucial, el objetivo es reducir la dependencia de las subvenciones con el tiempo, a medida que las tecnologías se vuelven más competitivas frente a las fuentes de energía convencionales.

Para obtener más información sobre las subvenciones e incentivos en Europa, consulte la sección «AIE (Agencia Internacional de la Energía) sobre políticas de energía renovable».

Mecanismos de fijación de precios del carbono

1. **Sistemas de comercio de derechos de emisión (ETS):** Enfoques basados en el mercado que permiten a las empresas comprar y vender derechos de emisión de carbono. Se establece un límite máximo para las emisiones totales, y las empresas deben disponer de derechos equivalentes a sus emisiones. Esto genera incentivos financieros para reducir las emisiones.

Ejemplo: El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (RCDE UE) es el mayor mercado de carbono del mundo y abarca sectores como la generación de electricidad y la industria manufacturera.

2. **Los impuestos sobre el carbono** son impuestos directos que gravan el contenido de carbono de los combustibles fósiles. El objetivo es aumentar el coste de la energía con altas emisiones de carbono, animando así a las empresas y a los consumidores a reducir su huella de carbono.

Ejemplo: Países como Suecia han aplicado elevados impuestos sobre el carbono, lo que ha contribuido a una reducción significativa de las emisiones y a una transición hacia fuentes de energía más limpias.

3. **Costes operativos:** El RCDE y los impuestos sobre el carbono influyen en los costes operativos de las empresas, especialmente en los sectores con altas emisiones. El aumento del coste de los combustibles con alto contenido de carbono puede provocar un incremento de los gastos operativos, pero también puede impulsar la innovación hacia procesos más limpios y eficientes.

Repercusión en las empresas y en las políticas

1. **Incentivos para la reducción de emisiones:** Estos mecanismos animan a las empresas a invertir en tecnologías que reduzcan las emisiones y a realizar la transición hacia fuentes de energía más ecológicas.



2. **Eficiencia del mercado:** La fijación de precios del carbono crea un enfoque impulsado por el mercado para reducir las emisiones, lo que permite flexibilidad en la forma en que las empresas logran dichas reducciones.
3. **Generación de ingresos:** Los gobiernos suelen utilizar los fondos generados a través de la tarificación del carbono para reinvertirlos en proyectos de energías renovables, adaptación al cambio climático u otras iniciativas medioambientales.

Marcos normativos en materia de eficiencia energética [45]

Directivas de la UE:

RED II (Directiva sobre energías renovables II): tiene como objetivo aumentar la cuota de las energías renovables en la combinación energética global de la Unión Europea. Establece objetivos vinculantes para el uso de energías renovables, incluso en el transporte y la calefacción, y fomenta el uso de biocombustibles, energía eólica, solar y otras fuentes renovables.

Objetivo: Alcanzar al menos un 32 % de energía renovable en la UE para 2030.

EED (Directiva sobre eficiencia energética): Establece normas para ayudar a la UE a alcanzar sus objetivos de eficiencia energética. Incluye medidas para mejorar el uso de la energía en edificios, transporte e industrias.

Objetivo: Lograr una mejora del 32,5 % en la eficiencia energética para 2030.

Normas nacionales de eficiencia energética: Cada Estado miembro de la UE aplica su propia normativa, basada en las directivas de la UE, para mejorar la eficiencia energética en diversos sectores, como los edificios, el transporte y la industria. Estas normas garantizan que los objetivos nacionales se ajusten a los objetivos más amplios de la UE en materia de clima y energía.

Ejemplo: En Alemania, el Reglamento de Ahorro Energético (EnEV) establece normas sobre el rendimiento energético de los edificios.

Comparativas de políticas internacionales en sistemas energéticos [46]

Estudios de caso de diferentes países:

Alemania: Líder en políticas de energías renovables, la Energiewende (transición energética) alemana hace hincapié en la transición de los combustibles fósiles a las fuentes de energía renovables. Políticas como las tarifas reguladas, las subastas de energía renovable y los ambiciosos objetivos climáticos han convertido a Alemania en uno de los países líderes a nivel mundial en la adopción de energías renovables.

Ejemplo: La Ley de Energías Renovables (EEG) de Alemania, introducida en 2000, allanó el camino para un crecimiento masivo de la energía solar y eólica.

China: Como mayor emisor mundial de CO_2 , China se ha centrado en la expansión de las energías renovables para reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire. El país es líder en capacidad de energía solar y eólica, con un importante apoyo gubernamental e incentivos para el crecimiento de estos sectores.

Ejemplo: El XII Plan Quinquenal para la Civilización Ecológica preveía inversiones sustanciales en energía limpia.



Estados Unidos: Estados Unidos cuenta con diversas políticas estatales y federales, entre las que se incluyen desgravaciones fiscales, normas de energía limpia e incentivos a las energías renovables, como el crédito fiscal a la inversión (ITC) y el crédito fiscal a la producción (PTC).

Ejemplo: El Plan de Energía Limpia (CPP), aunque actualmente se encuentra en proceso de revisión, tenía como objetivo reducir las emisiones de las centrales eléctricas.

Comparativas de políticas internacionales en materia de sistemas energéticos

Lecciones aprendidas de las comparaciones internacionales

1. **Coherencia de las políticas y compromiso a largo plazo:** Las transiciones exitosas requieren políticas estables y a largo plazo que proporcionen confianza a los inversores y a los actores del sector.
2. **Flexibilidad y adaptabilidad:** Los países necesitan políticas adaptadas a su combinación energética específica, a sus recursos y a sus condiciones económicas.
3. **Alianzas público-privadas:** La colaboración entre los gobiernos, el sector privado y los consumidores ha sido clave para acelerar la adopción de las energías renovables.
4. **Apoyo público y sensibilización:** Involucrar a los ciudadanos y garantizar un amplio apoyo público son esenciales para el éxito de las políticas energéticas.

4.6 Consideraciones de futuro

Consideraciones futuras – Introducción

1. **Descarbonización:** La transición hacia las energías renovables (solar, geotérmica, calor residual) plantea retos en materia de infraestructuras, inversión y almacenamiento. Por ejemplo, la integración de la energía geotérmica requiere un control avanzado de la temperatura.
2. **Digitalización:** La inteligencia artificial, los sensores y las redes inteligentes optimizan la distribución de calor, pero plantean preocupaciones en materia de ciberseguridad y privacidad de los datos.
3. **Eficiencia energética:** La creciente demanda requiere nuevas tecnologías para que la calefacción urbana siga siendo rentable y sostenible.

El papel de la innovación:

Avances tecnológicos: La innovación en bombas de calor, almacenamiento térmico y tecnologías con bajas emisiones de carbono es fundamental para satisfacer la demanda energética futura y, al mismo tiempo, reducir el impacto medioambiental.

Ejemplo: Los nuevos avances en las tecnologías de bombas de calor permiten una mejor integración de las fuentes de calor renovables, lo que hace que los sistemas de calefacción urbana sean más flexibles y sostenibles.



Modelos de negocio y financiación: Se están explorando nuevos mecanismos de financiación, como las asociaciones público-privadas (APP) y los bonos verdes, para financiar la transición de las redes de calefacción urbana. Estos modelos tienen como objetivo reducir el riesgo financiero y, al mismo tiempo, promover inversiones sostenibles en fuentes de calor renovables.

Objetivos de descarbonización

Objetivos de cero emisiones netas para 2050:

Muchos países y regiones, entre ellos la Unión Europea y Estados Unidos, se han comprometido a alcanzar emisiones netas cero para 2050. En el caso de los sistemas de calefacción urbana, esto supone reducir significativamente la dependencia de los combustibles fósiles e integrar fuentes de calor renovables y con bajas emisiones de carbono. Ejemplo: El Pacto Verde de la UE traza una hoja de ruta para reducir las emisiones en al menos un 55 % para 2030 y alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para 2050. Retos y oportunidades: Alcanzar estos objetivos requiere inversiones a gran escala en tecnologías renovables, la modernización de las infraestructuras existentes y la adopción de soluciones innovadoras como el almacenamiento de energía y las redes inteligentes [47].

Transición desde la cogeneración basada en combustibles fósiles:

Situación actual: Muchas redes de calefacción urbana dependen de centrales de cogeneración basadas en combustibles fósiles, que utilizan gas natural, carbón o petróleo para generar electricidad y calor. Estos sistemas son uno de los principales responsables de las emisiones de carbono.

Plan de transición: Una parte crucial de la transición es el cambio hacia fuentes de energía renovables, como la biomasa, la energía geotérmica y la energía solar térmica. Además, el hidrógeno verde está ganando protagonismo como posible combustible para las centrales de cogeneración.

Ejemplo: El sistema danés de calefacción urbana está llevando a cabo una transición activa de los combustibles fósiles a la biomasa y la recuperación de calor residual, con el objetivo de alcanzar la neutralidad en carbono para 2030. Retos tecnológicos: La modernización de las plantas de cogeneración basadas en combustibles fósiles para que utilicen fuentes de energía renovables implica una inversión significativa y conocimientos técnicos especializados en nuevas tecnologías, como las bombas de calor a gran escala y los sistemas de almacenamiento.

Integración en la red y flexibilidad

Integración en la red y flexibilidad en las redes de calefacción urbana

Gestión de la demanda:

- a. Definición: La gestión de la demanda (DSM) se refiere a las estrategias que animan a los consumidores a ajustar sus patrones de consumo energético en respuesta a las condiciones de suministro o a las señales de precios. Esto es crucial para optimizar la integración de las energías renovables en los sistemas de calefacción urbana.

- b. Técnicas:

Tarifas por franja horaria: animar a los consumidores a utilizar la calefacción fuera de las horas punta para equilibrar la oferta y la demanda.

Almacenamiento térmico: Almacenar el exceso de calor durante los periodos de baja demanda y liberarlo en las horas de máxima demanda, lo que ayuda a estabilizar las fluctuaciones de la red.



- c. Ventajas: La DSM ayuda a evitar la congestión de la red, reduce los costes y mejora la eficiencia de la producción y distribución de calor. También puede reducir la necesidad de recurrir a la generación de reserva basada en combustibles fósiles.

Avances tecnológicos

Bombas de calor de temperatura ultraalta:

Definición: Las bombas de calor de temperatura ultraalta (UHTHP) están diseñadas para proporcionar calefacción a temperaturas significativamente más altas (por encima de los 100 °C), lo que las hace adecuadas para sistemas de calefacción urbana. Son fundamentales para integrar fuentes de calor renovables en aplicaciones de alta temperatura, que tradicionalmente dependen de los combustibles fósiles.

Aplicaciones: Las UHTHP recuperan el calor residual de los procesos industriales, la energía geotérmica o incluso el aire ambiente, y calientan edificios residenciales y comerciales.

Ventajas:

1. Reducen la dependencia de los combustibles fósiles, lo que disminuye las emisiones de carbono.
2. Permiten la integración de fuentes de calor renovables y de calor residual en la red a temperaturas más elevadas.

Ejemplo: El Energiepark Mainz, en Alemania, utiliza bombas de calor de temperatura ultraalta para la calefacción urbana, alcanzando eficiencias superiores al 100 %.

Cogeneración avanzada con biocombustibles e hidrógeno:

Los sistemas de cogeneración generan tanto calor como electricidad a partir de una única fuente de energía. Para cumplir los objetivos de descarbonización, los sistemas avanzados de cogeneración se están integrando cada vez más con biocombustibles e hidrógeno.

Biocombustibles: La biomasa y la bioenergía son alternativas renovables a los combustibles fósiles y, cuando se utilizan en sistemas de cogeneración, proporcionan calor y electricidad con bajas emisiones de carbono.

Hidrógeno: El hidrógeno verde, producido a partir de electricidad renovable, puede utilizarse en plantas de cogeneración para generar calor y electricidad sin emitir CO₂, lo que lo convierte en un elemento clave en la transición hacia sistemas de calefacción urbana neutros en carbono.

Ventajas:

1. Los biocombustibles reducen la dependencia de los combustibles fósiles y apoyan las economías agrícolas locales.
2. El hidrógeno abre el camino hacia sistemas de calefacción urbana con cero emisiones.

Ejemplo: La central de cogeneración de Hannover, en Alemania, está estudiando el uso del hidrógeno como fuente de combustible para sus unidades de cogeneración, lo que contribuye a los esfuerzos de descarbonización del país.

Resiliencia climática

Impacto del cambio climático: Los patrones meteorológicos cambiantes provocan fluctuaciones en la demanda de calefacción. Los inviernos más suaves reducen la demanda, mientras que el frío extremo la aumenta.



Variaciones regionales: El norte de Europa podría experimentar una reducción de las necesidades de calefacción, mientras que otras regiones se enfrentan a picos inesperados debido a temperaturas extremas.

Tendencias a largo plazo: Los sistemas deben adaptarse para hacer frente a condiciones más suaves y extremas, lo que requiere soluciones energéticas flexibles y con capacidad de respuesta.

Flexibilidad y fiabilidad del sistema:

Operaciones flexibles: integrar energías renovables, utilizar almacenamiento térmico y ajustar el suministro de forma dinámica.

Resiliencia de la red: garantizar una capacidad de reserva fiable (por ejemplo, biocombustibles o hidrógeno para las plantas de cogeneración) para hacer frente a los picos de demanda.

Resiliencia económica

Adaptación a las fluctuaciones del mercado:

1. Diversificar las fuentes de energía para reducir los riesgos de dependencia.
2. Implementar modelos de tarificación flexibles para responder a la volatilidad del mercado energético.
3. Utilizar tecnologías de almacenamiento de energía y de redes inteligentes para garantizar la estabilidad operativa.

Estrategias de inversión a largo plazo:

1. Dar prioridad a las tecnologías con capacidades escalables y preparadas para el futuro.
2. Centrarse en el análisis del coste del ciclo de vida en lugar de en los costes iniciales.
3. Invertir en infraestructuras que se ajusten a los objetivos de descarbonización y a los incentivos políticos.

Redes de calefacción preparadas para el futuro

Proyectos innovadores en desarrollo:

Calefacción urbana con cero emisiones de carbono en el Reino Unido:

Con el objetivo de alcanzar un futuro con cero emisiones netas de carbono, el Reino Unido está desarrollando redes de calefacción urbana que combinan la recuperación de calor residual, las energías renovables y las tecnologías de redes inteligentes. Uno de estos proyectos es el «Green Gas for London» de Londres, que utiliza biogás y calor residual para los sistemas de calefacción urbana con el fin de reducir las emisiones de carbono y aumentar la eficiencia [\[48\]](#).

Características clave: uso de bombas de calor avanzadas, integración de energías renovables y sistemas de control flexibles.

El proyecto Copenhill en Copenhague:

Copenhague aspira a convertirse en la primera capital del mundo neutra en carbono para 2025. El proyecto Copenhill es una planta de valorización energética de residuos que combina la calefacción urbana con la incineración de residuos. Genera electricidad, vapor y calor a partir de residuos no reciclables, proporcionando calefacción a más de 150 000 hogares [\[49\]](#).



La red de calefacción inteligente de Ámsterdam:

Ámsterdam está desarrollando una red de calefacción urbana inteligente que utiliza almacenamiento térmico, energía solar térmica y energía geotérmica. El sistema integra tecnologías digitales para optimizar la distribución de calor, garantizando la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de carbono.

Repercusión en el futuro de las redes de calefacción

1. **Descarbonización:** Estos proyectos ponen de manifiesto el potencial de combinar fuentes de energía renovables y tecnologías innovadoras para ofrecer soluciones de calefacción sostenibles y con bajas emisiones de carbono.
2. **Resiliencia y flexibilidad:** Estas redes están diseñadas para hacer frente a los futuros retos climáticos, garantizando un suministro de calefacción estable y flexible incluso ante patrones meteorológicos impredecibles o fluctuaciones en la demanda.
3. **Escalabilidad:** Muchos de estos proyectos son escalables, lo que permite su futura ampliación y adaptación a las tecnologías emergentes.



5. Conclusiones

Aspectos económicos y medioambientales:

1. Económicos: Los sistemas de calefacción urbana reducen la dependencia de los combustibles fósiles, disminuyen los costes operativos y generan ingresos a través de incentivos y créditos de carbono.
2. Medioambientales: La adopción de tecnologías renovables y la recuperación del calor residual contribuyen a descarbonizar la calefacción y a reducir la huella de carbono.
3. Eficiencia: Las redes inteligentes y las tecnologías avanzadas mejoran la adaptabilidad del sistema y la eficiencia energética.

Importancia de las políticas y tendencias futuras:

1. Políticas: Las políticas de apoyo, como las subvenciones, la tarificación del carbono y las normas energéticas, son esenciales para acelerar la adopción.
2. Tendencias futuras: Las bombas de calor de temperatura ultraalta, la cogeneración con biocombustibles e hidrógeno y las redes inteligentes marcarán el futuro de la calefacción urbana.
3. Resiliencia climática: La flexibilidad en el diseño del sistema garantiza la fiabilidad en condiciones climáticas cambiantes.



6. Referencias

- [1] Brückner, M., Giljum, S., Lutz, C. y Wiebe, K. S. (2015). Materiales incorporados en el comercio internacional: análisis del volumen y la composición de la huella material de las exportaciones e importaciones. *Environmental Science & Policy*, 55, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- [2] Miró, J. J., Estrela, M. J., Caselles, V. y Olcina, J. (2015). Proyección futura de episodios de sequía en la zona mediterránea (España) utilizando el índice SPI. *Theoretical and Applied Climatology*, 120(1-2), 141-160. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1160-5>
- [3] Departamento de Energía de EE. UU. (2008). Un 20 % de energía eólica para 2030: aumentar la contribución de la energía eólica al suministro eléctrico de EE. UU. <https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/20-wind-energy-2030-increasing-wind-energys-contribution-us-electricity-supply>
- [4] Enova SF. (2009). Recuperación de energía en la industria de procesos: potencial y tecnología. <https://www.enova.no/>
- [5] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R. y Meyer, B. (2016). Estimación del potencial mundial de calor residual. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568-1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- [6] Gobierno de Escocia. (2024). Estrategia energética y Plan de Transición Justa. <https://www.gov.scot/publications/draft-energy-strategy-transition-plan/>
- [7] Alfa Laval. (2018). Intercambiadores de calor de placas y marcos con juntas: la teoría de la transferencia de calor. <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/>
- [8] Thermopedia. (2011). Intercambiadores de calor de carcasa y tubos. Begell House Inc. <http://www.thermopedia.com/content/1121/>
- [9] Meshram, P., Pandey, B. D. y Mankhand, T. R. (2016). Tratamiento hidrometalúrgico de baterías secundarias usadas: una revisión. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 118-138. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.013>
- [10] Kanaś, K., Sztékler, K., Nowak, W. y Siwekowski, P. (2019). Análisis del funcionamiento de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. *E3S Web of Conferences*, 108, 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910801011>
- [11] Departamento de Energía de EE. UU. (2013). Dispositivos comerciales de recuperación de calor residual. Programa Federal de Gestión Energética. <https://www.energy.gov/femp/articles/commercial-waste-heat-recovery-devices>
- [12] Kilkovský, B. (2020). Revisión del diseño y la modelización de los intercambiadores de calor regenerativos. *Energies*, 13(3), 759. <https://doi.org/10.3390/en13030759>
- [13] Connor, N. (25 de mayo de 2024). Intercambiador de calor de contacto directo: tipos y uso en la industria de procesos. *Thermal-Engineering.org*. <https://www.thermal-engineering.org/direct-contact-heat-exchanger-types-process-industry-use/>
- [14] Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., Lipinski, T., Lester, S. P., ... y Hussam, B. (2021). Generadores termoeléctricos: una revisión de las aplicaciones en la recuperación de calor. *Energy*, 228, 120513. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120513>
- [15] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & 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>
- [16] El Haj Assad, M., Rosen, M. A., Bani-Hani, E. y Al-Shabi, M. (2021). Diseño y rendimiento de los sistemas de energía térmica. Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/design-and-performance-of-thermal-energy-systems/el-haj-assad/978-0-12-821664-4>



- [17] El Haj Assad, M., y Rosen, M. A. (2018). Almacenamiento de energía térmica: diseño y análisis con TRNSYS. Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/thermal-energy-storage/el-haj-assad/978-0-12-811419-3>
- [18] Tecnologías de bombas de calor de la AIE. (2025). Informe anual 2024: Programa de Colaboración Tecnológica sobre Tecnologías de Bombas de Calor (HPT). <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/>
- [19] 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>
- [20] Departamento de Energía de EE. UU. (2015). Guía de recursos sobre cogeneración: Introducción a la cogeneración (CHP). Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/01/f58/CHPGuide2015.pdf>
- [21] Agencia Internacional de la Energía. (2020). Cogeneración: Evaluación de los beneficios de la cogeneración para los sistemas energéticos industriales y de redes de calor. AIE. <https://www.iea.org/reports/combined-heat-and-power>
- [22] Departamento de Energía de EE. UU. (2017). Fichas informativas sobre la tecnología de cogeneración (CHP). Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables. <https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-chp-technology-fact-sheets>
- [23] Comisión Europea. (2017). Buenas prácticas en eficiencia energética: Por una Europa sostenible, más segura y más competitiva. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/723141>
- [24] Dincer, I., y Rosen, M. A. (2013). Sistemas y procesos de energía térmica (2.ª ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398374-8.00001-2>
- [25] Barco-Burgos, J., Bruno, J. C., Eicker, U., Saldaña-Robles, A. L., y Alcántar-Camarena, V. (2022). Revisión sobre la integración de bombas de calor de alta temperatura en redes de calefacción y refrigeración urbanas. Energy, 239, 122378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122378>
- [26] Agencia Internacional de la Energía. (2024). Calefacción urbana (Seguimiento del progreso de la energía limpia 2023). AIE. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating>
- [27] Euroheat & Power. (2023). Calefacción y refrigeración urbanizadas: una clave para la transición energética. <https://www.euroheat.org/knowledge-hub.html>
- [28] Bazilian, M., et al. (2013). Replanteamiento de las estructuras de costes del sector energético: el papel de los costes de capital, de explotación y de mantenimiento, y los indicadores de coste nivelado. Energy Policy, 52, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.023>
- [29] Park, S.-Y., Lee, K.-S. y Yoo, S.-H. (2016). Economías de escala en el sistema de calefacción urbana de Corea: un enfoque basado en la función de costes variables. Energy Policy, 88, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.026>
- [30] Hanna, K. y Arnold, L. (2022). Introducción a la evaluación de impacto ambiental. En Routledge Handbook of Environmental Impact Assessment (pp. 1–20). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429282492-2>
- [31] Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (2025). El papel de la cogeneración en la descarbonización. <https://www.epa.gov/chp/chps-role-decarbonization>
- [32] Agencia Internacional de la Energía. (2024). El futuro de las bombas de calor — Resumen ejecutivo. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary>
- [33] Agencia Internacional de la Energía. (2024). Perspectivas energéticas mundiales 2024. AIE. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- [34] Comisión Europea. (2017). Buenas prácticas en eficiencia energética: Por una Europa sostenible, más segura y más competitiva. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/723141>
- [35] Ávalos-Islas, M. C., Martínez-Delgadillo, S. A., Morales-Mora, M. A. y Pretelín-Vergara, C. (2015). Emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de la electricidad generada en un proyecto de



- cogeneración en el Complejo Petroquímico de Morelos y opciones de captura de CO₂. Actas de la CIE 2015. <http://www.amexen.org/iec/2015/documentos/LIBRO%20DE%20RESUMENES-ABSTRACTS%20IEC2015.pdf>
- [36] Hanna, K., y el equipo de Healthy Buildings. (12 de junio de 2024). Estudio de caso del CoBE: Modernización de la calefacción escolar con una bomba de calor geotérmica — Hopkins Academy, Hadley, MA. HealthyBuildings.Harvard.edu. <https://healthybuildings.hsph.harvard.edu/cobe-case-study-modernizing-school-heating-with-ground-source-heat-pump/>
- [37] Agencia Internacional de la Energía. (2025). El futuro de las bombas de calor: resumen ejecutivo. Agencia Internacional de la Energía. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary>
- [38] Agencia Internacional de la Energía. (2022). Bombas de calor — Sistema energético: Edificios. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps>
- [39] Precedence Research. (2024). Mercado de los sistemas de recuperación de calor residual: análisis global del sector, tamaño, cuota de mercado, crecimiento, tendencias, perspectivas regionales y previsiones para 2024-2034. <https://www.precedenceresearch.com/waste-heat-recovery-system-market>
- [40] DataHorizon Research. (2025). Mercado de instalaciones de cogeneración (CHP): previsiones globales 2025-2033. <https://datahorizonresearch.com/combined-heat-and-power-chp-installation-market-57570>
- [41] Agencia Internacional de la Energía. (2023). Precios de la energía 2023: Documentación de la base de datos de precios de la energía de la AIE. Agencia Internacional de la Energía. https://iea.blob.core.windows.net/assets/e211c759-a7a4-41f3-a7a0-7a2e90e928d8/EnergyPrices_Documentation.pdf
- [42] Marzband, M., Sumper, A. y Domínguez-García, J. L. (2023). Análisis tecnoeconómico de un sistema combinado de generación de calor y electricidad que integra colectores híbridos fotovoltaicos-térmicos, un motor Stirling y almacenamiento de energía. *Energy Conversion and Management*, 284, 116968. <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/61769/1/1-s2.0-S019689042300314X-main.pdf>
- [43] Datas, A., Ramos, A. y del Cañizo, C. (2019). Análisis técnico-económico del almacenamiento solar fotovoltaico «electricidad-calor-electricidad» y la trigeneración en el sector residencial. *Applied Energy*, 256, 113935. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113935>
- [44] Regulatory Assistance Project. (2025). Clean Heat Policy Tracker 2025: Una visión general mundial de los instrumentos de política de calefacción limpia. <https://www.raponline.org/toolkit/clean-heat-policy-tracker/>
- [45] Comisión Europea. (2018). Directiva sobre energías renovables (UE) 2018/2001 — Energía procedente de fuentes renovables. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
- [46] Agencia Internacional de la Energía. (2021). El duodécimo plan quinquenal para las energías renovables. <https://www.iea.org/policies/5293-the-twelfth-five-year-plan-for-renewable-energy>
- [47] Comisión Europea. (2019). Pacto Verde Europeo. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [48] Skidmore, Z. (1 de abril de 2025). Hemiko desarrollará la primera red de aprovechamiento del calor residual de centros de datos del Reino Unido. Data Centre Dynamics. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/hemiko-selected-as-project-developer-on-uks-first-data-center-waste-heat-network/>
- [49] ArchDaily. (2019). CopenHill: La historia de la emblemática planta de valorización energética de residuos de BIG. <https://www.archdaily.com/925966/copenhill-the-story-of-bigs-iconic-waste-to-energy-plant>