

DICIEMBRE
2024



Plataforma
tecnológica española de
eficiencia energética

INICIATIVA TECNOLÓGICA PRIORITARIA 01-2024

BOMBAS DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA

- **Irene Lázaro Alcaraz** - Autora
| Universidad Politécnica de Madrid
- **Susana Sánchez Orgaz** - Tutora académica
| Universidad Politécnica de Madrid
- **Guillermo José Escobar López** - Tutor de empresa y coautor
| Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética

CON EL APOYO DE



Este documento se ha desarrollado en el marco de las ayudas a la convocatoria correspondiente al año 2022 de Plataformas Tecnológicas y de Innovación del Programa Estatal para impulsar la investigación científico-técnica y su transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023).

Entidad solicitante: Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética.

Referencia proyecto: ptr2020-001270



CON EL APOYO DE



Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	6
-------------------	---

1 INTRODUCCIÓN	
1.1. Objetivos	7
1.2. Actualidad y relevancia de las BCAT	7
1.3. Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible	8
1.3.1. ODS 7: Energía sostenible y no contaminante	
1.3.2. ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	
1.3.3. ODS 9: Industria innovación e infraestructura	
1.3.4. ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	
1.3.5. ODS 11: Acción por el clima	
1.4. Objetivos de la publicación	10
1.5. Metodología	11

2 MARCO LEGAL	
2.1. Marco legal y normativas a nivel europeo	13
2.2. Marco legal y Normativas a nivel nacional	14

3 ESTADO DEL ARTE	
3.1. Clasificación de las BCAT	16
3.1.1. Clasificación BCAT según su tecnología	
3.1.1.1. BCAT de ciclo abierto	
3.1.1.1.1. BCAT con recompresión térmica del vapor (TVR)	
3.1.1.1.2. BCAT con recompresión mecánica del vapor (MVR)	
3.1.1.2. BCAT de ciclo cerrado	
3.1.1.2.1. BCAT de sorción	
Bombas de calor de absorción	
Bombas de calor de adsorción	
Materiales adsorbentes	
3.1.1.2.2. BCAT de compresión mecánica	
BCAT de compresión de vapor	
Sistema híbrido absorción/compresión	
Ciclo Stirling inverso	
3.1.2. Según la fuente de energía	
3.2. Bombas de calor de generación de vapor (BCGV)	27
3.3. Componentes	29
3.3.1. Elementos de compresión	
3.3.2. Evaporador	
3.3.3. Condensador	
3.3.4. Elementos de expansión	
3.3.5. Absorbedor	
3.3.6. Adsorbedor	

4	FABRICANTES	37
	4.1. BCAT MVR	39
	4.2. BCAT TVR	39
	4.3. BCAT sorción	40
	4.4. Bomba de calor de compresión mecánica	40
5	REFRIGERANTES	50
	5.1. Criterios de selección	50
	5.2. Clasificación de sus refrigerantes según su composición	53
	5.2.1. Hidrofluorocarbonos (HFCs)	
	5.2.2. Hidrofluoroolefinas (HFOs)	
	5.2.3. Hidroclorofluorofluoroolefinas (HCFOs)	
	5.2.4. Refrigerantes naturales e hidrocarburos	
	5.3. Propiedades termodinámicas	55
	5.4. Análisis de temperaturas de sumidero, potencia térmica y COP en función del refrigerante empleado	55
6	EFICIENCIA	58
	6.1. Ciclos teóricos de Lorenz y de Carnot	58
	6.2. Configuraciones de ciclos y su influencia en el COP	61
	6.2.1. Eyectores	
	6.2.2. Subenfriadores externos	
	6.2.3. Intercambiador de calor intermedio	
	6.2.4. Economizador interno, compresión paralela y compresión múltiple	
	6.2.5. Ciclo en cascada	
	6.2.6. Ciclo multitemperatura	
7	RETOS DE DESARROLLO TECNOLÓGICO	68
	7.1. Barreras no tecnológicas	68
	7.2. Retos de desarrollo tecnológico	69
8	ÁREAS DE INTERÉS Y PLANTAS INDUSTRIALES QUE OPERAN CON BCAT	70
9	ANÁLISIS ECONÓMICO	77
	9.1. Inversión	77
	9.2. Análisis Rentabilidad Operacional	83
	9.3. Periodo de recuperación de la inversión	90
10	EVALUACIÓN DE IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES Y SOCIALES	97

11	CONCLUSIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA	105
	ANEXO I. PROYECTOS DE I+D	111
	ANEXO II RESULTADOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO	123
	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	124
	ÍNDICE DE TABLAS	127
	LISTA DE ACRÓNIMOS	127

Resumen ejecutivo

El extracto de esta ITP se puede resumir en los siguientes puntos:

- Existencia de un marco legal favorable para el despliegue masivo de las BCAT.
- Las temperaturas de entrega de calor son suficientemente elevadas para satisfacer una parte muy importante de la demanda de calor en la industria:
 - Los sistemas de ciclo abierto pueden generar entre 80 y 350 °C.
 - Los sistemas de ciclo cerrado pueden alcanzar los 200°C (compresión mecánica) y hasta 250°C (sorción).
 - Los sistemas híbridos (integran sorción y compresión mecánica) pueden alcanzar hasta 150°C.
- En el mercado se pueden encontrar BCAT de muy alta potencia (hasta 70 MW térmicos) y presión de generación de vapor (40 bar), dependiendo de la tecnología y foco de calor.
- Los nuevos refrigerantes empleados combinan bajos ODP y GWP, y se alcanzan unos COP de 3 a 13 dependiendo de la tecnología de la BCAT y la aplicación concreta.
- Sectores como papel, textil y alimentación podrían cubrir toda su demanda de calor con BCAT. El sector químico lo podría hacer en un 25% y el de los metales, entre un 10 y un 20%.
- Si bien las inversiones son elevadas (en el entorno de 1.200 €/kW térmico), el ahorro en costes operativos respecto al uso de gas natural puede ser de entre el 54% (BCAT de compresión mecánica) y el 74% (BCAT de sorción). Ello arroja unos periodos de retorno simple de entre 2 y 10 años, dependiendo del grado de utilización.
- La reducción de emisiones equivalentes de CO₂ por el uso de BCAT respecto al uso de combustibles fósiles es casi total, sobre todo en países como España, donde el mix eléctrico es muy renovable.
- El empleo de las BCAT permite reducir las emisiones de la combustión, mejorando la calidad del aire y disminuyendo las enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

1. Introducción

1.1. Objetivos

El proyecto tiene tres objetivos principales:

El primero consiste en transmitir a las administraciones la necesidad de apoyar proyectos de desarrollo de las tecnologías de bomba de calor para la generación de energía térmica, basándose en los beneficios científicos, ambientales y socioeconómicos que resultan de tener una tecnología e industria nacional propia.

El segundo objetivo es ayudar a los asociados de la PTE-ee desarrolladores de tecnología a establecer sus agendas estratégicas.

El tercer objetivo es dar a conocer a los asociados de la PTE-ee usuarios de tecnologías térmicas a conocer los límites de la tecnología comercial, y las expectativas a corto y medio plazo.

Para ello, se presentan las distintas tecnologías existentes, los retos actuales y proyectos de I+D en desarrollo, además de realizar un estudio económico de las BCAT para facilitar el análisis de las posibles integraciones en procesos existentes y en el desarrollo de nuevos procesos de generación de calor desfosilizados.

1.2. Actualidad y relevancia de las BCAT

En la actualidad cada vez es más relevante el uso de tecnologías sostenibles para la calefacción de viviendas y generación de calor en procesos industriales con el fin de conseguir la descarbonización. Según la Agencia Internacional de la Energía, se define como bombas de calor de alta temperatura (BCAT) a las máquinas térmicas que aprovechan la energía del espacio y permiten obtener temperaturas operativas superiores a 80 °C. Algunos autores distinguen entre bombas de calor de alta

temperatura, las cuales operan hasta temperaturas de 100 °C, y bombas de calor de muy alta temperatura, con temperaturas de trabajo superiores a 100 °C. En este trabajo no se va a discernir entre ambas y se aplicará el término de bomba de calor de alta temperatura para ambas.

En la industria es común emplear para la generación de calor combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y gas natural. Si bien es cierto que la combustión de combustibles fósiles es un proceso relativamente eficiente, posee un gran impacto medioambiental y no debe olvidarse su carácter de fuente de energía no renovable. Además, aun usando biocombustibles, la combustión es un proceso el cual genera gases de efecto invernadero y emisiones perjudiciales para la salud pública. Por otro lado, el precio del gas natural y el petróleo se ha incrementado considerablemente con respecto al 2022. Esto se debe en gran medida a conflictos bélicos como los de Ucrania, Argelia e Israel-Palestina, a la recuperación económica del COVID-2019 que conllevó a un aumento del consumo energético y, por último, debido a las políticas climáticas con impuestos al carbono.

Las BCAT permiten alcanzar altas temperaturas, de hasta 250 °C, para sistemas de lazo cerrado e incluso 350 °C para sistemas abiertos por lo que pueden ser empleadas en distintos ámbitos industriales. Pueden aprovechar la energía del calor contenido en el aire, del suelo o de las aguas superficiales, así como emplear energía eléctrica de manera eficiente. Además, se consideran una fuente de energía renovable las bombas de calor eléctricas, cuando su COP sea superior a 2,5 o se usen fuentes de energía primaria renovables. Las BCAT permiten la revalorización de las corrientes de calor residual de los procesos industriales. De esta manera, se logra incrementar notablemente la eficiencia energética en comparación con las calderas, descarbonizar los procesos industriales, y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

El alcance de este estudio abarca el análisis normativo, tecnológico, económico, social y medioambiental de las BCAT en la actualidad.

1.3. Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Las BCAT juegan un papel crucial en el avance hacia un futuro más sostenible. En este apartado, se explorará e ilustrará cómo la implementación de esta tecnología se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, garantizando un equilibrio entre la productividad industrial y el respeto por el medio ambiente. En particular, se destacará su contribución a la mejora de la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de prácticas industriales sostenibles. Además, se analizará cómo estas bombas de calor fomentan la adopción de fuentes de energía renovable, impulsan la innovación en infraestructuras y aportan al crecimiento económico mientras minimizan el impacto ambiental.

Este proyecto contribuye, fundamentalmente, con los siguientes ODS: energía asequible y no contaminante, trabajo decente y crecimiento económico, industria

innovación e infraestructura, ciudades y comunidades sostenibles, así como con la acción por el clima.

1.3.1 ODS 7: Energía sostenible y no contaminante

Las BCAT representan una innovación significativa en el campo de la eficiencia energética y la sostenibilidad, alineándose estrechamente con el ODS 7 de la ONU, que busca garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Esto es debido a tres aspectos clave:

- Reducción de costes operativos: Las BCAT destacan por su capacidad de aprovechar eficientemente el calor ambiental para generar energía térmica. Este proceso, comparado con los sistemas tradicionales de calefacción basados en combustibles fósiles, es significativamente más eficiente y económico. Ello es debido, al utilizar una menor cantidad de energía primaria para producir la misma cantidad de calor. Estas bombas de calor permiten a las industrias y a los hogares reducir sus costes operativos. Su eficiencia no solo se traduce en ahorros económicos direc-



Figura 1: ODS [107].

tos, sino que también facilita un acceso más asequible a la energía, lo que es fundamental para el cumplimiento del ODS 7.

- Reducción de la dependencia de combustibles fósiles: La transición hacia las bombas de calor de alta temperatura reduce la necesidad de utilizar combustibles fósiles, que son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, además de estar sujetas a fluctuaciones de precio y disponibilidad en el mercado global. Al depender menos de estos combustibles, las bombas de calor contribuyen a una mayor estabilidad e independencia energética. En el contexto de España, donde el mix energético incluye una alta participación de energías renovables, la adopción de bombas de calor de alta temperatura potencia aún más el uso de estas fuentes limpias, reforzando la resiliencia del sistema energético y mejorando su seguridad.

- Disminución de la producción de CO₂: Uno de los beneficios más significativos de las bombas de calor de alta temperatura es su capacidad para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), como afirma la Agencia Medioambiental de la Energía [108]. Al operar de manera más eficiente y poder utilizar fuentes de energía renovables, o ser considerada fuente de energía renovable en función del COP, estas bombas contribuyen a una considerable disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. La reducción de CO₂ no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también mejora la calidad del aire, beneficiando así a la salud pública.

1.3.2 ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico

Puesto que las BCAT pueden reducir los costes operativos de los procesos industriales, así como limitar la dependencia del consumo de combustibles fósiles contribuyen al crecimiento económico del país, en especial en aquellos países con un bajo ratio: coste electricidad/combustible fósil. Además, la instalación, mantenimiento y fabricación de BCAT crean una cadena de valor que genera empleos de calidad. Esto es particularmente relevante en regiones que buscan una transición hacia energías limpias.

Por otro lado, las BCAT pueden abrir puertas a nuevos mercados y oportunidades de exportación, generando un efecto positivo en el crecimiento económico, ya que ayudan a las empresas a cumplir con normativas medioambientales.

1.3.3 ODS 9: Industria innovación e infraestructura

Las BCAT son de gran relevancia para el desarrollo del ODS 9, que se centra en promover la industria, la innovación y la infraestructura. A continuación, se detallan algunas de las formas en que contribuyen a este objetivo:

- Las BCAT ofrecen soluciones más eficientes y sostenibles para la generación de energía térmica en industrias que requieren altas temperaturas. Su adopción impulsa la inversión en investigación y desarrollo, estimulando la innovación tecnológica y la mejora continua de los procesos industriales.

- El uso de BCAT en sustitución de tecnologías convencionales de calefacción contribuye a la modernización de los procesos industriales, permitiendo operaciones más limpias, eficientes y económicamente viables. Esto mejora la competitividad global de las empresas al reducir costes operativos y facilitar el cumplimiento de normativas ambientales cada vez más estrictas.

- Las BCAT están estrechamente vinculadas al uso de electricidad, particularmente la generada a partir de fuentes renovables. Su aplicación fomenta el desarrollo de una infraestructura eléctrica sostenible y resiliente, contribuyendo así a reducir la dependencia de fuentes tradicionales y a robustecer los sistemas energéticos.

- La adopción y mantenimiento de BCAT fomenta la creación de cadenas de suministro que priorizan tecnologías limpias y sostenibles. Esto genera oportunidades para proveedores y pequeñas empresas, especialmente en el ámbito de las energías renovables y la eficiencia energética, fortaleciendo así las economías locales.

- Las BCAT posibilitan el cumplimiento de normativas ambientales más estrictas y sientan las bases para la innovación en tecnologías limpias.

1.3.4 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

Existe en la actualidad numerosos proyectos de integración de las BCAT en redes de calefacción urbana promoviendo la sostenibilidad de las ciudades limitando las emisiones debido al consumo de calefacción y ACS. Asimismo, colabora al desarrollo de la centralización de la calefacción urbana, tanto al mejorar la eficiencia del proceso, como al aportar una mayor flexibilidad ante cambios estratégicos coyunturales del mercado energético, al permitir realizar los cambios de combustible en una sola instalación y no en varias distribuidas por la ciudad. También permiten reducir la producción de CO₂, NO_x y partículas en suspensión, puesto que sustituye las calderas convencionales de gas [109].

1.3.5 ODS 11: Acción por el clima

Las BCAT desempeñan un papel esencial en la acción por el clima, ya que ofrecen una alternativa sostenible a los sistemas de calefacción tradicionales. A continuación, se abordan algunos de los motivos que, si bien han sido citados anteriormente, también son relevantes para el cumplimiento del ODS 11:

- Refuerzan la resiliencia de las infraestructuras energéticas y fomentan prácticas industriales más responsables con el medio ambiente.
- Disminución de los gases de efecto invernadero: Esto es posible gracias a que las BCAT son altamente eficientes en la conversión de electricidad en calor, utilizando energía eléctrica para transferir calor en lugar de generarlo mediante la combustión. Esto permite reducir la demanda de energía y minimizar el uso de combustibles contaminantes.
- Integración de energías renovables: Al ser alimentadas por electricidad, las BCAT facilitan la integración de fuentes de energía renovables en los sistemas de calefacción. Su uso estimula la transición hacia una matriz energética más limpia, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.
- Adaptación al cambio climático: Las BCAT pueden ayudar en la adaptación a condiciones climáticas extremas, proporcionando soluciones eficientes para la calefacción y refrigeración tanto en climas fríos como

cálidos. Esto es vital para mejorar la resiliencia de los sistemas energéticos y proteger a las comunidades frente a las consecuencias del cambio climático.

Desarrollo de infraestructura sostenible: La incorporación de BCAT en redes de calefacción urbana y sistemas industriales fomenta el desarrollo de infraestructuras energéticas resilientes, capaces de soportar las tensiones causadas por eventos climáticos extremos.

1.4 Objetivos de la publicación

Este proyecto ayudará al desarrollo de un documento será publicado por la PTE-ee este año como parte de su programa de trabajo 23-24, y que se llamará "Iniciativa Tecnológica Prioritaria ITP-01-24. Bombas de Calor de Alta Temperatura".

Este trabajo tiene dos objetivos principales:

- Transmitir a las administraciones la necesidad de apoyar en programas de subvenciones los proyectos de desarrollo de estas tecnologías a nivel nacional sobre la base de los beneficios científicos, ambientales y socioeconómicos que se derivan de tener una tecnología e industria nacional propia.
- Ayudar a los asociados de la PTE-ee desarrolladores de tecnología a establecer sus agendas estratégicas al hilo de las tendencias de nuestro entorno, y a los asociados demandantes de tecnología sobre las opciones disponibles presentes en el mercado y las que los estarán en un periodo breve.

Para ello, este proyecto deberá contener los aspectos clave sobre las BCAT y su implementación en la industria. Por lo que los objetivos de contenido de este TFM son:

- Estudiar el marco legal de las BCAT en la UE y en el ámbito nacional.
- Abordar las tecnologías y ciclos existentes de las BCAT.

- Introducir los equipos principales que constituyen a las BCAT.
- Conocer los modelos comerciales existentes de BCAT, así como sus especificaciones.
- Presentar las características de los refrigerantes existentes.
- Analizar los retos existentes sobre las BCAT y los proyectos de I+D que se están desarrollando en la actualidad o finalizaron en 2023.
- Conocer los campos de interés de aplicación de las BCAT y las plantas que operan en la actualidad con dicha tecnología.
- Realizar un análisis económico, social y medioambiental de la integración de las BCAT en procesos industriales o en redes de calefacción urbana.

1.5. Metodología

La metodología constituye un elemento fundamental en la elaboración de este Trabajo Fin de Máster (TFM) sobre BCAT. Este apartado detalla el enfoque sistemático seguido para abordar los objetivos planteados, proporcionando una visión clara y estructurada del proyecto.

En este trabajo existen dos partes claramente diferenciadas. La primera corresponde a una revisión bibliográfica que engloba:

- El marco legal de la UE y nacional.
- Clasificación de las distintas tecnologías de BCAT.
- Componentes principales.
- Los fabricantes existentes.
- Las distintas configuraciones de ciclo estudiadas.
- Los refrigerantes actuales y sus especificaciones.
- Los retos de I+D y proyectos que se están desarrollando en la actualidad o han finalizado en 2023.

Como fuente de información se han utilizado principalmente artículos encontrados en Google académico, en especial de la editorial Elsevier dado su gran rigor científico, aunque también se ha recurrido al BOE para el estudio legal y otros recursos como la aplicación social académica ResearchGate, entre otros.

En primer lugar, se ha realizado una búsqueda por palabras clave o frases en inglés en función de la temática que se quería abordar seleccionando los más recientes. Se ha realizado la búsqueda en dicho idioma debido a la mayor fuente de información presente con respecto al español. A continuación, se recoge un listado de las oraciones de búsqueda usadas:

- Overview HTHP.
- Review steam generation Heat pumps.
- Cycle configuration vapor compression of HTHP.
- Challenges HTHP.
- HTHP integration on industry.
- Refrigerants HTHP.
- HTHP suppliers.
- Components of HP.

Tras la recopilación de los artículos más recientes y relevantes sobre BCAT, se procede a la fase de síntesis de la información. Esta etapa es esencial para consolidar el conocimiento existente, identificar tendencias y detectar posibles brechas en la investigación. La síntesis de artículos se ha llevado a cabo mediante un enfoque estructurado que incluye la clasificación temática, la extracción de datos clave, el análisis comparativo, la síntesis narrativa y la visualización de datos.

Por ello, se llevó a cabo en primer lugar una clasificación temática de los artículos. Este proceso implicó la identificación de los temas principales tratados en los artículos, tales como tecnología de materiales, eficiencia energética, aplicaciones industriales y avances en el diseño de bombas de calor de alta temperatura. Primeramente, se realizó una lectura detallada de los resúmenes y las secciones de resultados de cada artículo, identificando palabras clave y temas recurrentes. Posterior-

mente, se agruparon los artículos bajo estos temas específicos, utilizando herramientas de gestión de referencias como Mendeley, lo cual facilitó su organización y etiquetado para un análisis comparativo posterior.

Seguidamente, se procedió a la extracción de datos clave de cada artículo. En esta fase, se definieron los parámetros de interés que serían relevantes para el análisis, incluyendo la metodología de estudio, el tipo de bomba de calor, los rangos de temperatura operativos, los coeficientes de rendimiento y las conclusiones principales de cada estudio. Estos datos fueron registrados de manera sistemática en una hoja de cálculo, garantizando una documentación consistente y detallada de la información obtenida de cada artículo.

Una vez recopilados los datos clave, se realizó un análisis comparativo de los artículos. Este análisis incluyó la evaluación y comparación de los hallazgos de los diferentes estudios, con el objetivo de identificar similitudes y discrepancias. Para los apartados de fabricantes y refrigerantes se crearon gráficas para comparar parámetros como el coeficiente de rendimiento operativo, los rangos de temperatura de suministro, así como el salto de temperatura dado, con el propósito de representar visualmente los datos comparativos y las tendencias identificadas. Esta visualización de datos no solo facilita la interpretación de los resultados, sino que también proporciona una herramienta eficaz para comunicar los hallazgos de manera clara y concisa. Además, se llevó a cabo un análisis cualitativo de los resultados y discusiones presentados en los artículos, con el fin de identificar

tendencias emergentes en la investigación y áreas que requieren un mayor estudio.

Posteriormente, se desarrolló una síntesis narrativa que integró los hallazgos de manera coherente. Esta narrativa se estructuró en secciones temáticas que abordaron cada uno de los aspectos clave identificados durante la clasificación y el análisis. Se incorporaron referencias de los artículos analizados para apoyar la discusión y proporcionar una base sólida para las conclusiones.

Con esta metodología de síntesis, se ha buscado proporcionar una visión integral y bien fundamentada del panorama actual en la investigación de BCAT, destacando las principales contribuciones, tendencias emergentes y áreas que requieren una mayor investigación. Esta aproximación metodológica asegura una comprensión completa y organizada del estado del conocimiento en este campo, ofreciendo una base sólida para el desarrollo de futuras investigaciones y aplicaciones tecnológicas.

Con respecto a la segunda parte del proyecto, esta se basa en un análisis económico que incluye el capital inicial requerido de los distintos equipos que actualmente se encuentran o estarán en un futuro en el mercado, la rentabilidad operativa de usar cada uno de ellos con respecto al uso de una caldera de gas natural y el periodo de recuperación de la inversión de la sustitución de las calderas. Para ello se han recopilado los valores de precio en el mercado libre de gas natural y electricidad en España en el 2023 y estimaciones para el 2024, así como los valores de COP o consumo eléctrico de los distintos modelos.

2. Marco Legal

La creciente promoción y adopción de bombas de calor en los últimos años ha generado una expansión significativa en el marco legal y normativo que regula este tipo de tecnología. Las BCAT ofrecen una alternativa eficiente y sostenible para la generación de calor en diversos sectores, incluyendo residencial e industrial. Su capacidad para extraer energía térmica de una corriente a menor temperatura y transferirla a un nivel más alto de temperatura las convierte en una opción atractiva para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La importancia del marco legal y normativo radica en establecer las bases para el despliegue seguro, eficiente y conforme a las regulaciones de estas tecnologías. Con el aumento en su uso, los gobiernos y las autoridades regulatorias han respondido implementando normativas específicas que abordan aspectos como la eficiencia energética, la calidad y seguridad de los equipos, las emisiones de gases refrigerantes, y los estándares de instalación y mantenimiento de las bombas de calor.

En consecuencia, las modificaciones y expansiones del marco legal reflejan la necesidad de asegurar que las BCAT contribuyan de manera efectiva a los objetivos de sostenibilidad energética y ambiental. Estas regulaciones buscan garantizar un despliegue adecuado de la tecnología, fomentando su uso responsable y maximizando su potencial para mitigar el impacto ambiental asociado con la generación convencional de calor.

2.1 Marco legal y normativas a nivel europeo

- Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo: Se centra en mejorar la eficiencia energética dentro de la Unión Europea y forma parte de un esfuerzo más amplio para alcanzar la neutralidad climática para 2050 [1].

- Establece un marco común de medidas para promover la eficiencia energética en la Unión Europea, con el objetivo de alcanzar las metas de eficiencia energética de la Unión y fomentar mejoras continuas en este ámbito. Este marco común busca contribuir a la implementación del Reglamento (UE) 2021/1119 y a la seguridad del suministro energético de la Unión, reduciendo su dependencia de las importaciones de energía, incluidos los combustibles fósiles.

- Esta Directiva establece normas prioritarias para aplicar la eficiencia energética en todos los sectores, abordando las deficiencias del mercado que impiden la eficiencia en el suministro, transporte, almacenamiento y consumo de energía.

- Reglamento delegado (UE) 2023/807 relativo a la revisión del coeficiente de energía primaria para la electricidad en aplicación de la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo [2].

- Sugiere la adopción de un Comprobante Electrónico de Pago (CEP) prospectivo para anticipar los futuros beneficios en eficiencia energética. Se recomienda ajustar el coeficiente estándar basado en el promedio del CEP para los años 2024 y 2025.

- Se producen cambios en el anexo IV de la Directiva 2012/27/UE para alinearlo con las nuevas estimaciones y metodologías.

- Directiva (UE) 2023/2413 por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de fuentes renovables y se deroga la Directiva (UE) 2015/652 del Consejo [3].

- Reglamento (UE) 2023/956 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono [4]:

- Establece un Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (MAFC) para abordar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las mercancías listadas en el anexo I, en el momento de su

importación en el territorio aduanero de la Unión. Esto tiene como objetivo evitar el riesgo de fuga de carbono, reducir las emisiones globales de carbono y apoyar los objetivos del Acuerdo de París, creando incentivos para que los titulares de terceros países disminuyan sus emisiones.

- Complementa el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Unión, establecido según la Directiva 2003/87/CE, aplicando una serie de normas equivalentes a las importaciones de mercancías en el territorio aduanero de la Unión.

- Sustituye los mecanismos de la Directiva 2003/87/CE destinados para evitar el riesgo de fuga de carbono. Establece en qué régimen los derechos de emisión del RCDE de la UE se asignan gratuitamente conforme al artículo 10 bis de dicha Directiva.

- Reglamento (UE) 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, emitido el 7 de febrero de 2024, aborda los gases fluorados de efecto invernadero (F-Gas) [5]. Este reglamento impone una reducción gradual en la producción de hidrofluorocarbonos (HFCs) y medidas para limitar su entrada al mercado después de 2030. También incluye disposiciones sobre la recuperación de sustancias de productos y aparatos, así como la prevención de fugas. Su objetivo principal es establecer normas para el manejo, uso, recuperación, reciclaje, regeneración y destrucción de estos gases, junto con medidas de certificación y formación para su manipulación segura y el uso de sustancias alternativas no fluoradas.

- Reglamento (UE) sobre la Industria de Cero Emisiones Netas aún en desarrollo [6]. El Reglamento sobre la Industria de Cero Emisiones Netas tiene por objeto facilitar las condiciones para invertir en tecnologías ecológicas, al simplificar los procedimientos de concesión de autorizaciones y apoyar a proyectos estratégicos. También propone facilitar el acceso al mercado a los productos tecnológicos estratégicos, mejorar las capacidades de la mano de obra europea en estos sectores y establecer una plataforma de coordinación en la UE. Dicho reglamento propone la creación de marcos normativos específicos para el desarrollo, el ensayo y la validación de tecnologías innovadoras.

- Ley (UE) ESPR para la regulación de productos sostenibles a través del ecodiseño aún en desarrollo [7]. El propósito de la propuesta para una nueva Regulación de Ecodiseño para Productos Sostenibles (ESPR), publicada el 30 de marzo de 2022, es mejorar la sostenibilidad ambiental y la circularidad de los productos. Esta propuesta amplía la Directiva actual de ecodiseño (2009/125/EC), que actualmente solo abarca productos relacionados con la energía. La nueva regulación establecerá requisitos de ecodiseño para diversos grupos de productos, mejorando su circularidad, rendimiento energético y otros aspectos de sostenibilidad ambiental. También se introducirá un "Pasaporte Digital de Productos" para proporcionar información sobre la sostenibilidad ambiental de los productos, facilitando así decisiones informadas para consumidores y empresas. La regulación aplicará tanto a productos fabricados dentro como fuera de la UE y se cumplirá con las normas comerciales internacionales.

2.2 Marco legal y Normativas a nivel nacional

- Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, por el que se establece un sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAE). Se crea un sistema de CAE en virtud del cual los sujetos obligados del SNOEE podrán acreditar, durante el periodo de vigencia, el cumplimiento total o parcial de sus obligaciones de ahorro energético mediante la liquidación de CAE [8].

- Orden TED/815/2023, de 18 de julio, por la que se desarrolla parcialmente el Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, por el que se establece un Sistema de Certificados de Ahorro Energético [9].

- Orden TED/296/2023, obligaciones de aportación al Fondo Nacional de Eficiencia Energética (FNEE) en el año 2023 [10].

- Orden TEC/544/2019, de 25 de abril, por la que se

constituye y regula el registro unificado sobre certificados y centros de formación de gases fluorados [11].

- Real Decreto 712/2022, de 30 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre los Gases Fluorados de Efecto Invernadero [12].
- Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases [13]. Plantea un incremento gradual en la proporción de envases comer-

ciales e industriales reutilizables con respecto al peso total de envases hasta el año 2035. La transición hacia la reutilización en lugar del reciclaje de estos envases conlleva implicaciones significativas en el ámbito del transporte y la logística en España. Además, en muchos casos, puede requerir la duplicación de procesos para cumplir con diferentes estándares en actividades domésticas y de exportación, lo que podría tener efectos negativos considerablemente graves.

3. Estado del Arte

3.1 Clasificación de las BCAT

Las BCAT pueden clasificarse según la tecnología utilizada, así como en función de la fuente de energía que empleen. En la siguiente figura se muestra un esquema de la clasificación de las BCAT.

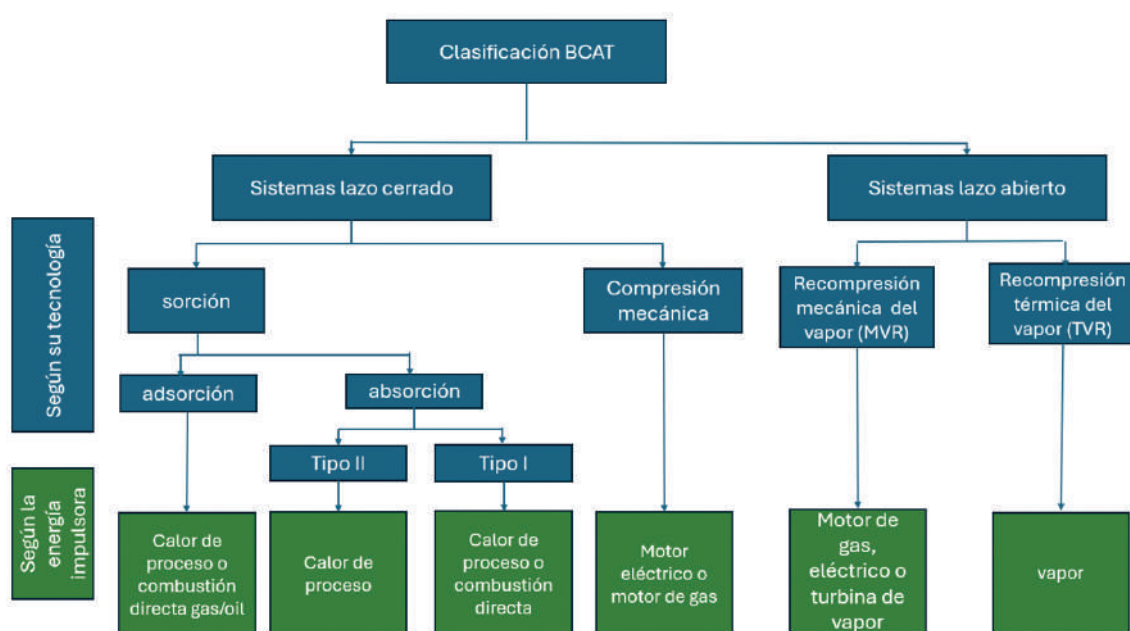


Figura 1: Clasificación BCAT [15]. Elaboración propia.

3.1.1 Clasificación BCAT según su tecnología

La primera clasificación fundamental de las BCAT se basa en sistemas de ciclo abierto o de ciclo cerrado.

3.1.1.1 BCAT de ciclo abierto

Los sistemas de ciclo abierto son aquellos en los que se produce una renovación constante del fluido de trabajo. Las tecnologías existentes que operan en ciclo abierto son las BCAT con recompresión térmica del vapor (TVR) y las BCAT de recompresión mecánica del vapor (MVR). Este tipo de BCAT son las que permiten alcanzar temperaturas más altas, de hasta 350 °C para el caso de las TVR y pueden emplearse tanto para la compresión del vapor residual como después de una BCAT de ciclo cerrado [14]. Las ventajas de las BCAT de ciclo abierto son su construcción sencilla, su fácil utilización y los costes operativos considerablemente menores que los evaporadores convencionales. No obstante, presentan poca flexibilidad con respecto a la fuente empleada, pues suelen no poder usarse para fuentes como el aire o agua [14].

3.1.1.1.1 BCAT con recompresión térmica del vapor (TVR)

En este tipo de tecnología, el vapor se recomprime a través de un eyector accionado por vapor de alta presión. El vapor de alta presión, también llamado vapor motriz, es el encargado de comprimir el vapor de baja presión, es decir, la corriente alimentada. Los eyectores consisten en boquillas de succión y motivación, una cámara de mezcla y un difusor [14][16].

Pueden alcanzarse temperaturas de hasta 350 °C con incrementos de temperatura de 20 °C por etapa en el vapor saturado [14]. Además, son baratos, de mantenimiento más sencillo y mayor vida útil que las BCAT MVR. Sin embargo; entre sus limitaciones se encuentran la baja eficiencia de los eyectores y su baja flexibilidad ante cambios de condiciones de operación [14]. En las figuras 2 y 3 se muestran un esquema de las distintas partes del eyector empleado y un proceso de destilación en el que se utiliza el proceso TVR respectivamente. En la destilación, al emplearse más vapor del necesario para la ebullición de la solución, el vapor en exceso se condensa o se libera al medio. La presión de vapor es la variable que determina la relación entre el vapor motriz y el procedente de la solución.

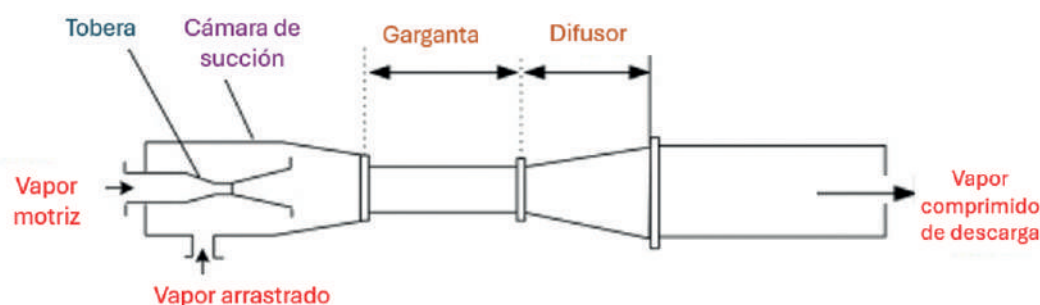


Figura 3: Diagrama de un eyector para las BCAT de recompresión térmica del vapor [16].

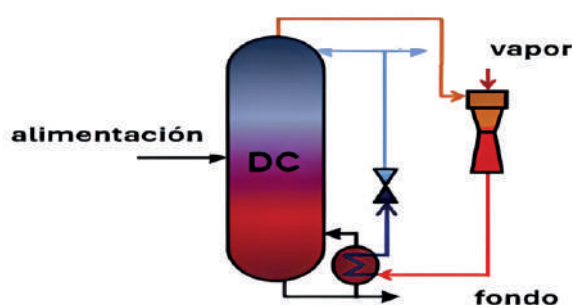


Figura 4: Columna de destilación con TVR [17].

3.1.1.1.2 BCAT con recompresión mecánica del vapor (MVR)

Se trata de un proceso de recuperación de energía donde el vapor de baja presión aumenta de energía interna al comprimirlo consiguiéndose un vapor de menor volumen a altas presiones y temperaturas recuperando, por tanto, calor de dicha corriente [17]. Además, la energía mecánica necesitada suele ser notablemente inferior a la obtenida durante la condensación.

Se consiguen temperaturas de sumidero entre 80 °C y 250 °C con valores típicos de incrementos de temperatura entre 20 °C y 40 °C para una etapa simple [14]. Este proceso suele emplearse en columnas de destilación, pues tiene un gran potencial para reducir el gasto energético en el reboiler, disminuir a fricción en él y liberar mayor energía durante su condensación [18][19]. En dicho proceso, el fluido de trabajo es el vapor de cabeza de la columna de destilación el cual es comprimido. En la siguiente figura se muestra un esquema de un proceso de destilación empleando una tecnología MVR.

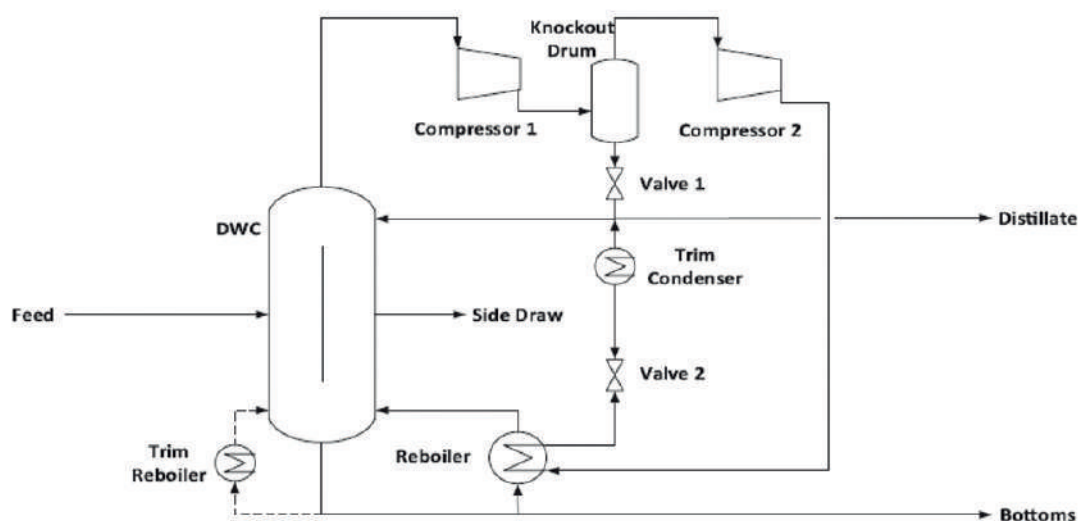


Figura 5: Ejemplo columna de separación con MVR de Inter-etapa y depósito de separación [19].

Para esta tecnología pueden utilizarse diferentes compresores de desplazamiento positivo ventiladores, turbocompresores y soplantes [20].

3.1.1.2 BCAT de ciclo cerrado

Las tecnologías que trabajan en ciclo cerrado son los sistemas de sorción y las BCAT de compresión mecánica.

3.1.1.2.1 BCAT de sorción

En este tipo de bombas la energía que se introduce es de origen térmico. Se consiguen temperaturas de entre 90 °C y 165 °C en función del sistema empleado [14]. Existen dos tipos de bombas de calor que emplean esta tecnología; las bombas de calor absorción y las de adsorción.

El proceso de adsorción se basa en la separación de una sustancia de una fase acumulándose en la superficie de otra fase siendo estas sólido-gas. Por otro lado, la absorción es el proceso por el cual un componente transferido de una fase a otra penetra en el interior de la segunda fase, la cual es líquida, dando lugar a una solución [8]. Por tanto, las principales diferencias entre el proceso de absorción y adsorción es la naturaleza del sorbente y el ciclo de sorción, siendo mayor el de adsorción. De manera que, la recuperación de calor se ve facilitada en la absorción al ser el absorbente bombeable. Por ello

y otros factores, el desarrollo de tecnologías de BCAT de absorción es considerablemente mayor al de las BCAT de adsorción.

Este tipo de BCAT son controladas a partir de cambios en las temperaturas de las corrientes de fuente de calor y sumidero. La temperatura de salida de la corriente de enfriamiento suele estar 5-10 °C por encima de la temperatura de entrada de ésta. Para un diseño dado, puede aumentarse la capacidad térmica de la BCAT modificando la temperatura del condensador o la del generador. Un aumento de la temperatura del absorbedor produce menores potencias térmicas.

Bombas de calor de absorción:

Los sistemas de absorción constan de un lado de baja presión donde el refrigerante evaporativo es absorbido por el absorbente creándose una solución débil. Esta, se dirige al generador donde se presuriza y con ello, se desorbe evaporándose parte del refrigerante. Después, el refrigerante se enfría y la solución débil se reconduce al absorbedor donde se repite el ciclo liberando calor a la temperatura de revalorización [21].

Según el ciclo termodinámico las BCAT de absorción pueden ser de simple efecto, de doble efecto y de triple efecto, aunque este último es el menos desarrollado [8]. El incremento del número de etapas permite conseguir mayores temperaturas y COP. Sin embargo; la BCAT de simple efecto es la más empleada por su sencillez y buen rendimiento [21].

Por otro lado, según el grado de revalorización, existen dos tipos de bombas de calor de absorción, tipo I y tipo II [8]. La diferencia entre ellas es que las bombas de calor de absorción de tipo I introducen en el sistema una fuente de alta temperatura, generalmente mayor de 100 °C, y una de baja para obtener una corriente de salida de media temperatura [14]. Por dicho motivo, apenas existen modelos en los que se obtengan temperaturas superiores a 90 °C [14]. Por el contrario, las bombas de calor de absorción de tipo II emplean una fuente de media temperatura para conseguir una corriente de alta temperatura. Por tanto, estas últimas revalorizan el calor residual gracias a un proceso de absorción exotérmico [21]. De esta forma la mitad de la potencia de activación es revalorizada y la otra mitad se disipa a un foco de menor temperatura. Este tipo de bombas de calor permite recuperar el calor residual que, debido a su baja temperatura, no podrían ser revalorizados en otros procesos y, por ende, aumenta hasta un 50 % la exergía de la fuente de calor residual [21]. En los modelos tipo II la temperatura del absorbedor es superior a la del condensador a diferencia de las bombas de calor de absorción tipo I. Según fuentes bibliográficas para los modelos tipo II, pueden alcanzarse temperaturas máximas de 165 °C con capacidades de MW_{th} , aunque se están desarrollando equipos de doble etapa que permiten conseguir temperaturas de hasta 230 °C [14]. Sin embargo; cabe destacar que el máximo incremento que se puede alcanzar con modelos de etapa simple con este tipo de bombas de calor es de 50 °C.

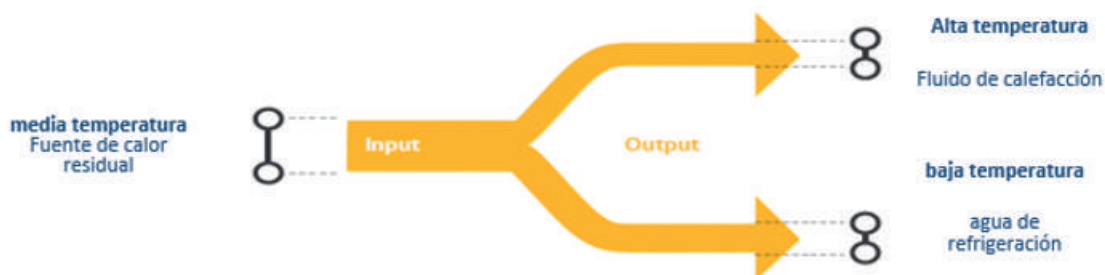


Figura 6: Esquema funcionamiento bomba de absorción tipo II [22].

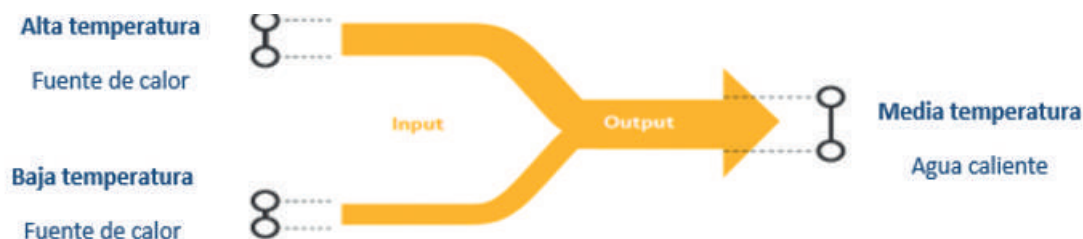


Figura 7: Esquema funcionamiento bomba de absorción tipo I [22].

El funcionamiento de las BCAT de absorción de tipo II se basa en la agregación continua de un calor residual a una temperatura relativamente baja al generador, donde se vaporiza parte del fluido de trabajo de la solución diluida de absorbente [21]. La mezcla vaporizada se dirige al condensador liberando calor a una temperatura cercana a la ambiental. El líquido que sale del condensador se bombea a una zona de mayor presión del evaporador. Posteriormente, el fluido de trabajo se evapora tras introducir una segunda corriente de calor residual que se encuentra a una temperatura intermedia. El fluido de trabajo vaporizado es enviado al absorbedor donde se libera calor útil a una temperatura mayor. La corriente de salida del absorbedor vuelve al generador para precalentar la mezcla antes de reiniciarse el ciclo. En la Figura 8 se muestra el diagrama presión temperatura de una BCAT de absorción tipo II. Puesto que el salto de temperatura se consigue gracias al absorbedor, se requiere menor energía eléctrica que otras tecnologías como la compresión mecánica o los modelos MVR. El consumo del equipo de bombeo es un 1% de la potencia térmica generada por lo que no suele considerarse en el COP. Para este tipo de bombas de absorción el COP siempre es menor a 1.

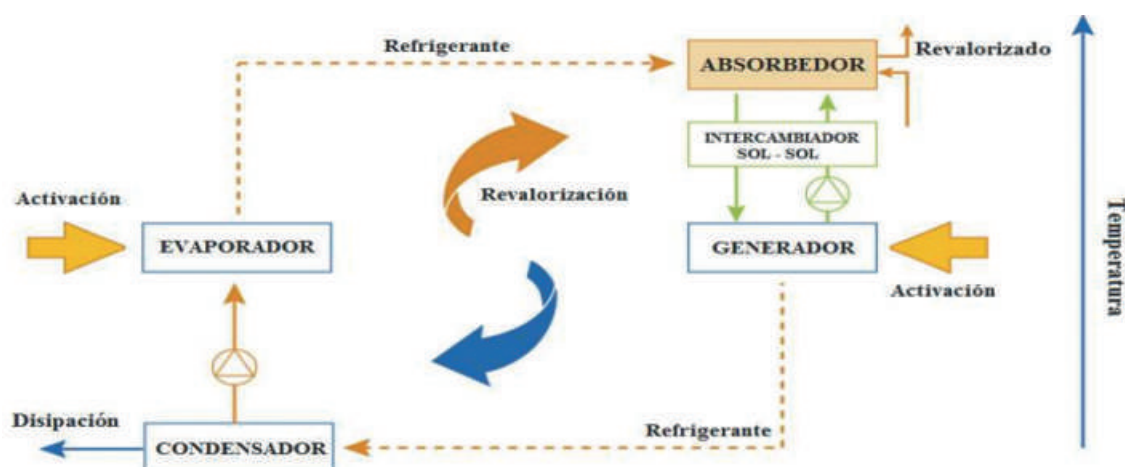


Figura 8: Diagrama presión temperatura de una BCAT de absorción tipo II [23].

Las bombas de calor por absorción pueden usar como mezcla absorbente/refrigerante agua (H_2O) /amoníaco (NH_3) o bromuro de litio ($LiBr$)/ H_2O . En la siguiente tabla se muestra las ventajas y desventajas de cada una de ellas:

	LiBr/H ₂ O	NH ₃ /H ₂ O
Ventaja	Evaporativa a temperaturas por debajo de 0 °C	Elevado COP
		Bajas presiones de operación
		Más sostenible medioambientalmente y menos peligroso
Desventaja	Tóxica y peligrosa para la salud. Necesita una columna de rectificación de alta presión	Se consiguen temperaturas más bajas

Tabla 1: Comparativa absorbentes para las bombas de calor de absorción [21].

El ciclo simple de absorción de LiBr/H₂O ha sido un proceso fundamental en aplicaciones de refrigeración desde la década de 1940. Su análisis y descripción se basan en el diagrama de equilibrio de presión-temperatura-concentración, los ciclos de solución, la composición química de sus componentes individuales y la inclusión de aditivos específicos. La eficiencia operativa de este ciclo se ve influenciada significativamente por su capacidad para funcionar eficazmente a cargas parciales y por las particularidades inherentes al mantenimiento del sistema. En este contexto, el bromuro de litio actúa como el absorbente principal, mientras que el agua cumple la función de refrigerante [21]. En la actualidad, suele preferirse la mezcla de LiBr/H₂O cuando se requiere altas temperaturas de salida.

El segundo sistema más empleado se basa en la absorción de agua-amoniaco. Esta variante se encuentra mayormente en aplicaciones industriales, procesos químicos, la industria alimentaria y en procesos de secado, siendo también apto para aplicaciones de energía solar. En contraste con el ciclo LiBr, en el ciclo de absorción de agua-amoniaco, el agua asume el papel de absorbente, mientras que el amoniaco actúa como refrigerante [21]. La instalación de estos sistemas en espacios cerrados requiere una adecuada ventilación conforme a las normativas aplicables a la refrigeración con amoniaco [8]. La cantidad de etapas de evaporación puede ser ajustada para alcanzar las temperaturas necesarias según los parámetros de diseño específicos de cada aplicación. Es importante destacar que los sistemas de ciclo de absorción de agua-amoniaco son altamente personalizables para adaptarse a cada caso particular. A pesar de sus diferencias fundamentales, los principios operativos de estos sistemas comparten similitudes con las máquinas de absorción basadas en LiBr.

Bombas de calor de adsorción:

Existen dos principales categorías de sistemas en el campo de la climatización, los sistemas continuos y los sistemas intermitentes, siendo estos últimos los preferidos en aplicaciones que hacen uso de la energía solar. Asimismo, estos sistemas de bombas de calor pueden ser clasificados según la naturaleza del proceso, es decir, si involucran o no reacciones químicas.

Cuando se usan lechos fijos de adsorbente, ampliamente utilizados, los ciclos de funcionamiento pueden operar sin partes móviles, como las válvulas magnéticas. Esta configuración asegura una reducida vibración, una mecánica simplificada, una alta fiabilidad y una prolongada vida útil [21]. Además, el uso de lechos fijos implica una operación intermitente del ciclo con los lechos de adsorbente, alternando entre las etapas de adsorción y desorción. Por lo tanto, cuando se requiere un flujo continuo, es necesario operar dos o más lechos de adsorbente en desfase.

Al igual que las BCAT de absorción, pueden clasificarse en BCAT de adsorción de tipo I o tipo II. En comparación con las bombas de calor de absorción, los sistemas de adsorción tienden a ser más costosos y su COP es menor por ello tienen una disponibilidad comercial limitada [21].

El agua es quizás el adsorbato más utilizado, pero también se emplean etanol, metanol y amoníaco. Dado que tienen bajos puntos de vaporización, el metanol y el etanol se emplean ampliamente en aplicaciones de refrigeración. Dado que el amoníaco tiene un alto poder calorífico específico durante la fase de adsorción debido a la alta presión, se emplea ampliamente con adsorbentes de carbón activado, pero tiene la desventaja de ser tóxico y emitir un fuerte olor en caso de fuga accidental. Los carbones activados, las zeolitas, los AIPO (aluminofosfatos similares a las zeolitas), los geles de sílice y los SAPO (silicoaluminofosfatos) son materiales adsorbentes comunes para las bombas de calor de adsorción. Uno de los aspectos más críticos de una bomba de calor de adsorción duradera es la selección del par adsorbente-adsorbato, pues algunas combinaciones presentan baja estabilidad hidrotérmica o muestran histéresis debido al envejecimiento del material a través de algunos ciclos.

Materiales adsorbentes:

Con respecto a las zeolitas, se pueden emparejar con varios refrigerantes, siendo el agua el más frecuente con diferencia. Las zeolitas, incluido el gel de sílice, fueron los adsorbentes más estudiados y utilizados en sistemas experimentales. Sin embargo; el empleo de zeolitas en bombas de calor de adsorción como material adsorbente a altas temperaturas de desorción (200 °C–300 °C para zeolitas naturales) está severamente restringido. No obstante; se han realizado varios avances en la reducción de la temperatura de desorción en los últimos años.

En los últimos años, el gel de sílice ha sido considerado como un adsorbente de agua convencional en el que se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios, y se ha utilizado ampliamente en numerosos sistemas de adsorción. El bajo coste, las bajas temperaturas de regeneración (60–100 °C) y la durabilidad en usos potenciales son ventajas de los adsorbentes de gel de sílice. Desafortunadamente, la mayoría de la adsorción de agua ocurre a elevadas presiones relativas. Se han desarrollado un gran número de enfoques para superar este problema, incluida la reducción del tamaño de poro y el aumento del número de grupos silano en la superficie. Sin embargo, el gel de sílice mesoporoso, que incluye aluminio u otros metales, tiene la mayor capacidad de adsorción de agua.

Los carbones activados se utilizan ampliamente como adsorbentes de amoníaco y metanol. Se encuentran en forma de polvo, ligeros, granulares, carbono monolítico y fibras. Los niveles de temperatura para los carbones activados varían mucho según el adsorbato utilizado y su tipo.

Los aluminofosfatos (AIPO) y silicoaluminofosfatos (SAPO), al igual que los materiales de zeolita, tienen una alta capacidad para absorber agua y la capacidad de ser empleados con temperaturas reducidas de desorción, es decir, (60 °C–100 °C). Estos materiales poseen isothermas en forma de S, lo que significa que tienen un gran potencial para el intercambio de agua a variaciones de temperatura reducidas. Las estructuras metal-orgánicas porosas son un nuevo conjunto de adsorbentes de agua debido a la exhibición de la incapacidad distintiva de sus propiedades hidrofílicas y estructurales. Aunque las MOFs tienen una alta capacidad de adsorción de metanol, etanol y agua en condiciones operativas típicas, la deterioración con el tiempo, el alto coste y la volatilidad hidrotérmica siguen siendo barreras significativas.

3.1.1.2.2 BCAT de compresión mecánica

Las bombas de calor de compresión mecánica pueden dividirse en ciclos de compresión de vapor y ciclos de gas, en estos últimos se incluyen los sistemas Stirling y Brayton inverso.

BCAT de compresión de vapor

Este tipo de bombas son ampliamente empleadas debido a su simplicidad y rendimiento estable. Su funcionamiento se basa en emplear energía eléctrica la gran mayoría de veces para generar calor a altas temperaturas. Según el número de etapas de compresión pueden clasificarse en mono etapa, doble etapa y compresión en cascada [24]. Las BCAT multietapa poseen mejor eficiencia de compresión que las de etapa simple, menor ratio de compresión y mayor flexibilidad [24]. Según varios estudios este tipo de bombas puede alcanzar temperaturas hasta 200 °C [14]. Su ciclo puede ser subcrítico y transcrito. En ambos la liberación de energía es gracias a la evaporación del refrigerante al absorber calor de una fuente de baja presión y ser posteriormente comprimido. En los ciclos subcríticos el refrigerante es condensable mientras que en los transcritos se rechaza el calor por encima de la presión crítica del refrigerante a través del enfriamiento sin cambio de fase de este [25].

Las etapas básicas de este tipo de bombas de calor son:

- Evaporación/calentamiento: Se eleva la temperatura de la corriente por encima de la temperatura de saturación en el evaporador produciéndose un cambio de estado de líquido a gas.
- Compresión: El refrigerante se comprime. De esta forma se consigue aumentar la temperatura y la presión del refrigerante, y, por ende, su entalpía. En los ciclos transcritos se comprime por encima de su punto crítico.
- Condensación /Enfriamiento: El fluido caliente se dirige hacia un intercambiador de calor. Cuando se trabaja con ciclos subcíclicos, el refrigerante se introduce en un condensador donde se produce el cambio de estado a líquido, mientras que para ciclos transcritos, sólo se produce el enfriamiento del refrigerante. Por tanto, en ciclos subcríticos se emplearán condensadores mientras que en los ciclos transcritos enfriadores de gas [25]. El evaporador y el condensador /enfriador de gas son los equipos de conexión entre la fuente sumidero y la fuente de calor [26].
- Expansión: El fluido tras su condensación / o enfriamiento se expande en una válvula isoentálpica gracias a la pérdida de carga disminuyendo la presión y la temperatura del refrigerante. En el caso de ciclos transcritos puede optarse por la expansión multietapa para reducir las pérdidas por estrangulamiento que se producen en la válvula debido al mayor porcentaje de vapor [25].

En la siguiente figura se muestra el diagrama presión entalpía de un ciclo de una sola etapa y su esquema de proceso respectivamente.

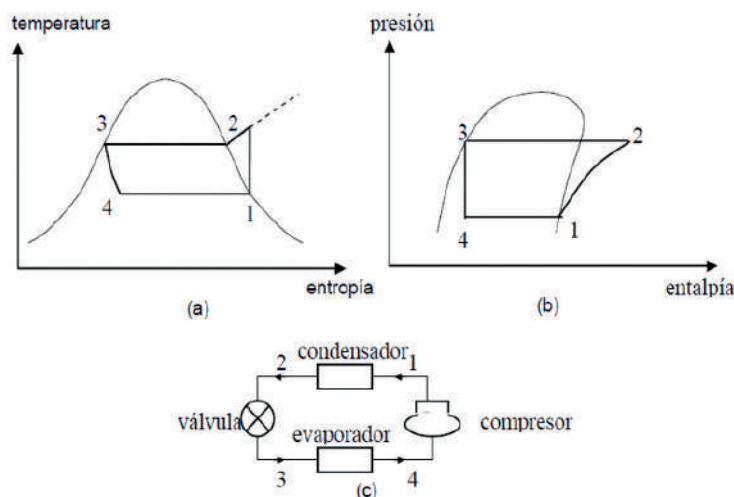


Figura 9: Diagrama P-T y esquema de proceso de una bomba de calor de compresión mecánica de ciclo subcrítico [27].

Con el fin de mejorar la actuación de la BCAT se suele trabajar con temperaturas de deslizamiento no superiores a 20 °C.

Sistema híbrido absorción/compresión:

Este tipo de BCAT combinan las tecnologías de absorción y compresión mecánica operando en ciclo cerrado. Dependiendo del subciclo dominante existen dos tipos de bombas híbridas; las BCAT de ciclo de absorción asistido por compresión y las de compresión asistidas por absorción, siendo las primeras las más desarrolladas.

Los sistemas de absorción asistidas por compresión constan de un compresor instalado después del evaporador, y por tanto se encuentra en la zona de baja presión, o puede colocarse antes del condensador, es decir, en la zona de alta presión para disminuir la presión de generación y modificar la temperatura de ebullición. Aunque la absorción-desorción es a presión constante, en los ciclos híbridos, las temperaturas de saturación varían con los cambios de concentración durante el cambio de fase [28]. Las ventajas de la absorción con compresión asistida son el mayor incremento de temperatura, altas temperaturas de descarga, menor presión de operación, mayor flexibilidad e incremento de la eficiencia energética. Según datos bibliográficos pueden alcanzarse temperaturas de hasta 150 °C [28].

La bomba de solución aumenta la presión del absorbente y el compresor aumenta la presión del refrigerante. Estas dos corrientes se mezclan en el absorbedor donde se libera calor a la fuente. La corriente rica en absorbente se expande antes de la desorción. El refrigerante se evapora en el desorbedor gracias a la transferencia de calor originada por la fuente de calor. Posteriormente se lleva a un separador líquido-gas para separar el gas del refrigerante de la mezcla. El intercambiador de calor interno disminuye la temperatura de entrada en el desorbedor y la aumenta antes de entrar al absorbedor [29]. En la siguiente figura aparece representado el proceso de una bomba de calor de absorción-compresión.

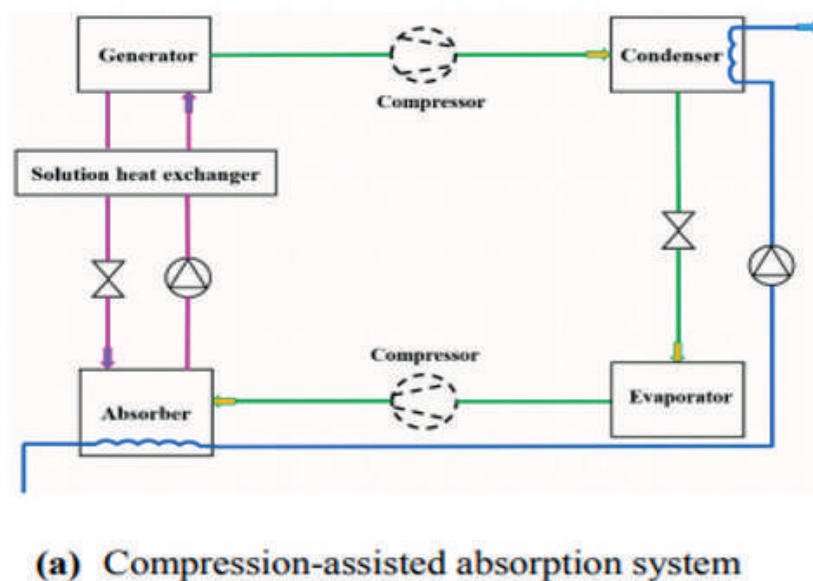


Figura 10: BCAT de Ciclo de absorción con compresión asistida [29].

Ciclo Stirling inverso

En la actualidad se han desarrollado nuevos modelos comerciales de BCAT basados en el ciclo Stirling inverso. El ciclo Stirling inverso permite, a través del uso de energía mecánica, el aumento de la energía térmica de una corriente. Este proceso implica dos cambios de estado isocóricos y dos isoterms que se llevan a cabo en una máquina que consta de dos cámaras conectadas por dos pistones. Estas cámaras están unidas por un regenerador, que tiene una alta conductividad térmica y una gran superficie específica que permite un calentamiento y enfriamiento rápidos. La presión de carga, junto con la configuración, determinan la presión máxima y la amplitud, pudiendo ajustarse para regular la carga de la bomba de calor. Este proceso puede adaptarse a cualquier temperatura externa, independientemente de las presiones del gas. Cualquier limitación en las temperaturas está relacionada con la implementación mecánica del proceso. El proceso de Stirling inverso es particularmente eficaz para altos saltos de temperatura, consiguiendo un COP superior al de otros ciclos [32]. Una de las ventajas principales de este tipo de BCAT es la posibilidad de usar fuentes de energía renovable.

Las etapas del proceso ideal de Stirling son las siguientes:

1. Compresión isotérmica de 2 a 3 en la primera cámara: Se realiza trabajo de cambio de volumen al gas a una temperatura constante liberándose calor al lado sumidero.
2. El gas se transfiere a la segunda cámara a volumen constante de 3 a 4. El regenerador se calienta y el gas se enfría. El movimiento de los dos pistones está sincronizado mecánicamente.
3. Expansión isotérmica de 4 a 1: Se libera trabajo de cambio de volumen. El pistón se mueve y el gas se calienta gracias a la fuente de calor para mantener la temperatura constante.
4. El gas se transfiere de nuevo a la primera cámara a volumen constante de 1 a 2. El gas se calienta por el regenerador.

Se utiliza helio como fluido de trabajo ya que su conductividad térmica es diez veces mayor a la del aire.

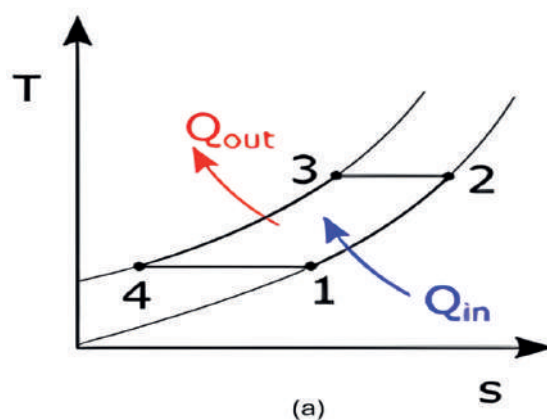


Figura 11: Diagrama T-S ciclo Stirling [30].

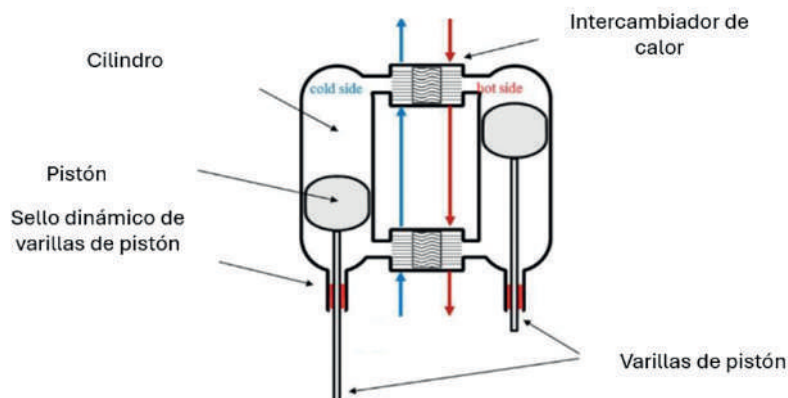


Figura 12: Esquema BCAT ciclo Stirling [30]. Ciclo Brayton inverso

En este tipo de BCAT constan de una turbina como medio expansor y en ellas no se produce cambio de estado del fluido de trabajo. Esta tecnología aún está poco desarrollada, pero posee un gran potencial para procesos que demandan altas temperaturas. En la siguiente figura aparecen distintas configuraciones de un ciclo Brayton inverso.

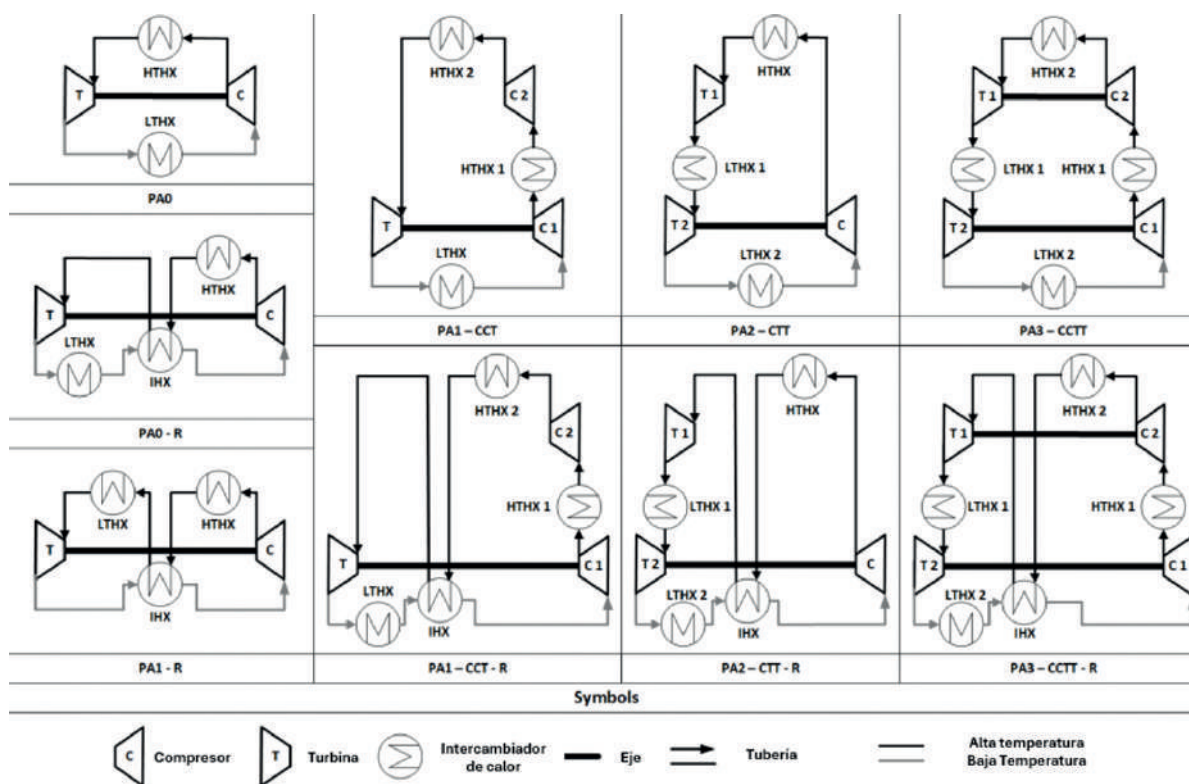


Figura 13: Configuraciones BCAT de ciclo Brayton inverso [31].

En la Tabla 2 aparecen registradas las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías existentes, así como El COP habitual de estas:

Tecnología	Ventajas	Desventajas	COP habitual
Compresión mecánica	- Buen COP para saltos de temperatura moderados - Múltiples vendedores	Requiere baja relación precio electricidad /combustible	1.5-5
Sorción tipo I	- Pequeños costes al usar combustible fósil. - Mínimas partes móviles.	- Pocos vendedores - Posible mayor impacto medioambiental	1.6
Sorción tipo II	- Uso de calor residual - Mínimas partes móviles. - Altas temperaturas de suministro	- Pocos vendedores - Tecnología emergente - Salto de temperatura limitado - Alto CAPEX	0.5
MVR	- Buen COP para saltos de temperatura moderados - Bajo CAPEX	- Requiere baja relación precio electricidad /combustible - Necesidad de que la corriente sea vapor	3-10
TVR	- Muy bajo CAPEX - Bajo Mantenimiento	- Baja eficiencia energético - Requiere de vapor	2

Tabla 2: Comparativa de las tecnologías de BCAT. Elaboración propia.

3.1.2 Según la fuente de energía

Las distintas tecnologías mencionadas en el apartado 5.1.1 pueden emplear distintas fuentes de energía para su funcionamiento. En el caso de las BCAT de ciclo abierto, los equipos de MVR pueden usar un motor eléctrico, combustión interna o vapor en una turbina mientras que, la TVR utiliza como fuente de energía solamente vapor [14].

Por otro lado, las bombas de absorción y adsorción tipo I pueden utilizar la combustión de gas o fuel-oil, vapor o un proceso térmico como puede ser el aprovechamiento del calor residual, de energía solar o de la geotérmica. En el caso de los modelos de compresión mecánica, el compresor puede estar accionado por electricidad, como ocurre en la mayoría de las modelos, o por un motor de gas.

3.2 Bombas de calor de generación de vapor (BCGV)

Las bombas de calor de generación de vapor pueden presentar las cinco configuraciones mostradas en la figura 13.

El tipo A es el más frecuente de BCGV, en ella el vapor se genera como fuente sumidero del condensador o del enfriador de gas en una BCAT de ciclo cerrado. Este tipo de bombas de calor pueden ser de compresión de vapor (ciclos subcríticos y transcíticos), ciclos de compresión de gas, ya sea ciclo Stirling inverso o ciclo Brayton inverso y bombas de calor de sorción tipo II. Con el fin de asegurar la calidad de la corriente, algunas bombas de calor de este tipo cuentan con separadores de gotas de agua.

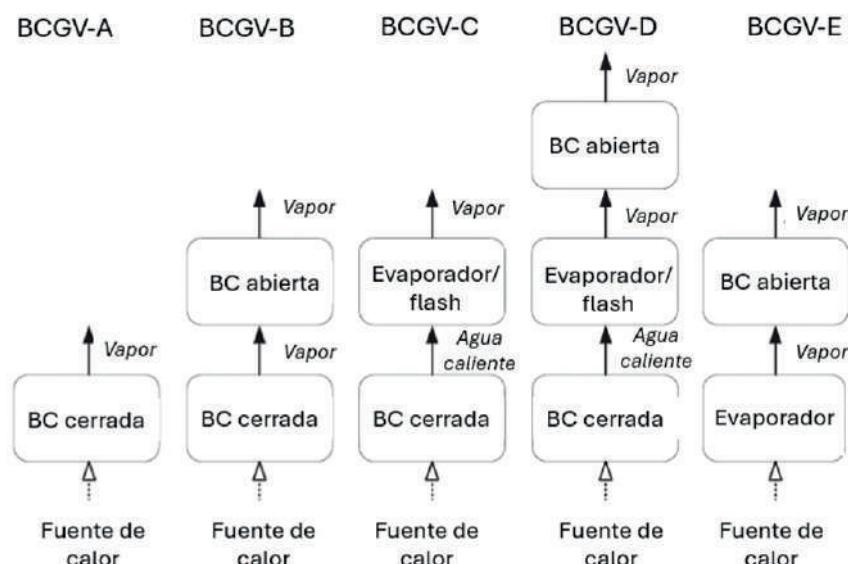


Figura 14: Configuraciones bombas de calor de generación de vapor [14].

El concepto SGHP-B considera una combinación de bombas de calor de circuito abierto y cerrado. La bomba de calor de circuito abierto permite temperaturas de suministro más altas, pero también implica una mayor complejidad. En algunos diseños MVR, también se debe asegurar que no queden gotas de agua en el vapor generado por la bomba de calor de circuito cerrado.

Las SGHP tipo C generalmente alcanzan temperaturas de suministro ligeramente inferiores a las de SGHP. Esto es debido a que el proceso de evaporación siempre está asociado con un cierto gradiente de temperatura. A diferencia de los conceptos SGHP-A y SGHP-B, no se requiere evaporación en el condensador de la bomba de calor (o enfriador de gas). Por otro lado, cuando se usa un tanque flash, se debe tener en cuenta que sólo se puede proporcionar vapor saturado.

El concepto SGHP-D incluye una bomba de calor de circuito abierto adicional, lo que permite alcanzar temperaturas de suministro más altas, pero también aumenta la complejidad. De forma análoga al concepto SGHP-B, puede ser necesario proporcionar medidas adicionales para garantizar la calidad requerida del vapor en la salida del tanque flash o evaporador para evitar daños en el compresor.

Las SGHP tipo-E no utilizan una bomba de calor de circuito cerrado y este sistema es especialmente adecuado para temperaturas de fuente superiores a 100 °C. El uso de bajas temperaturas de fuente (por ejemplo, 60 °C) está vinculado a una operación en condiciones de presión subatmosférica, lo que aumenta la complejidad del sistema. Dependiendo de la temperatura de vapor deseada, se producen aumentos de temperatura y presión altos, lo que requiere la utilización de compresión en etapas múltiples.

En la siguiente figura aparecen representados los distintos rangos de operación de las distintas configuraciones de bombas de calor de generación de vapor.

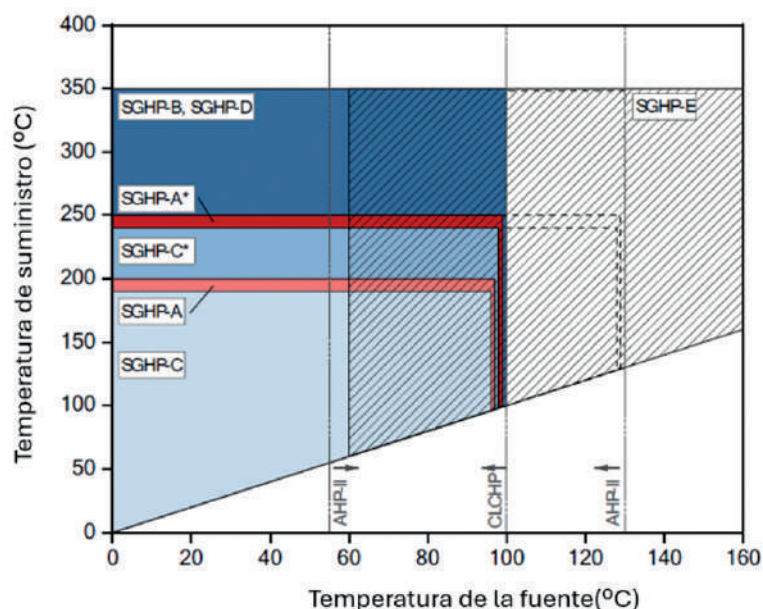


Figura 15: Parámetros operacionales de las distintas SGHP. El (*) hace referencia a bombas de calor de compresión de gas o de absorción tipo II [14].

Como puede observarse en la Figura 14, las bombas de calor de tipo B y D son las que proporcionan mayor temperatura de suministro, en contraste con los modelos tipo C.

3.3 Componentes

3.3.1 Elementos de compresión

Los equipos empleados para elevar la presión de gases son los soplantes, ventiladores y compresores. Los dos primeros suelen emplearse solo para ciclos MVR mientras que los compresores se emplean tanto en ciclos MVR como en ciclos cerrados de compresión mecánica o ciclos híbridos compresión/absorción.

3.3.1.1 Compresores

Se trata de máquinas térmicas que emplean energía mecánica para aumentar la presión y la energía térmica de un fluido compresible. Según el acoplamiento del motor pueden clasificarse en:

- Abierto: En este caso el motor del compresor es externo, es decir, está separado del compresor. Para evitar fugas del fluido de trabajo, es necesario que disponga de cierre de estanqueidad. La principal limitación de este tipo de compresores es su menor rendimiento ya que no se puede recuperar las pérdidas caloríficas del motor [32]. Suele emplearse para altas velocidades de giro.

- **Semiabierto:** El motor se encuentra acoplado al compresor de manera que se consigue su refrigeración a partir del fluido de trabajo incrementándose el rendimiento [33].
- **Herméticos:** Están sellados herméticamente y en ellos se puede recuperar prácticamente todo el calor liberado por el motor, aunque su mantenimiento es complicado [32]. Se emplean para bajas potencias.

Por otro lado, los compresores pueden dividirse en dinámicos, térmicos o de desplazamiento positivo según la forma en que compriman el fluido.

3.3.1.1.1 Compresores desplazamiento positivo

Utilizan un sistema que permite introducir un volumen de aire en una cámara la cual disminuirá su tamaño comprimiendo el aire. Pueden clasificarse en:

- **Alternativos:** Se consigue comprimir el aire a través del desplazamiento de un émbolo dentro de un cilindro produciéndose un movimiento alternativo gracias al cigüeñal y a la biela. El aire se aspira a través de una válvula de admisión del cilindro al desplazarse hacia abajo el pistón. La compresión se consigue al moverse hacia arriba el pistón mientras que la descarga se realiza a través de la válvula de descarga. Si la presión de succión disminuye baja el caudal comprimido. Permite mayores relaciones de compresión, sin embargo, el flujo pulsante puede producir daños por golpe de ariete.
- **Rotativos:** Utiliza un mecanismo rotativo para comprimir el fluido a través de elementos giratorios. La espiral móvil gira alrededor de la fija creando cavidades de menor tamaño. Tienen mayor eficiencia energética que los alternativos. Actualmente existen modelos comerciales que emplean estos compresores en los que se alcanzan temperaturas de sumidero muy elevadas y se están investigando para su uso en BCAT [14].

Entre los distintos tipos de compresores rotativos los más usados en BCAT son los siguientes:

- **Compresor scroll:** Esta formado por dos coronas; una fija y una móvil dispuestas de manera concéntrica. Producen pocas vibraciones y ruidos, aunque su potencia está limitada. hasta 30 kW [32].
- **Compresores de Tornillo:** Emplean dos tornillos helicoidales engranados y es adecuado para funcionamiento continuo. Su desgaste es bajo, su estructura es compacta, su velocidad de giro mayor y su sistema de refrigeración puede ser por aire al producir menos calor [33].

3.3.1.1.2 Compresores dinámicos o turbocompresores

Su funcionamiento se basa en la aceleración molecular gracias a un elemento giratorio que transforma la carga de velocidad en presión. Son utilizados para altos caudales de gas y aportan un flujo continuo.

Pueden clasificarse en:

- **Centrífugos:** A través de un impulsor giratorio, transmite una fuerza de inercia de giro, desaceleración y aceleración al fluido comprimiéndole. Su funcionamiento se basa en la entrada

del gas por el centro impulsor acelerándose centrífugamente hacia su circunferencia. Este compresor se caracteriza por su gran eficacia comparado con otros compresores sin aceite y necesitar poco mantenimiento para largos periodos operativos. No obstante; su rendimiento se ve afectado por alta humedad, baja presión y temperatura. Este tipo de compresores se emplean para altos caudales e incrementos de presión moderados.

- Axiales: Puede constar de varias etapas cada una de ellas con rotor y un estator. Para este tipo de compresores alcanzar una elevada relación de compresión en una sola etapa encarece considerablemente el proceso a diferencia que en un compresor centrífugo. Cada rotor gira gracias a una turbina aspirando aire hacia el interior donde aumenta su velocidad debido a los alabes rotativos y se barre hacia la hilera de alabes cercanos al estator.

En la siguiente figura se muestra las distintas temperaturas que se pueden alcanzar en función del compresor empleado:

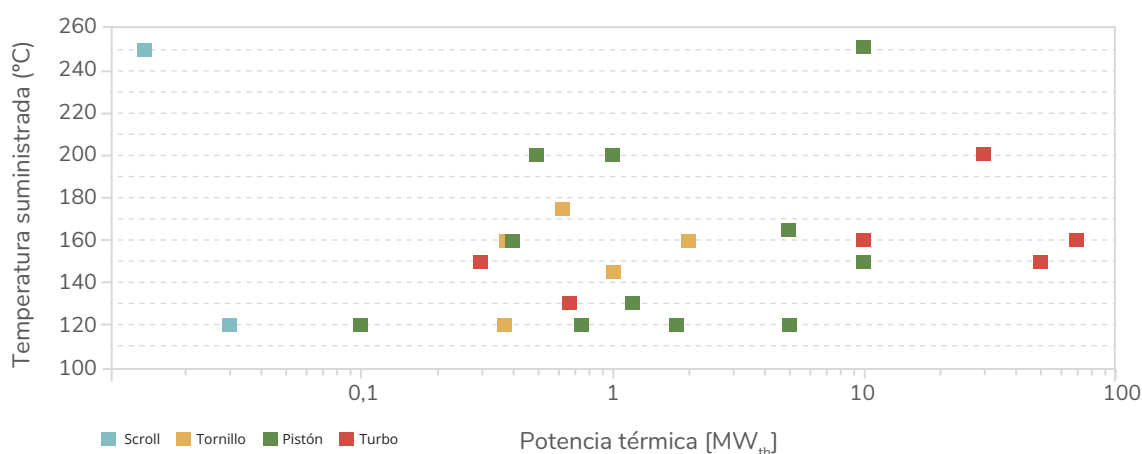


Figura 16: Representación de la temperatura de suministro de potencia térmica de distintos procesos con BCAT que emplean compresores [14].

Como puede observarse en la Figura 15, las máximas temperaturas se logran con compresores de tipo pistón y turbocompresores. Estos últimos son los que permiten mayores capacidades de potencia térmica. Los compresores scroll sólo se emplean para bajos requerimientos de potencia y temperatura mientras que los compresores de tornillos son adecuados para necesidades de potencia térmica y temperatura de sumidero medias. Hay que considerar que, altos incrementos de temperatura suelen requerir altos ratios de presión en los compresores reduciendo considerablemente la eficiencia [25]. En la siguiente tabla aparecen recogidas las principales características de los distintos tipos de compresores dinámicos y de desplazamiento positivo:

Tipo de compresor	Pistón	Scroll	Tornillo	Turbocompresor
Fuerza impulsora	Desplazamiento	Desplazamiento	Desplazamiento	Flujo de la máquina
Compresión	Estática	Estática	Estática	Dinámica
Producción	Pulsante	Continua	Continua	Continua
Flujo volumétrico	Hasta 1.000 m ³ /h	Hasta 500 m ³ /h	100-10.000 m ³ /h	100-50.000 m ³ /h
Capacidad calorífica	Hasta 800 kW	Hasta 400 kW	80 kW-8 MW	80 kW-40 MW
Ratio de compresión	Hasta 10	Hasta 10	Hasta 20	Hasta 5
Controlable a velocidad	Por etapas	Difícil	Continuamente	Continuamente
Control de velocidad	Posible	Posible	Posible	Posible
Sensibilidad a la	Alta	Baja	Baja	Baja
Vibraciones	Sí	No	No	No

Tabla 3: Características compresores BCAT [30].

3.3.1.1.3 Compresores térmicos

En esta categoría se encuentran los eyectores de vapor, caracterizados por carecer de piezas móviles. El vapor a una presión relativamente alta se expande por la boquilla transformándose dicha presión en energía en energía cinética. El chorro de vapor arrastra al gas que debe bombearse en el área de succión del eyector. Posteriormente en el difusor, la energía cinética de la mezcla se transforma en presión de descarga. Los eyectores se emplean para BCAT TVR y para sistemas de ciclo cerrado de compresión mecánica. Para este último caso, los eyectores permiten incrementar la presión de succión del compresor disminuyendo el trabajo de compresión, aumentando por tanto la eficacia del proceso. En la actualidad se está investigando su uso en BCAT para reducir las pérdidas por estrangulamiento y disminuir la relación de presión ya que con el eyector la presión de succión es mayor con la misma presión de evaporación [25].

3.3.1.2 Soplantes y ventiladores

Los soplantes son mecanismos que contienen aspas móviles para producir el movimiento de aire y aumentar así ligeramente la presión. Los ventiladores transfieren energía mecánica al fluido elevando su presión hasta 10 kPa. Al producir una variación tan pequeña de volumen específico se consideran máquinas hidráulicas. Los ventiladores permiten incrementos de presión aun menores que los soplantes. Al igual que los soplantes, se pueden clasificar en radiales y axiales. Los soplantes de lóbulo son muy utilizados para sistemas MVR de baja potencia y se basan en dos rotores que giran en direcciones opuestas dentro de una carcasa. Se caracteriza por bajas vibraciones y su diseño robusto.[32]. La Figura 16 muestra el uso de los distintos elementos de compresión en función del caudal y el incremento de temperatura necesario para un ciclo MVR:

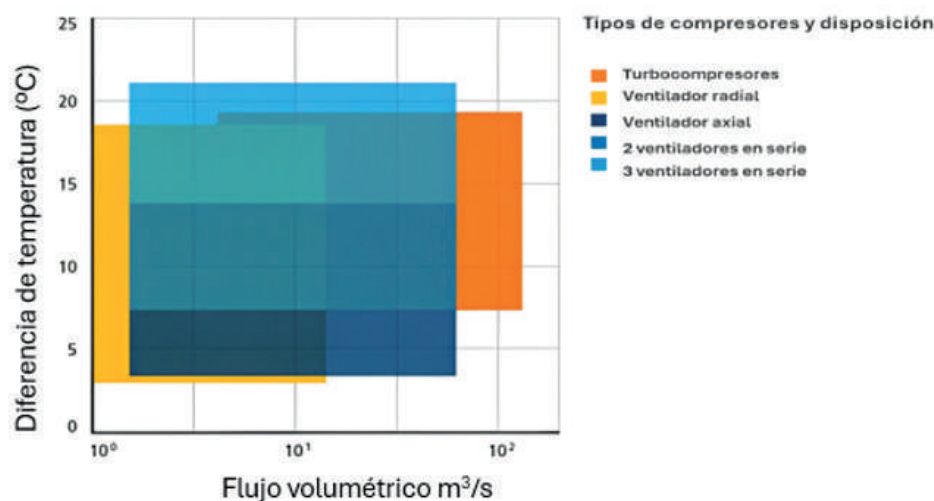


Figura 17: Clasificación del tipo de elemento de compresión necesario, en función del caudal y el incremento de temperatura necesario para un ciclo abierto MVR [32].

Como se evidencia en la Figura 16, los ventiladores rotatorios se prefieren para caudales moderados y altos incrementos de temperatura. Por otro lado, los ventiladores axiales o soplantes radiales son más apropiados para condiciones de temperatura bajas y caudales reducidos. Para incrementos de temperatura más elevados, se pueden emplear soplantes o múltiples ventiladores en serie. En caso de requerir caudales elevados y grandes incrementos de temperatura, se recurre a compresores axiales o centrífugos. Finalmente, para los mayores incrementos de temperatura se emplean compresores de pistón [1].

3.3.2 Evaporador

El evaporador es equipo en el que se transforma un fluido en estado líquido en gaseoso. Al ingresar al evaporador, el refrigerante se encuentra en un estado de baja presión y temperatura. La temperatura del fluido circundante al evaporador es inferior a la del espacio confinado del que se necesita extraer el calor. A medida que el refrigerante fluye a través del serpentín del evaporador, se produce una transferencia de calor desde el espacio confinado hacia el refrigerante.

Existen dos tipos de evaporadores, de expansión seca y evaporadores inundados:

3.3.2.1 Evaporador de expansión seca

En este tipo de evaporadores la corriente de salida se encuentra como vapor sobrecalentado. Su uso es frecuente en compresores sensibles a la humedad, como es el caso de los compresores centrífugos [34].

3.3.2.2 Evaporador inundado

A diferencia de los evaporadores de expansión seca, la corriente de salida de evaporador se encuentra como vapor saturado [34].

En la siguiente tabla se muestra una comparativa de las cualidades de ambos tipos de evaporadores:

	Evaporador expansión seca	Evaporador inundado
Ventajas	• Permite un control más preciso de la capacidad de enfriamiento, ya que el refrigerante se evapora completamente antes de ingresar al evaporador. • Al evitar la entrada de líquido en el compresor, se reduce el riesgo de daño por golpe de líquido. • Puede ser más eficiente energéticamente al optimizar la evaporación del refrigerante y minimizar las pérdidas de energía asociadas con la presencia de líquido no evaporado.	• Al mantener una cantidad constante de líquido en el evaporador, se logra una mayor estabilidad en la temperatura de evaporación. • La presencia constante de líquido ayuda a evitar el sobrecalentamiento del compresor, proporcionando una mayor protección contra condiciones adversas.
Desventajas	• Requiere un control más sofisticado y puede ser más complejo en comparación con sistemas inundados. • La instalación y configuración pueden ser más costosas debido a la necesidad de componentes adicionales para el control del refrigerante.	• Puede ser más difícil controlar la capacidad de enfriamiento precisamente por la presencia constante de líquido. • Existe un riesgo potencial de daño por golpe de líquido al compresor si el control del nivel de líquido no es adecuado. • En algunos casos, la eficiencia energética puede ser menor debido a la presencia constante de líquido en el evaporador.

Tabla 4: Ventajas y desventajas de los dos evaporadores secos y húmedos [35].

3.3.3 Condensador

Un condensador es un intercambiador de calor en el que el fluido de trabajo pasa de estado gaseoso a líquido, es decir, se condensa liberando calor latente. Gracias a este equipo se consigue elevar la temperatura de corriente deseada. Existen dos tipos de condensadores:

- **Condensador de aire o aerocondensador:** Utiliza aire atmosférico para enfriar el refrigerante de un sistema de refrigeración. Están formados por un haz de tubos de cobre aleteados, por los que circula el refrigerante, y si posee un ventilador que impulsa el aire a calentar entre las aletas del condensador, será de convección forzada (los más comunes). Poseen válvulas de purga y de seguridad. Son equipos pequeños y silenciosos adecuados para zonas con escasez de agua.
- **Condensador de agua:** Se emplea agua para condensar el refrigerante. Pueden ser condensadores de placas o intercambiadores de carcasa y tubos. En los condensadores de placas el fluido pasa a través de estas, las cuales están interconectadas, produciéndose la transferencia de calor. Su principal ventaja es su fácil mantenimiento. Los intercambiadores de carcasas y tubos están formados por tubos cilíndricos con el eje paralelo al eje de la carcasa cilíndrica. El intercambio de calor se produce entre el fluido que se encuentra dentro de los tubos y el fluido que circula al otro lado de la carcasa. Si el fluido que condensa se encuentra en el lado de la carcasa se denominan condensadores inundados [34].

Cuanto menor se la diferencia de temperaturas en las corrientes del condensador, así como en cualquier intercambiador de calor, mayor será la eficiencia del ciclo, aunque también aumentará la superficie de intercambiador necesaria y su coste.

3.3.4 Elementos de expansión

Tienen dos objetivos, pues regulan el flujo de fluido de trabajo que se dirige al evaporador y disminuye su presión. Existen tres tipos de dispositivos [34]:

- Tubo capilar: Destaca por su simpleza, bajo coste y carencia de partes móviles empero, una vez instalado no se puede regular el sistema ni modular las variaciones de carga. Además, se diseña para una capacidad concreta por lo que variaciones del caudal disminuye notablemente el rendimiento del sistema.
- Válvula de expansión a presión constante: Como su propio nombre indica, mantiene una presión constante a la salida. Consta de un diafragma, un muelle de control regulable y un sistema de aguja y asiento. Como presión de referencia, emplea la del evaporador. Cuando dicho valor se encuentra por debajo del punto de control, se abre dando paso al refrigerante. Si la presión del evaporador es mayor, la válvula se cierra, de tal manera que, siempre existe un equilibrio entre la presión del muelle y la del evaporador.

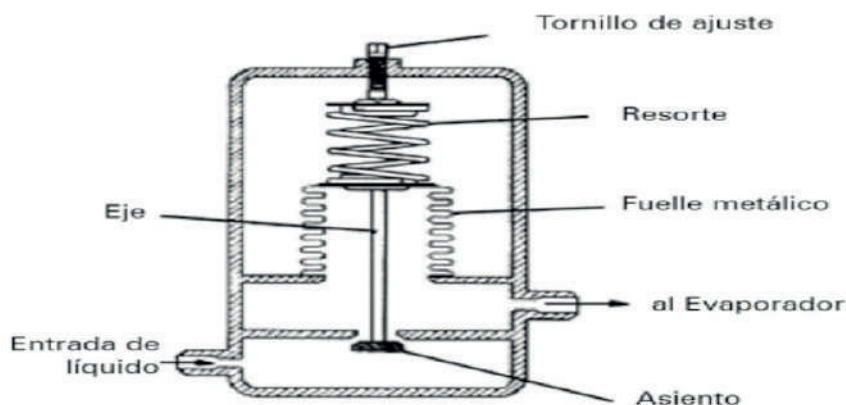


Figura 18: Válvula de expansión a presión constante [34].

- Válvula de expansión termostática: Es el elemento de expansión más empleado. Regula el caudal de fluido que entra al evaporador en función de la temperatura de la corriente de salida del evaporador. En caso de sistema que empleen compresores, proporciona una proporción a estos al mantener constante el grado de recalentamiento del gas a la salida del evaporado [34].

3.3.5 Absorbedor

Los equipos más corrientes de absorción son las torres rellenas y las columnas de platos, no obstante, son las primeras las que poseen menor caída de presión.

Para un correcto funcionamiento de las bombas de calor de absorción y la optimización del proceso a través del COP, se deben cumplir los siguientes términos:

- La superficie de interfaz entre el vapor y el absorbente debe ser lo mayor posible.

- La capa límite del absorbente debe refrigerarse constantemente.
- El calor de absorción debe retirarse al mismo tiempo que se produce.

Es frecuente que el tamaño del absorbedor sea mayor debido a la baja transferencia de energía y de masa de la mezcla. Por ello, se han propuesto distintas alternativas para mejorar ambas transferencias, ya sea aumentando el tamaño del absorbedor, la presión de vapor del refrigerante o mejorando la mezcla de los fluidos de trabajo.

Los absorbedores más empleados en bombas de calor de absorción son los absorbedores de película descendente y los adiabáticos. Con respecto a los absorbedores de película descendente, se han realizado diseños con discos de grafito impregnados de alquitrán que poseen una inclinación superficial y textura rugosa. Sus coeficientes de transferencia de calor suelen ser $723\text{-}1535\text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ [36].

Por otro lado, los absorbedores adiabáticos necesitan mayores temperaturas en el absorbedor lo que puede conseguirse incrementando la temperatura de la fuente o usando absorbedores de doble o triple etapa.

3.3.6 Adsorbedor

Este equipo es utilizado en las bombas de calor de adsorción. El diseño del lecho del adsorbedor es un factor determinante en la operatividad de la bomba de calor de adsorción ya que influye en la eficacia de la transferencia de masa y energía. Existen dos tipos de lechos:

- Lecho adsorbente sin recubrimiento: En este tipo se emplean adsorbedores sin tratar en forma de pellets, gránulos o fibras. El adsorbato se mueve a través de los pellets o gránulos siendo adsorbido por el adsorbente. Para mejorar la transferencia de energía pueden incluirse aletas o tubos de pared delgada, mientras que crear vacíos en el lecho ayuda a la transferencia de masa [36].

Lecho adsorbente con recubrimiento: En ellos el adsorbente se aplica alrededor de una aleta, tubo o espuma metálica. Se caracterizan por presentar mayor transferencia de masa y de energía que los lechos sin recubrimiento, por lo que su COP es también mayor. La transferencia de calor y masa se produce por difusión al no existir huecos en el adsorbente recubierto [37].

4. Fabricantes

En las siguientes tablas aparecen recogidas las distintas BCAT identificadas en el mercado, según la tecnología, y sus especificaciones técnicas principales:

BCAT MVR			
T(°C)	Q(MWth)	Fabricante	Refrigerante
150	0,5-100	Epcon	R718
160	1-5	Weel&Sandvling (modelo WS turbo steam)	R718
175	0,8	Kobelco	R718
230	>1	Piller	R718
280	15	Spilling	R718 o vapores de proceso

Tabla 5: Fabricantes BCAT MVR. Elaboración propia.

BCAT TVR			
T(°C)	Q(MWth)	Fabricante	Refrigerante
200	-	Gig Karasek	R718
240-350	-	Baelz	R718

Tabla 6: Fabricantes BCAT TVR. Elaboración propia.

BCAT compresión mecánica			
T(°C)	Q (MWth)	Fabricante	Refrigerante
90	5-20	Johnson Controls (Titan Om)	R134a
90	0,38-2,6	Star Refrigeration Neatpump	R717
95	0,6-3,6	Friotherm (Unitop 22)	R134ze(E)
110	0,051-2,2	Durr ThermeCO2 HHR1000	R744
120	30-70	Carrier	-
120	0,03	Fuji Electric	R245fa
120	0,1	Mayekawa mfg	R744
120	0,3-3	COMBITHERM	R1233zd, R1234ze(E)
120	0,37	Kobelco (modelo SGH 120)	R245fa o R134a
120	5	Johnson Controls	R717, R600
120	5	Hybrid Energy	R717/R718
120	0,17-0,75	Ochsner IWWDS ER3c4	R245fa/R134a
130	0,1-1,2	GEA	R744
130	0,17-0,75	Ochsner IWWDS R2R3b	R245fa
130	0,17-0,75	Ochsner IWWDS ER3b	R245fa
130	0,675	Mitsubishi Heavy Industries	R134a

BCAT compresión mecánica			
T(°C)	Q (MWth)	Fabricante	Refrigerante
140	0,12-	Rank	Refrigerante bajo GWP
140	20	AGO	R717/R718
140	2-15	Enertime	R1233zd(E) o R1336mzz(Z), R1224yd(Z)
150	10-50	MAN Energy Solutions	R744
160	8-70	Siemens Energy	R1233zd(E) o R1336mzz(Z) o R1224yd(Z)
160	0,6-3	AGO GmbH	R717/NH3
165	5	Sustainable Process Heat GmbH	R1233zd o R1336mzz(Z)
175	0,624	Kobelco (modelo SGH 165)	R134a o R245fa
200	1.5-6	Heaten	HFOs o HCs
200	2	Olvondo Technology AS	R704
200	30	Turboden S.P. A	Hidrocarburos y siloxanos
250	10	Enerin	R704

Tabla 7: Fabricantes BCAT compresión mecánica. Elaboración propia.

BCAT absorción tipo I			
T(°C)	Q(MWth)	Fabricante	Refrigerante
90	6,3-20	Johnson Control (modelo YHAP-C)	H2O/LiBr

Tabla 8: Fabricantes BCAT absorción tipo I. Elaboración propia.

BCAT absorción tipo II			
T(°C)	Q(MWth)	Fabricante	Refrigerante
95	1-10	Johnson Control	H2O/LiBr
165	42	Miscellaneous	H2O/LiBr

Tabla 9: Fabricantes BCAT absorción tipo II. Elaboración propia.

Bombas de adsorción			
T(°C)	Q(MWth)	Fabricante	Refrigerante
90	-	Nishiyodo	-
90	-	Mycom	-
250	>2	Qpinch	H3PO4

Tabla 10: Fabricantes BCAT adsorción. Elaboración propia.

4.1. BCAT MVR

Con respecto a los modelos comerciales MVR, Epcon ofrece una BCAT basada en ventiladores centrífugos de alta presión y soplantes de desplazamiento positivo para comprimir vapor consiguiendo una temperatura de descarga de 150 °C y un COP entre 5,5 y 13 [14]. Se caracteriza por no necesitar lubricación adicional y existen modelos de potencia térmica entre 0,5MWth y 100MWth.

Por otro lado, Weel&Sandving ha fabricado una BCAT que puede operar tanto en lazo abierto (MVR) como en lazo cerrado. Emplea un turbocompresor y agua (R718) como refrigerante en ambas opciones. La temperatura máxima que puede proporcionar se encuentra entre 145 y 160 °C en función de las condiciones de operación y suministra potencias de 1 a 5 MW_{th}. [38]. La máxima elevación de temperatura en el compresor es de 20-25 °C si se utiliza un sistema simple, incrementándose a 55 °C para turbocompresores de doble etapa. Para lazo abierto, esta bomba posee un COP de 13 para el turbocompresor de etapa simple y 5 para el compresor de doble etapa, con una temperatura de entrada al compresor de 100 °C en ambos casos [1]. Los cojinetes cerámicos se lubrican a través de un ciclo externo de por lo que no está en contacto el vapor con el lubricante [39].

La empresa Kobelco comercializa una BCAT con un compresor de tornillo para comprimir un vapor de temperatura de entrada de 110-120 °C alcanzando temperaturas de salida de 145-175 °C. Con el objetivo de limitar el impacto de altas temperaturas en el interior del compresor, se instala inyectores de agua de desobrecalentamiento. Además, contiene separadores de drenaje con el fin de eliminar gotas de agua [38].

La compañía Piller ofrece turbosoplantes radiales y compresores para comprimir vapor consiguiendo unas condiciones de descarga de 230 °C y 21 bar. El máximo incremento de temperatura por etapa es de 20 °C para caudales superiores a 57 t/h. Su potencia se encuentra entre 1 y 70 MW_{th}. Suele emplear agua como refrigerante (R718), aunque también puede utilizar gases como el etanol y el metanol [40].

Spilling Technologies ofrece un compresor modular de pistón de uno a seis cilindros con relación de compresión máxima de 3 por etapa e incrementos de hasta 100 °C por unidad. La temperatura del vapor succionado es de 120 °C, mientras que su temperatura de descarga es 280 °C. La potencia de este compresor puede ser de 1 a 15 MW_{th}. No emplea aceite con el objetivo de evitar la contaminación del vapor y su motor eléctrico asegura altas eficiencias para un factor de carga desde el 30 % al 100 % [41].

4.2. BCAT TVR

En este tipo de tecnología, según datos bibliográficos, el máximo incremento de temperatura que puede alcanzarse en la corriente de vapor saturado es de 10-20 °C por etapa [1]. La empresa Baelz comercializa BCAT que utilizan termocompresores para la circulación y compresión del vapor con presiones por encima de 40 bares. La máxima temperatura que se puede alcanzar son 240 °C, aunque si se emplea un enfriador adicional esta puede aumentarse hasta 350 °C. Otro fabricante de BCAT de TVR es Gig Karasek cuyas BCAT pueden utilizarse para vapores con presiones desde los 80mbar hasta los 6 bar y temperaturas de 200 °C [14]. El caudal mínimo y máximo de vapor para esta bomba de calor es de 5 y 150 t/h respectivamente.

4.3. BCAT sorción

Con respecto a las BCAT de absorción tipo I, como ya se ha comentado antes, generalmente no se alcanzan temperaturas superiores a 90-95 °C, a menos que se empleen múltiples etapas o en el caso de sistemas híbridos compresión absorción. Uno de los fabricantes que ofrece bombas de calor de absorción tipo I de etapa simple es Johnson Controls con su modelo YHAP-C [22]. Emplea una solución de amoníaco-agua y potencias desde los 6,3 MW_{th} a los 20 MW_{th} con un COP de 1,7. No se va a profundizar en este tipo de BCAT debido a las limitaciones de uso que tienen estas bombas de calor en la industria por su relativamente baja temperatura máxima de sumidero.

Las BCAT de absorción de tipo II de etapa simple suelen usar LiBr/H₂O como refrigerante, este es el caso de las BCAT de Johnson Control y Ebara Refrigeration Equipment & System Co [14].

Las bombas de calor de adsorción existentes, como las de los fabricantes Nishiyodo y Mycom, permiten operar a temperaturas de hasta 90 °C debido a las limitaciones de transferencia de calor y energía. Por ello, su COP suele ser bajo, entre 1 y 1,6 [42]. Sin embargo; la Empresa Qpinch ha desarrollado una BCAT de adsorción que consigue temperaturas de hasta 230 °C, aunque su COP es limitado al tratarse de un modelo tipo II. Se basa en un sistema fisicoquímico de adsorción que emplea ácido fosfórico como fluido de trabajo cuya potencia abarca desde 1 MW_{th} hasta 10 MW_{th} [42]. Comparado con las bombas de compresión, sólo se necesita una pequeña cantidad de energía eléctrica para operar, 25 kW por tonelada de fluido calentado. Para un salto de temperatura de 42 y 50 °C, el valor del COP asciende a 0,45 y 0,56 respectivamente. Su procedimiento se basa en calentar la solución para evaporar el agua, luego polimerizar u oligomerizar los componentes restantes y, finalmente, reintroducir el agua, lo que desencadena una reacción exotérmica de hidrólisis [43].

4.4. Bomba de calor de compresión mecánica

Por último, las BCAT de compresión mecánica se caracterizan por la gran variedad de modelos y fabricantes existentes en el mercado.

Dentro de las BCAT de esta tecnología de menor temperatura de sumidero máxima, se encuentran el modelo Titan Om de la empresa Johnson Controls con temperaturas máximas de hasta 90 °C usando un turbocompresor, el modelo Unitop 22 de la empresa Friothersm que utiliza un ciclo de doble etapa de R134ze(E) para lograr temperaturas de hasta 95 °C y la BCAT de Star Refrigeration Neatpump. Esta última se basa en un ciclo de compresión simple con un compresor de tornillos. Alcanza un COP y una temperatura de suministro de 5 (con un salto de temperatura de 30 °C) y 90 °C respectivamente [44].

La compañía Fuji Electric comercializa una BCAT para la creación de vapor a 120 °C. Su ciclo emplea un compresor alternativo cuyo refrigerante es R245fa. Se debe alimentar al ciclo agua entre 10-80 °C, la cual es precalentada y parcialmente evaporada en dos intercambiadores de calor independientes. A continuación, el vapor húmedo se lleva a un separador vapor-líquido con el fin de conseguir vapor saturado a 100-120 °C. Su potencia calorífica máxima ronda los 30 kW_{th} con un COP entre 2,5 y 3,5 [45][14].

Mayekawa mfg ha desarrollado el modelo Eco Sirocco que emplea como refrigerante CO₂ transcrito para obtener aire entre 60-120 °C con un caudal máximo de 8.500 m³/h y potencia térmica de 0,1 MW_{th}. Utiliza agua o salmuera como fuente de calor. Como elemento clave destaca su intercambiador

de calor interno para transferir calor entre las corrientes de salida del condensador y evaporador respectivamente. Gracias a ello se consiguen valores de COP entre 2,8 y 3,1. Este modelo utiliza un compresor de tornillos [46].

Mayekawa mfg también ofrece una BCAT de ciclo simple, llamada Eco Circuit 100, que permite obtener aire a 100 °C. Para ello emplea el refrigerante R1234ze(E). El compresor utilizado es alternativo con una potencia de 100 kW. La temperatura de deslizamiento del lado de la fuente de calor no debe ser superior a 10 °C para asegurar un correcto funcionamiento del sistema.

La empresa alemana COMBITHERM GmbH ofrece una BCAT que provee agua a 120 °C. Utiliza de uno a tres compresores de tornillo en función de la potencia térmica, que abarca de 0,3 MW_{th} (1 compresor y fuente de calor a 65 °C) a 3 MW_{th} (3 compresores y fuente de calor a 90 °C).

La empresa Kobelco, con su modelo SGH120, permite la obtención de vapor saturado entre 100-120 °C. Consta de un compresor de doble tornillo alcanzándose un incremento de 95 °C en él. El refrigerante utilizado es el R245fa. El agua aportada en el condensador, tras ser calentada en él, se lleva a una columna flash donde se obtiene vapor saturado a 20 °C. En el caso del modelo de Kobelco SGH 165, el procedimiento es idéntico a excepción de que a la salida de la columna flash se dispone de un compresor de tornillos para elevar la temperatura a 175 °C. En dicho modelo, se introduce agua en un tanque flash y el condensado se comprime para posteriormente calentarse en el condensador de la BCAT. Por último, se recircula de nuevo al tanque flash. El vapor obtenido del tanque flash se comprime en el compresor de tornillos. La potencia calorífica para el modelo SGH 120 ronda los 370 kW_{th} con un COP entre 1,6 y 3,5 [46]. En el caso de la BCAT SGH165, su potencia es de 624 kW y su COP de 2,5 [47].

La empresa Carrier ha desarrollado una bomba de calor de agua-agua (AquaForce) y otra de aire-agua (Aqua Snap) capaces de producir agua con una temperatura entre 82 °C y 120 °C y potencias térmicas entre de 30 hasta 70 kW [49].

Johnson Controls ofrece un modelo que opera en un ciclo en cascada con compresores alternativos para suministrar temperaturas de 120 °C en condiciones ambientes de entre -10 y 0 °C y con temperaturas de entrada de sumidero de 80 °C. Como refrigerante puede usar tanto el refrigerante R717 como el R600. Su capacidad térmica puede ser desde 0,5 MW_{th} hasta 5 MW_{th} [50].

Hybrid Energy comercializa una BCAT híbrida de absorción compresión que emplea como fluido de trabajo amoníaco-agua a proporciones iguales para lograr temperaturas entre 70 °C y 120 °C. El sistema auxiliar de compresión utiliza compresores alternativos para potencias térmicas entre 0,5 y 2 MW_{th} y compresores de tornillo para potencias entre 1-5 MW_{th}. Su COP oscila entre los 2,4 y 4,5 en función de la temperatura del agua de entrada al condensador [51].

La serie de bombas de calor de alta temperatura de COMBITHERM, lanzada al mercado en 2021, ofrece la posibilidad de alcanzar temperaturas de hasta 120 °C. Estas bombas de calor emplean de uno a tres compresores de tornillo tipo CSH2T de BITZER, equipados con convertidores de frecuencia, lo que permite una eficiencia óptima en cargas parciales y un control de capacidad continuo entre el 17 y el 100 %. Su capacidad de calefacción varía desde 0,3 MW (con un compresor y una fuente de calor a 35 °C) hasta 3,3 MW (con tres compresores y una fuente de calor a 90 °C).

Oschner cuenta con 3 modelos comerciales capaces de suministrar temperaturas de hasta 130 °C con sus modelos IWWDS R2R3b, ER3b, y ER3c4, los cuales utilizan compresores de tipo tornillo. El primer modelo se trata de un ciclo en cascada que opera con el refrigerante R134a en el lado de baja tempe-

ratura mientras que en la parte de alta presión utiliza el refrigerante R245fa. Los modelos ER3c4 y ER3b son ambos ciclos simples que trabajan con el refrigerante R245fa [44].

Mitsubishi Heavy Industries ha lanzado al mercado una BCAT para producir agua presurizada a 130 °C. Para las condiciones de diseño, la fuente de calor tiene una temperatura de 55 °C y 50 °C de entrada y salida respectivamente, mientras que la temperatura de entrada del corriente sumidero es de 70 °C. Esta BCAT emplea un compresor centrífugo de doble etapa y el refrigerante R134a. El rodete del compresor es de acero al carbono para limitar el deterioro y mejorar la eficiencia. Posee un intercambiador intermedio el cual recalienta el vapor que va a ser succionado en el compresor. Gracias a ello, se consigue reducir la presión de descarga del compresor manteniéndose elevada la temperatura de salida. El COP de este modelo es de 3 para la capacidad de carga diseñada, aunque disminuye a 2 para cargas del 40 % [52].

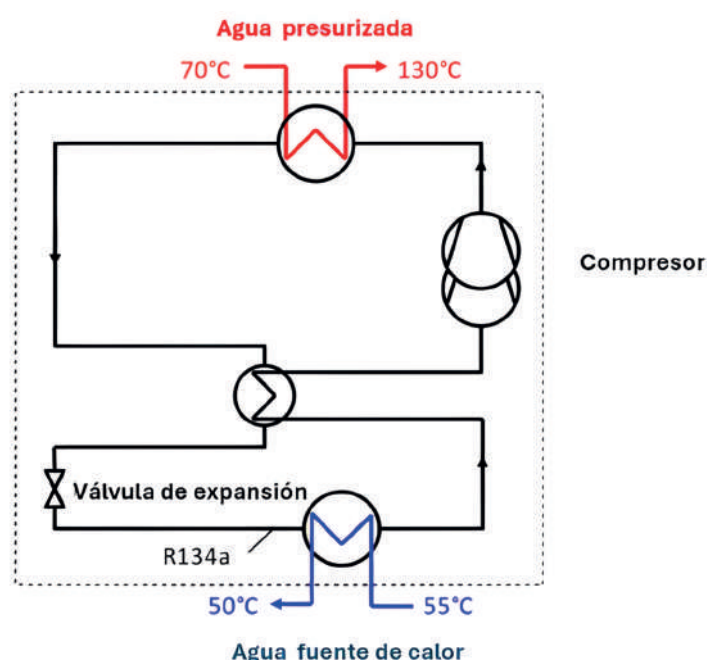


Figura 19: Ciclo bomba Mitsubishi [52].

La compañía GEA ha desarrollado una BCAT que puede usarse tanto en modo refrigeración como en modo calefacción, capaz de generar agua caliente con una temperatura de hasta 130 °C. La temperatura óptima de la corriente de agua a calentar debe ser entre 10 °C y 45 °C. Su funcionamiento se basa en un ciclo transcrito de CO₂ (R744) que utiliza múltiples compresores pistón semiherméticos alcanzándose COP de entre 2 y 3. Consta de un evaporador inundado con recipiente flash y uno o varios intercambiadores de calor como enfriadores de gas en función del salto de temperatura necesario [53].

La empresa AGO GmbH ha creado un modelo de BCAT híbrido de absorción/compresión que suministra temperaturas entre 130 °C y 160 °C utilizando una fuente de calor de -10-20 °C y una corriente de calor residual de 60 °C a 90 °C. Como fluido de trabajo utiliza una mezcla amoníaco-agua [54][55]. Enertime oferta una BCAT para generar agua caliente con temperaturas de salida de hasta 140 °C. Utiliza compresores herméticos centrífugos en el proceso y como refrigerantes pueden ser válidos el

R1336mzzz(Z), el R1224yd(Z) y el R1233zd(E). Su COP se encuentra entre 2,5 y 5 en función de las condiciones de operación [56].

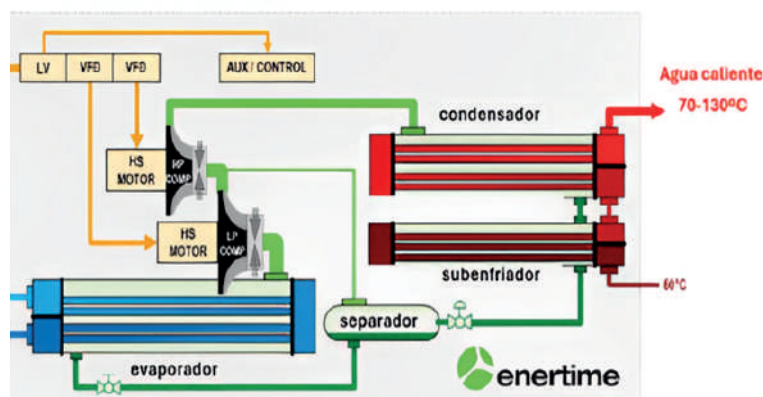


Figura 20: Enertime para producir agua caliente [56].

MAN Energy Solutions ofrece una BCAT de ciclo transcrito de CO_2 con capacidades de 10 a 50 MW_{th} . Puesto que se emplea CO_2 como refrigerante, la temperatura de la fuente no puede ser superior a 40 °C, aun así, se alcanzan temperaturas de 150 °C [57].

Siemens Energy comercializa un modelo de BCAT que puede proporcionar temperaturas de sumidero de hasta 160 °C, aunque hoy en día solo hay plantas que operan con este modelo a 90 °C y la planta piloto de Berlín para la red de calefacción que opera a 120 °C. Esta bomba de calor puede configurarse con un intercambiador interno, en cascada, sin depósito flash, etc. Puede emplear un turbocompresor de eje único o de tipo engranaje. Como fluido de trabajo utiliza el R1233zd(E) y/o el R1234ze(E) en función de la aplicación [58].

La empresa SPH (Sustainable Process Heat GmbH) comercializa una BCAT que puede suministrar temperaturas de hasta 165 °C en la actualidad, aunque se prevé que en un futuro lleguen a 200 °C. Este modelo proporciona potencias térmicas de 400 kW_{th} a 1 MW_{th} [30]. La temperatura de la fuente debe encontrarse entre 20 °C y 120 °C. Utiliza un compresor pistón de cuatro cilindros y como refrigerantes el R1233zd(Z) o el R1336mzz(Z). Esta BCAT puede ser tipo agua-agua o agua-vapor [45]. Si el sistema es de una sola etapa, se puede alcanzar incrementos de hasta 60 °C mientras que, con dos etapas se logran saltos de temperatura de 140 °C. El COP para el modelo agua-agua es de 2,9 para suministrar agua a 140 °C a partir de una fuente a 50 °C. El modelo de generación de vapor tiene un COP de 3,9 para producir vapor saturado a 134 °C y 3 bares a partir de una fuente a 85 °C [30].

Con respecto a la empresa Olvondo Technology AS, ofrece una BCAT de ciclo Stirling inverso que emplea helio como refrigerante (R704). Se pueden conseguir temperaturas de 200 °C para potencias de 500 kW_{th} , aunque se espera aumentar su capacidad térmica a 760 kW_{th} . La temperatura de la fuente debe estar entre el intervalo de 0 °C y 100 °C. El ciclo consta de compresores pistones de doble efecto con refrigerante en ambos lados [14]. Su COP oscila entre los 1,7 (temperatura de la fuente 36 °C, temperatura de suministro 183 °C) y 2,6 (temperatura de la fuente 90 °C, temperatura de sumidero 144 °C) [59].

Heaten comercializa una BCAT que permite producir agua o vapor hasta los 200 °C. El lado de la fuente se encuentra entre 2 °C y 150 °C, mientras que la temperatura de la corriente del lado sumidero es de

entre 70 °C y 200 °C. Su ciclo puede ser de una sola etapa, doble etapa o en cascada y en todo ellos se emplean compresores de flujo pistón de varios cilindros activado con un motor eléctrico. La potencia térmica se encuentra entre 1,5 MW_{th} (4-cilindros) y 6 MW_{th} (16-cilindros) para ciclos de una etapa, mientras que para un ciclo en cascada puede alcanzar un valor de 100 MW_{th}. En los ciclos de una sola etapa se produce un incremento de 80 °C, aunque pueden aumentar a 140 °C en el modelo de doble etapa. Si emplea como bomba agua-vapor se consigue un COP de hasta 1,85 para temperaturas de sumidero y de la fuente de 160 °C y 40 °C respectivamente [14]. En el caso de utilizarse el modo agua-agua, pueden lograrse un COP de 5 para una temperatura de salida del lado del sumidero de 120 °C [60][14].

El fabricante Turboden ha desarrollado una BCAT que consigue temperaturas de sumidero de 200 °C y potencias térmicas de 3 y 30 MW_{th} como límite inferior y superior respectivamente. Su modelo suele disponer un intercambiador de calor interno con el fin de mejorar la eficiencia y emplea turbocompresores customizados a partir de los cuales se consigue incrementar la temperatura 100 °C. Pueden utilizarse varios refrigerantes que sean HFO o silanos. Para la producción de vapor saturado a 150 °C a partir de una temperatura de entrada de la fuente de 95 °C, el COP es de 3,1 mientras que, para la obtención de agua caliente a 90 °C a partir de una fuente a 15 °C, el COP es de 2,75 [61].

La empresa Enerin comenzó a comercializar en 2023 una BCAT capaz de generar vapor a 250 °C y reducir un 50-70 % el consumo energético del proceso industrial gracias a su recuperación de calor secundario [62]. Se basa en un ciclo cerrado Stirling que utiliza como fluido de trabajo helio. El espacio del proceso cerrado de la bomba de calor está exento de aceite. La lubricación del cigüeñal del compresor y los sistemas asociados se realiza mediante aceite estándar para motores, con una bomba de aceite integrada. La transferencia de calor en los circuitos secundarios se da gracias al uso de agua y existe la posibilidad de la instalación de almacenamiento de energía. Se consigue un COP de 2,05 para una temperatura de entrada de la fuente de 85 °C enfriándose a 65 °C para calentar la corriente del lado sumidero a 212 °C. El salto de temperatura máximo posible es de 200 °C y la temperatura de deslizamiento (diferencia entre la temperatura de vapor saturado y la de líquido saturado a presión constante) en la parte caliente del circuito es de 5-40 °C, mientras que la temperatura de deslizamiento en la parte fría del circuito es de 5 a 25 °C [63] [64] [65].

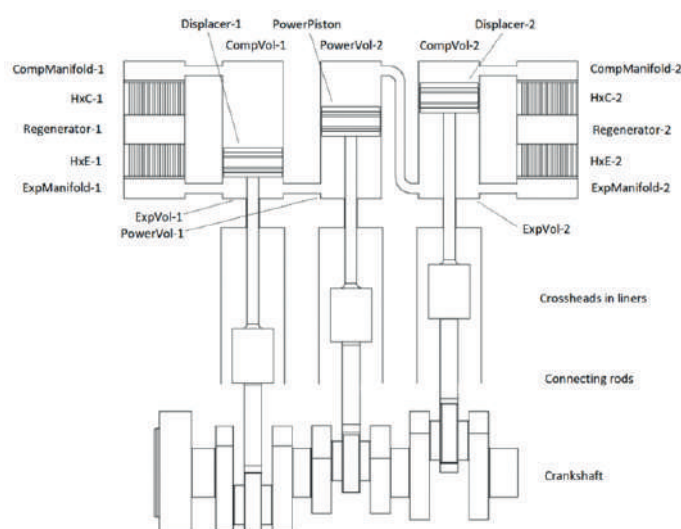


Figura 21: Esquema de funcionamiento de la BCAT de Enerin [64].

La empresa Rank ha lanzado al mercado un modelo de BCAT basado en un ciclo de compresión de vapor capaz de generar temperaturas máximas de suministro de 100-160 °C a partir de una temperatura de entrada de la fuente de 60-100 °C. Puede conseguirse un COP de 4. Produce potencias térmicas desde 120 a 2000 kW_{th}. Se caracteriza por usar un intercambiador de calor intermedio y un refrigerante de bajo GWP.

En la figura que aparece a continuación contiene los esquemas de principio de alguna de las BCAT comentadas en este apartado, así como información sobre su COP:

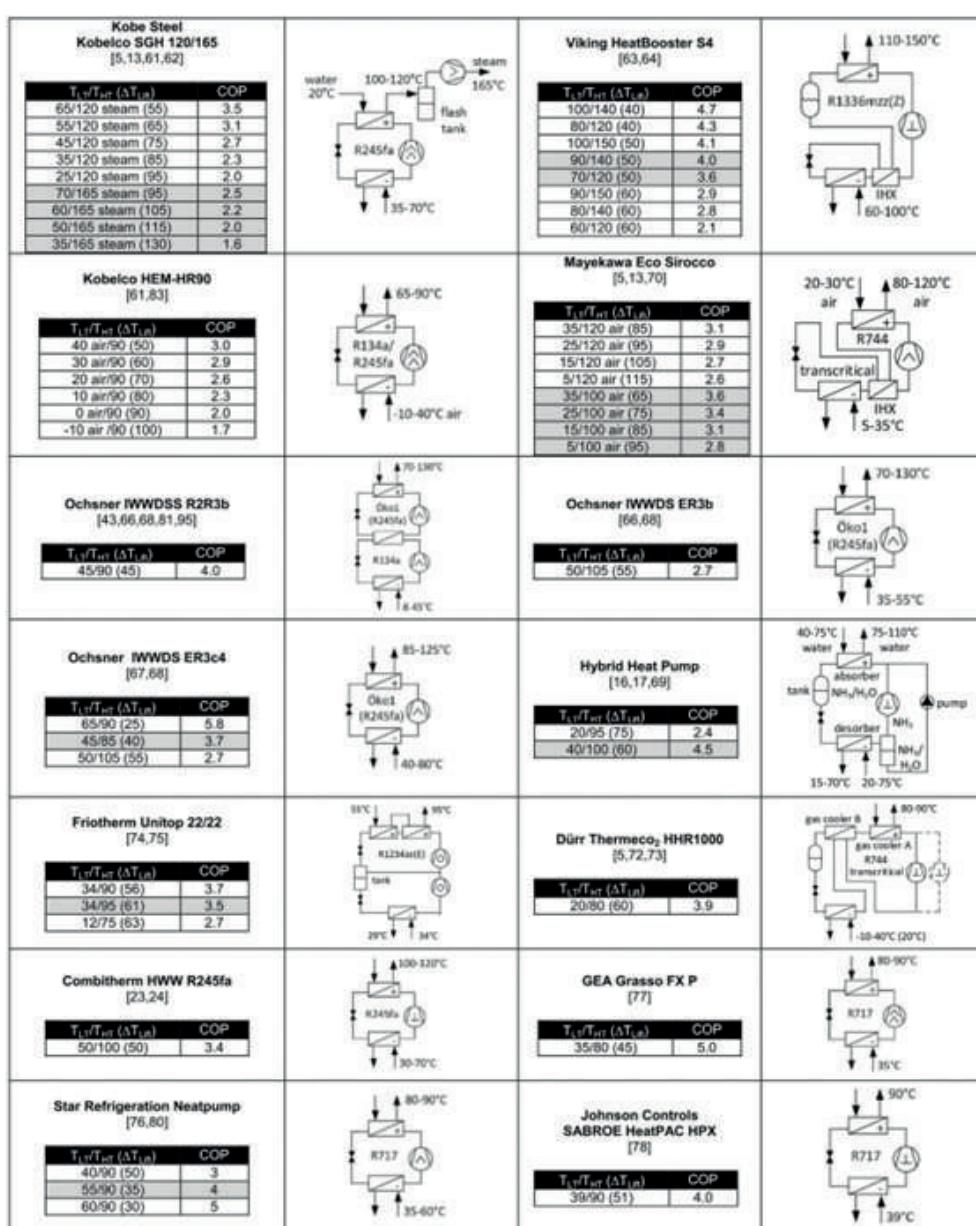


Figura 22: COP y ciclos de modelos comerciales de BCAT [44].

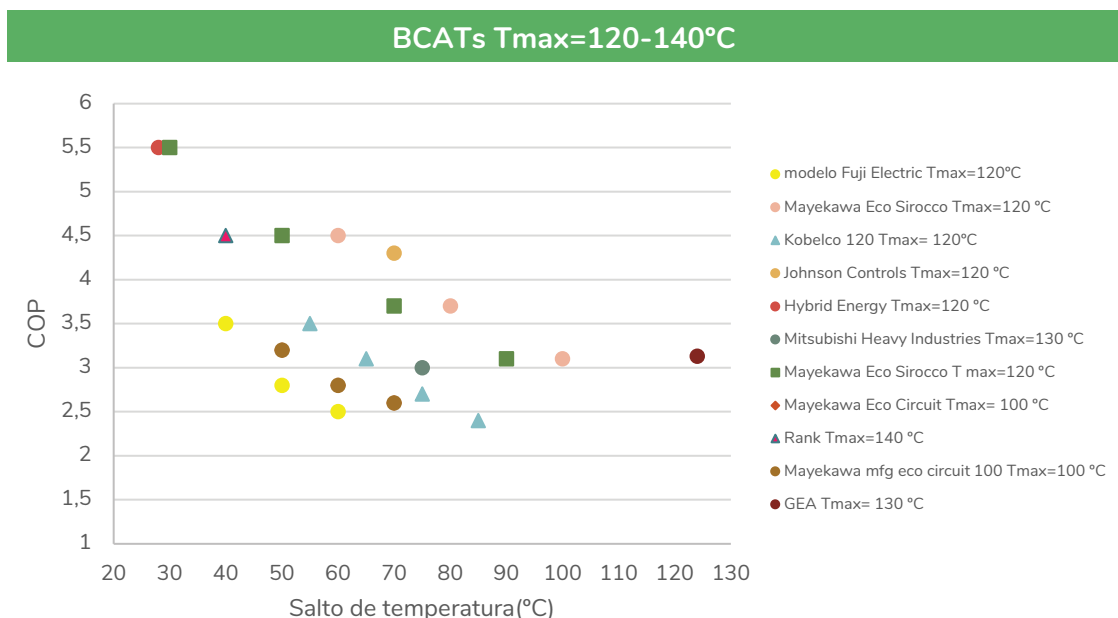


Figura 23: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 120 y 140 °C en función del salto de temperatura, Elaboración propia.

En la Figura 22 se ha representado los distintos COP que alcanzan las distintas BCAT de temperaturas máximas de sumidero entre 120 °C y 140 °C. La BCAT de Hybrid Energy es la que mayor COP consigue junto con el modelo de Mayekawa Eco Sirocco, aunque ambas para un valor pequeño de salto de temperatura. Por otro lado, el modelo de GEA presenta buenos resultados para un salto elevado de temperatura (115 °C), incluso alcanza COP más altos que las BCAT Eco Circuit de Mayekawa y la bomba de calor de Fuji, las cuales trabajan a saltos de temperatura notablemente menores.

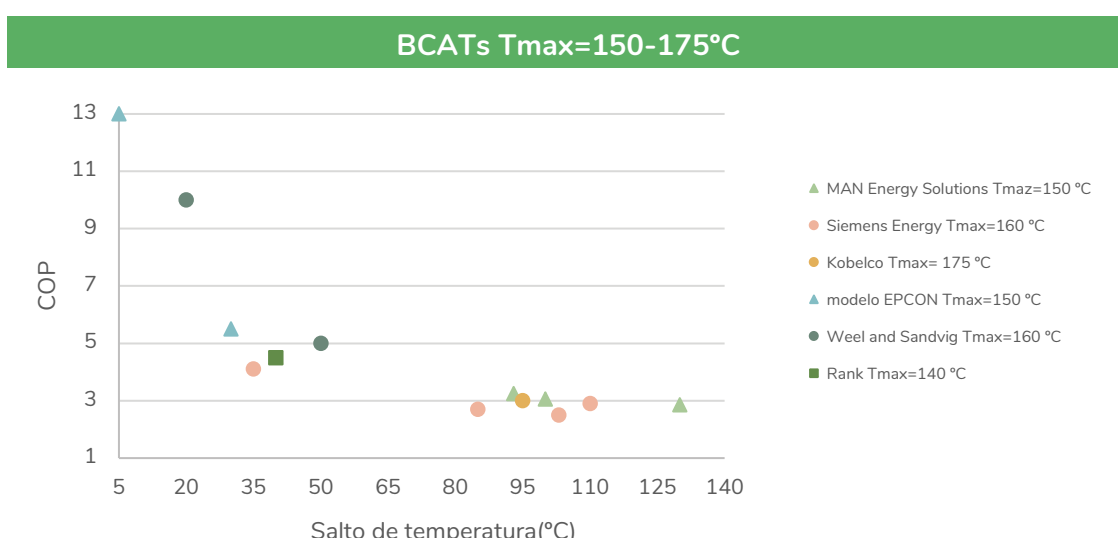


Figura 24: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 150 y 165 °C en función del salto de temperatura. Elaboración propia.

En la Figura 23 se presentan los diferentes valores de COP registrados de BCAT que logran alcanzar temperaturas máximas entre 150 °C y 175 °C. La tecnología MVR de Epcon sobresale al exhibir el mejor COP para diferencias de temperatura de 5 °C. No obstante; la BCAT de la misma tecnología desarrollada por la empresa Weel&Sandving muestra mejores COP para saltos de temperatura superiores comprendidos entre 20 °C y 50 °C. Por otra parte, las BCAT de Siemens Energy y SPH presentan comportamientos muy similares. La bomba de calor de MAN Energy destaca al alcanzar los valores más altos de COP para saltos de temperatura elevados.

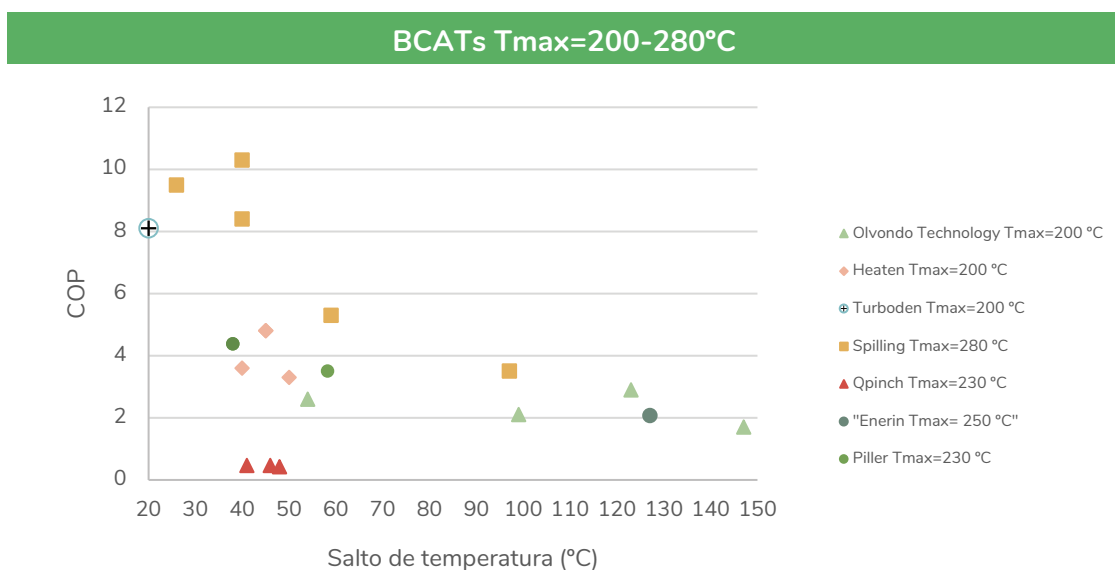


Figura 25: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 200 y 280 °C en función del salto de temperatura. Elaboración propia.

En la Figura 24 se muestran los distintos COP de las bombas de calor que generan las temperaturas más altas de sumidero. Destaca la BCAT MVR de la empresa Spilling, con mayor COP que los modelos de Olvondo, Piller y Heaten, que además de proporcionar la temperatura más elevada, posee el mejor COP en el rango de saltos de temperatura entre 25 °C y 100 °C. Por otro lado, la bomba de calor de Qpinch se distingue por tener un COP muy bajo y un pequeño salto de temperatura al tratarse de una BCAT de adsorción tipo II. Es importante mencionar que solo se disponen de datos de saltos de temperatura por encima de 100 °C para los modelos de ciclo Stirling inverso de Olvondo Technology y Enerin. Ambos presentan un valor de COP semejante a saltos de temperatura parecidos, pero, el modelo de Enerin permite alcanzar mayores temperaturas de sumidero.

En la siguiente figura aparecen representados la temperatura máxima de suministro de las distintas BCAT en función del fabricante y la potencia térmica que suministran. Cabe destacar que los modelos de toCircle, ECOP, Emerson y Fenagy aún no son comerciales. Dé ellos se hablará con más detalle en el apartado de I+D.

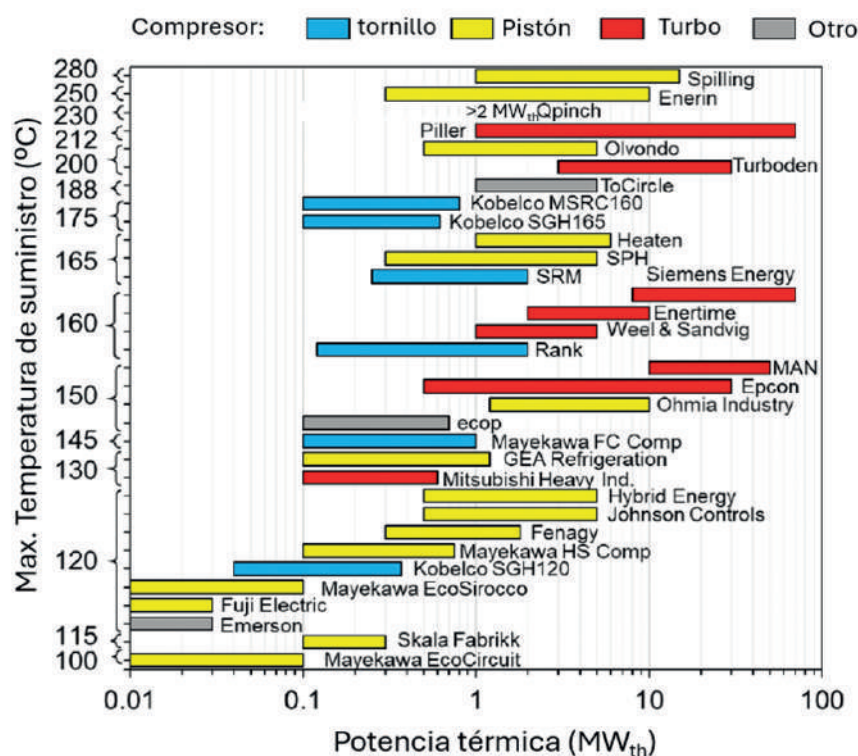


Figura 26: Representación de las temperaturas máximas de suministro y potencias térmicas de distintas BCAT [65].

A continuación, en la siguiente tabla se recoge la información geográfica de las empresas fabricantes de BCAT más relevantes mientras que, en la Figura 26 se ha localizado las principales sedes de los fabricantes de BCAT:

Sedes y mercados principales	
Fabricante	Lugares de sus sedes o mercados principales
Epcon	Empresa noruega que comercializa en Europa (España, Reino Unido, Francia, Italia, Portugal, Alemania, Países Bajos, Bélgica, Austria y Suiza), en América, en Asia y en el resto del mundo (Australia, Nueva Zelanda y Australia).
Weel&Sandvig	Comercializan en Europa, Medio Este y sur de Asia.
Kobelco	Sedes en Japón, China, Singapur, Tailandia, Malasia, Filipinas, Camboya, Vietnam, India, Indonesia, Estados Unidos, Noruega y Suiza.
Piller	Empresa alemana que comercializa a todos los continentes especialmente a Europa.
Spilling	Sedes en Brasil, Estados Unidos, Alemania, China, Singapur e India Comercializa en América, Europa y Asia.
Gig Karasek	Empresa austriaca que comercializa de forma global.
Baelz	Empresa alemana que comercializa principalmente en Estados unidos y Europa.
Johnson Controls	Compañía estadounidense con multitud de sedes alrededor del mundo, incluida España. Comercializa en América, África, Europa, Asia y Oceanía.
Friotherm	Empresa suiza que comercializa en Europa y en el sur de Asia.

Sedes y mercados principales	
Fabricante	Lugares de sus sedes o mercados principales
Fuji Electric	Empresa japonesa que comercializa mundialmente y tiene una sucursal en España.
Mayekawa mfg	Empresa multinacional de origen japonés. Comercializa por todo el mundo.
Hybrid Energy	Empresa de origen noruego adquirida por Johnson Controls que ofrece sus productos por Europa especialmente.
Mitsubishi Heavy Industries	Multinacional japonesa con gran presencia en el mercado asiático y europeo.
AGO	Empresa dirigida en Alemania que comercializa principalmente en Europa.
Enertime	Empresa Francesa que ofrece sus productos en Europa.
MAN Energy Solutions	Empresa de Reino Unido con multitud de sedes por el mundo, incluida España que comercializa mundialmente.
Siemens Energy	Empresa alemana que ha vendido sus productos a plantas en Suiza y Alemania. Comercializa mundialmente, aunque principalmente en Europa y América. Existe una sede en España.
Sustainable Process Heat GmbH	Empresa alemana que actúa principalmente en Europa. Tiene 20 instalaciones en Europa. 10 de ellas en Alemania, 2 en Austria y una respectivamente en Suiza, Francia, Italia y Países bajos.
Olvondo Technology AS	Empresa Noruega que comercializa en Europa principalmente. Única empresa, junto con Turboden y Enerin, en ofrecer una bomba de calor de compresión mecánica con temperatura de sumidero de 200 °C. Posee instalaciones en Europa (Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Países bajos y Francia), en América (Estados Unidos y Canadá), en Asia (China y Japón) y en Oceanía
Turboden S.P. A	Empresa de origen italiano perteneciente a Mitsubishi Heavy Industries. Comercializa mundialmente contando con más de 40 instalaciones en el mundo incluida España.
Qpinch	Empresa con sede en Dinamarca que comercializa principalmente en Europa.
Rank	Empresa española con sede principal en Cataluña con más de 10 años de experiencia en sistemas de revalorización energética de ciclo Rankine y bombas de calor.

Tabla 11: Fabricantes BCAT y su información sobre sedes y mercados principales. Elaboración propia.

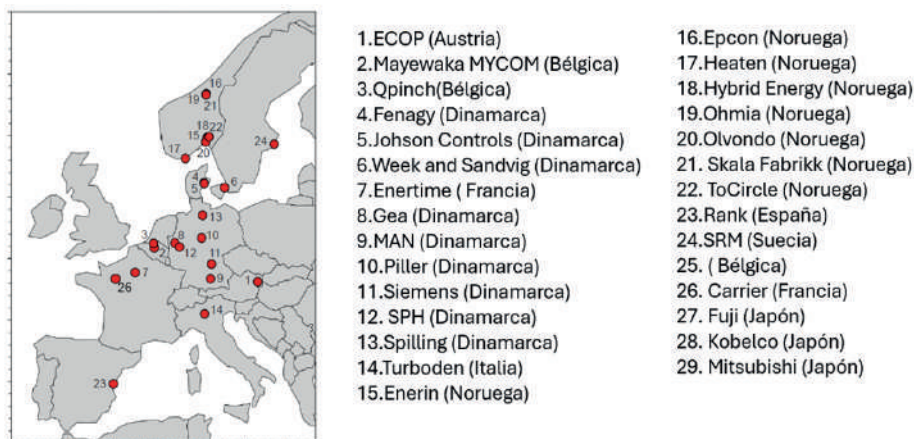


Figura 27: Sedes principales fabricantes de BCAT [30]

5. Refrigerantes

5.1. Criterios de selección

Debido a la creciente preocupación por el impacto medioambiental del uso de refrigerantes, se han sustituido los refrigerantes más contaminantes por otros más sostenibles. Los parámetros empleados para medir dicha sostenibilidad medioambiental son el potencial de destrucción de ozono (ODP) y el potencial de impacto invernal (GWP). En consecuencia, el GWP debe ser lo más bajo posible para garantizar su uso en el futuro en bombas de calor. Otros factores claves para la selección del refrigerante son la adaptación térmica, la eficiencia, seguridad, coste y su disponibilidad entre otros [44].

En cuanto a la adecuación térmica, el límite superior de temperatura de una bomba de calor que opera en un ciclo subcrítico está limitada por la temperatura crítica del refrigerante. Por ello, se debe mantener una diferencia de 10-15 °C de la temperatura de condensación deseada para asegurar un correcto funcionamiento en las BCAT. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre la temperatura de condensación y el punto crítico, mayor será el COP de la BCAT al liberarse mayor calor durante la condensación. Para las BCAT que operan en ciclos supercríticos o transcritos, el calor transmitido al sumidero y la temperatura de ebullición son considerables por los que son adecuados para procesos en los que sea necesario calentar agua. En los ciclos de bombas de calor, dependiendo de la temperatura de sumidero deseada, el punto de ebullición normal ronda los -45-25 °C, lo que puede producir infiltraciones de aire cuando la presión del refrigerante se encuentra por debajo de la atmosférica debido a periodos de inactividad o condiciones ambientales. Por dicho motivo, la presión en parada debe ser superior a la atmosférica para limitar la entrada de aire. Otro factor crucial para la adecuación térmica es que la presión crítica no sea muy elevada para evitar dañar los equipos e impedir el escape de refrigerante. Hace años la presión del ciclo no podía ser mayor a 25 bar, sin embargo, en la actualidad existen ciclos con presiones hasta 50 bares. Además, las relaciones de compresión deben ser lo más bajas posibles [44].

Por otro lado, la eficiencia del proceso se basa en altos COP a altos incrementos de temperaturas y mínimas necesidades de sobrecalentamiento.

En cuanto a la seguridad, el refrigerante debe ser lo menos inflamable y tóxico posible. La clasificación es terminada según el DIN EN 378-1 y ASHRAE. En la siguiente tabla se detalla las especificaciones de cada grado de seguridad:

Inflamabilidad	Alta inflamabilidad	A3	B3
	Baja	A2	B2
		A2L	B2L
	Nula	A1	B1
		Baja	Alta
		Toxicidad	

Tabla 12: Tabla clasificación de los refrigerantes según el grado de seguridad. Elaboración propia.

Con respecto a otras características de los refrigerantes que afectan al funcionamiento de las BCAT, destacan la viscosidad, la densidad, el calor específico y el calor latente [66]:

- Cuanto menor sea el peso molecular, más reducidas serán las pérdidas en la válvula mejorando la eficiencia.
- Altos valores de viscosidad incrementan las pérdidas en el evaporador y en el condensador disminuyendo la presión de succión en la entrada del compresor. La viscosidad aumenta la presión de descarga a la vez que disminuye el flujo másico de refrigerante. Por todo ello, los refrigerantes con grandes viscosidades producen disminuciones en la eficiencia del proceso.
- Menores densidades de vapor aumentan las pérdidas en los evaporadores y condensadores reduciendo la potencia del sistema.
- Elevados calores específicos y alto calor latente disminuyen el flujo molar de refrigerante necesario para alcanzar una determinada capacidad, así como el tamaño de los equipos.

Las tablas 13 y 14 muestran respectivamente los criterios de selección de los refrigerantes y las propiedades de estos.

Adecuación térmica	• Alta temperatura crítica. Diferencia de 10-15 °C entre la temperatura superior del ciclo subcrítico y la temperatura crítica del refrigerante. • Bajo ratio de presión.
Compatibilidad medioambiental	• Potencial de agotamiento de ozono (ODP)=0. • GWP bajo (debe ajustarse a futuros cambios normativos).
Seguridad	• Baja toxicidad. • Baja inflamabilidad.
Eficiencia	• Alto COP para elevados saltos de temperatura. • Mínimo recalentamiento para prevenir la presencia de líquido en la compresión. • Alta capacidad volumétrica.
Disponibilidad	• Bajo coste. • Fácil adquisición.
Otros	• Buena solubilidad en aceite. • Estabilidad térmica de la mezcla aceite-refrigerante. • Buenas propiedades lubricantes. • Alto calor latente (subcríticos) y calor específico. • Alta densidad de vapor.

Tabla 13: Criterios de selección refrigerantes [44],[67].

Tipo	Refrigerante	Fórmula química	T _{crítica} (°C)	P _{crítica} (ar)	ODP	GWP	GS	peso molecular (g/mol)
HFC	R365mfc	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	186,9	32,7	0	804	A2	148,1
	R245ca	CHF ₂ CF ₂ CH ₂ F	174,4	39,3	0	716	n. a	134
	R245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	154	36,5	0	858	B1	134
HFO	R1336mzz(Z)	CF ₃ CH=CHF ₃ (Z)	171,3	29	0	2	A1	164,1
	R1234ze(Z)	CF ₃ CH=CHF(Z)	150,1	35,3	0	<1	A2L	114
	R1336mzz(E)	CF ₃ CH=CHF ₃ (E)	137,7	31,5	0	18	A1	164,1
	R1234ze(E)	CF ₃ CH=CHF(E)	109,4	36,4	0	<1	A2L	114

Tipo	Refrigerante	Fórmula química	T _{crítica} (°C)	P _{crítica} (ar)	ODP	GWP	GS	peso molecular (g/mol)
HCFO	R1233zd(E)	CF ₃ CH=CHCl(E)	166,5	36,2	0,00 034	1	A2L	114
	R1224yd(Z)	CF ₃ CH=CHCl(Z)	155,5	33,3	0,00 012	<1	A1	130,5
HC	R601	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	196,6	33,7	0	5	A1	148,5
	R600	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	152	38	0	4	A3	72,2
	R600a	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	134,7	36,3	0	3	A3	58,1
CF ₆	Novec 649	CF ₃ CF ₂ C(O)CF(CF ₃) ₂	168,7	18,8	0	<1	n. a	316
Naturales	R718	H ₂ O	374	220	0	0	B2L	18
	R717	NH ₃	132,4	112,8	0	0	A1	15
	R744	CO ₂	31,06	73	0	1	A1	12

Tabla 14: Características de los refrigerantes [44]. Elaboración propia.

La selección del fluido de trabajo depende en gran medida de los niveles de temperatura de la bomba de calor. Por este motivo, las propiedades del fluido deben ajustarse adecuadamente a los requerimientos del proceso para maximizar la eficiencia. La Figura 27 presenta los rangos de temperatura en los que se aplican diferentes fluidos de trabajo. En ciclos subcríticos, el límite superior se establece según la temperatura crítica. Para un funcionamiento eficiente de la bomba de calor, la temperatura de condensación debería estar aproximadamente 15 K por debajo de la temperatura crítica.

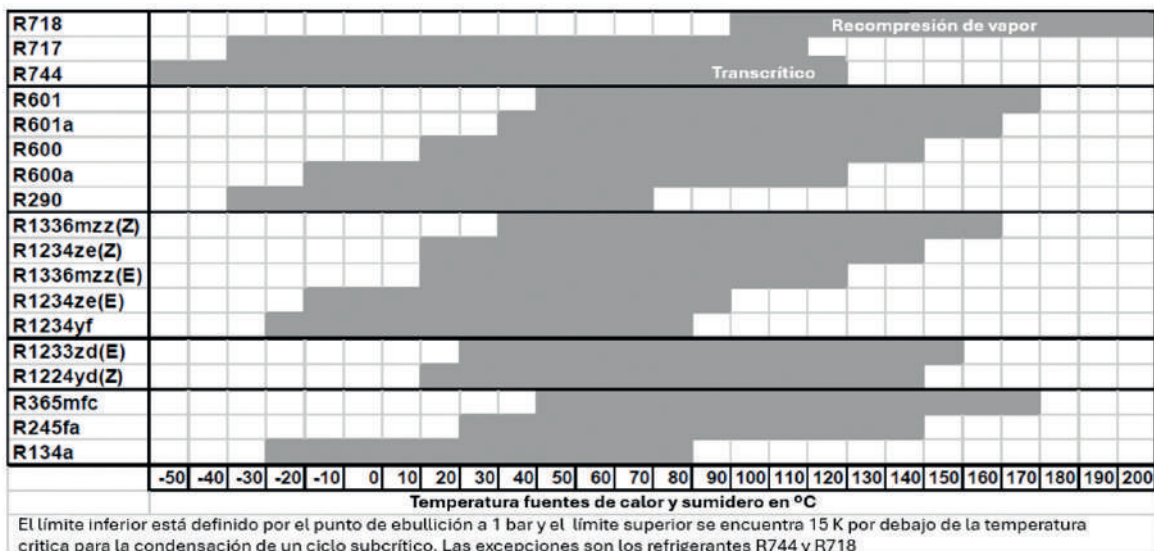


Figura 28: Temperaturas y rango de aplicación para distintos refrigerantes de BCAT [30].

Del análisis de la Figura 27 se concluye que los refrigerantes R290, R134a y R1234yf sólo pueden emplearse para temperaturas inferiores a 90 °C. El refrigerante R744, junto con el R600a y el R1334mzz(E), se emplean para temperaturas de hasta 120 °C. Para altos requerimientos de temperatura, deben emplearse el refrigerante R601, el R365 mfc y sistemas MVR que utilicen agua como refrigerante.

5.2. Clasificación de sus refrigerantes según su composición

Los refrigerantes empleados en BCAT son los hidrofluorocarbonos (HFCs), hidrofluoroolefinas (HFOs), Hidroclorofluorofluoroolefinas (HCFOs) y los refrigerantes naturales e hidrocarbonos (HCs).

5.2.1. Hidrofluorocarbonos (HFCs)

En esta categoría se encuentran los refrigerantes R245fa, R245ca, R356mfc y todos ellos se caracterizan por su elevado potencial de calentamiento climático (GWP). El refrigerante R245fa tiene una temperatura y presión críticas de 154,9 °C y 36,9 bar respectivamente. Con respecto a el R245ca y el R356mfc, sus temperaturas críticas son superiores, con un valor de 174,4 °C y 186,9 °C respectivamente, mientras que su presión crítica es de 39,3 bar para el R245ca y 32,7 bar para el R356mfc. El refrigerante R356mfc se caracteriza por su elevado GWP, cuyo valor es de 804 [22]. Solía juntarse con el refrigerante R227 creando una mezcla azeotrópica con el fin de reducir su inflamabilidad, aunque aumentaba notablemente su GWP (1110). Desde 2020 se prohibió usar el refrigerante R227 debido a su elevado impacto medioambiental. Con el nuevo Reglamento europeo 2024/573 sobre gases fluorados, se pretende la eliminación progresiva de los HFCs. Dicho Reglamento establece restricciones sobre el uso y comercialización de bombas de calor para la climatización y obtención de agua caliente [68].

5.2.2. Hidrofluoroolefinas (HFOs)

Estos refrigerantes destacan por su bajo GWP y surgieron como sustitutos para los HFCs. Los refrigerantes R1234yf y R1234ef sustituyen al R134a ya que tienen temperaturas y presiones críticas semejantes. Suelen emplearse para BCAT de compresión mecánica en la primera etapa de un ciclo en cascada. Los refrigerantes R1336mzz(Z), R1234ze pueden emplearse para sustituir a los refrigerantes R245fa y R136mfc. El refrigerante R1336mzz(Z) resalta por su elevada temperatura crítica (171,3 °C) y su baja presión crítica 29 bar. Además, se trata de un refrigerante no inflamable. Actualmente, se usa para BCAT de temperaturas de sumidero de hasta 160 °C, si bien es estable hasta temperaturas de 250 °C, por lo que puede emplearse en ciclos cerrados para producir vapor o aplicaciones de recuperación del calor residual. Suele usarse como lubricante en este refrigerante elastómeros con base polietileno (POE) ya que es miscible con él en un alto intervalo de temperaturas. La principal desventaja del refrigerante R1336mzz(Z) es su notable menor capacidad volumétrica calorífica al tener menor densidad, aunque esto se ha solventado con su isómero R1336mzz(E), el cual una capacidad volumétrica calorífica cercana al R245fa y una temperatura crítica de 137,7 °C [44]. Por otro lado, el refrigerante R1234ze tiene una temperatura y presión críticas de 150,1 y 35,3 bar respectivamente. Cabe destacar que este refrigerante presenta valores bajos de COP para saltos de temperatura medianos y pequeños [66].

5.2.3. Hidroclorofluorofluoroolefinas (HCFOs)

En esta categoría se encuentran los refrigerantes R1233zd(E) y el R1224yd(Z), cuyos GWP es cercano a 0. El R1233zd(E) se considera no tóxico ni inflamable y posee una temperatura y presiones críticas de 165 °C y 35,7 bar respectivamente. Como inconveniente destaca su baja presión de vapor (1,079 bar) a la que le corresponde una temperatura de saturación de 20 °C. Debido a esta temperatura de saturación, en ambientes con temperaturas inferiores a esta, se puede producir infiltraciones en el circuito de la BCAT. Otra desventaja de su uso es la decoloración del acero para temperaturas superiores a 250 °C. El refrigerante R1224yd(Z) tiene propiedades cercanas al R245fa y al R1233zd(E) y es compatible con la mayoría de los metales y plásticos, además de ser miscibles con POEs [67][69].

5.2.4. Refrigerantes naturales e hidrocarburos

Los refrigerantes naturales usados para BCAT de alta temperatura son el R717(NH₃), el R718 (H₂O) y el R744 (CO₂). Las ventajas del uso de agua como refrigerante son su gran calor latente y la posibilidad de operar a presiones por debajo de la atmosférica debido a su gran temperatura de saturación. Sin embargo; sus principales desventajas son la necesidad de usar elevados ratios de presión y altos volúmenes del compresor debido a la baja densidad del vapor. Por ese motivo, con el fin de limitar la temperatura de descarga, es necesario múltiples estados de compresión con enfriamientos intermedios. Para este refrigerante se utilizan grandes turbocompresores de alta velocidad de giro, alto caudal y baja relación de compresión [44].

Para el refrigerante R744 (CO₂) pueden emplearse compresores de menor tamaño consiguiendo temperaturas de sumidero de entre 90 °C y 120 °C en ciclos transcíticos. No obstante; debe cumplirse que la temperatura de entrada del sumidero no sea muy superior a la temperatura crítica del CO₂. Se emplea en BCAT para producir agua caliente y cuando se necesita altos saltos de temperatura. Un inconveniente del uso del refrigerante R744 es la necesidad de usar grandes temperaturas de descarga por la alta presión del ciclo aumentando las pérdidas de carga y perjudicando por tanto al COP. Con el objetivo de mejorar la eficiencia del ciclo, es conveniente emplear enfriadores de gas con gran resistencia a altas presiones para mejorar la transferencia de calor al incrementar la velocidad de flujo.

El refrigerante R717 (NH₃) tiene un gran coeficiente volumétrico y se utiliza para conseguir temperaturas por encima de 90 °C. Su uso para conseguir elevadas temperaturas está limitado debido al alto ratio de compresión necesario. Sus temperatura y presión críticas son 110 °C y 76 bar. Aunque es poco inflamable, su toxicidad es elevada por lo que se encuentra en la categoría B2L. Este refrigerante suele emplearse para BCAT de gran escala donde existe una gran diferencia entre la temperatura de entrada y de salida del corriente sumidero [66].

Con respecto a los refrigerantes de hidrocarburos, se utilizan el R290 (propano), el R600 (n-butano), el R600a (isobutano) y el R601 (pentano). Estos se caracterizan por su bajo GWP y ODP. El refrigerante R600 se emplea cuando no se necesitan muy altas temperaturas de sumideros en BCAT donde la temperatura de licuefacción está por encima de los 120 °C. Su principal desventaja es su alta inflamabilidad. Los refrigerantes de hidrocarburos son ampliamente empleados para BCAT en cascada. Esto se debe a su masa molecular más grande y su alta temperatura crítica [70].

En la actualidad se están desarrollando refrigerantes de mezclas de hidrocarburos ya que permiten ampliar el rango de trabajo y mejorar la eficiencia del proceso.

5.3. Propiedades termodinámicas

Una de las propiedades termodinámicas más relevantes de los refrigerantes es su presión de vapor pues, en general, cuanto menor sea la presión de vapor, mayores temperaturas de condensación podrán conseguirse sin sobrepasar los límites operacionales del compresor. En la siguiente figura se muestran los diagramas P-T, P-h y T-s de los refrigerantes que se emplean para las BCAT, es decir, aquellos que tienen temperaturas críticas superiores a 150 °C.

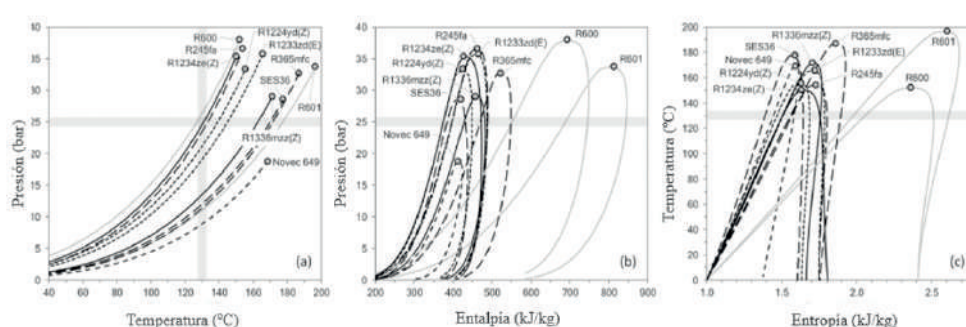


Figura 29: Diagramas P-T, P-h y T-s de los refrigerantes de las BCAT [44].

Como puede observarse en la Figura 28, el refrigerante con mayor presión de vapor es el R600 seguido de los refrigerantes R1234ze(Z), R245fa, R1224yd(z) y R1233zd(E), mientras que el refrigerante con menor presión de vapor es el Novec649 seguido de los refrigerantes R601, R354mfc, R1336mzz(Z). En los diagramas P-h y T-s de la Figura 28 se puede observar que las regiones bifásicas tienden a inclinarse hacia la derecha, por lo que es necesario un cierto grado de recalentamiento para evitar daños en el compresor. La temperatura mínima de recalentamiento depende del refrigerante usado, de la temperatura en el condensador, y de la eficiencia de este último, aunque suele encontrarse en el intervalo de 5-30 °C. En el caso del R600, el intervalo es entre 5 y 18 °C dependiendo de cómo de elevada sea la temperatura de condensación. Los refrigerantes R245fa y R1233zd(E) necesitan un grado de recalentamiento menor a 10 °C, condición que puede alcanzarse en un ciclo de una sola etapa de compresión. Por el contrario, el refrigerante R1336mzz(Z) necesita un grado de recalentamiento de 11 °C y, por tanto, no puede conseguirse en un evaporador de un ciclo de una etapa simple.

5.4. Análisis de temperaturas de sumidero, potencia térmica y COP en función del refrigerante empleado

En este apartado se desea estudiar a partir de modelos comerciales existentes de BCAT, cuáles son los refrigerantes con los que se puede alcanzar mayor temperatura de sumidero, así como la potencia térmica instalada, los saltos de temperatura y COP de distintos refrigerantes.

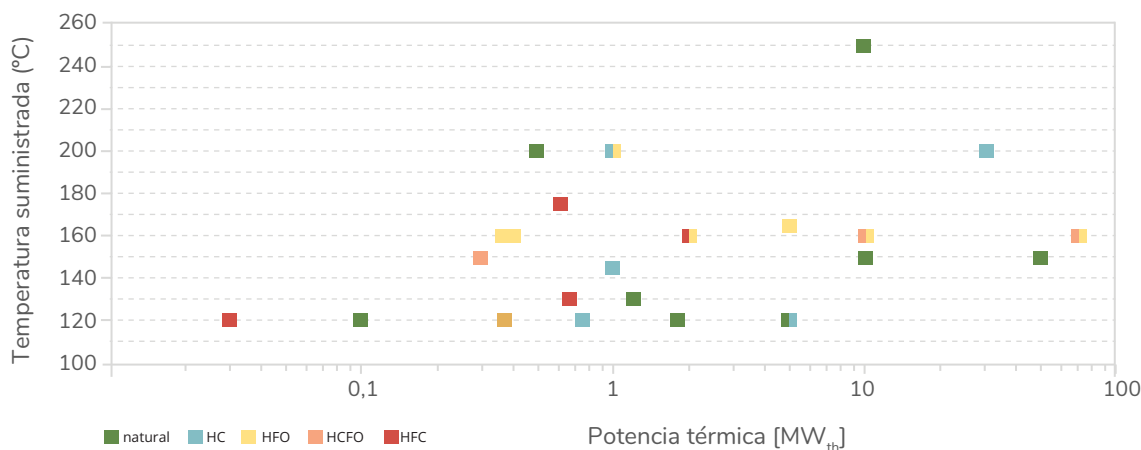


Figura 30: Representación de la temperatura de suministro y potencia térmica de diferentes BCAT en función del refrigerante empleado [14].

A pesar del gran impacto medioambiental, debido a su madurez y buenos resultados, los refrigerantes HFCs siguen siendo utilizados para modelos de baja y media potencia térmica con temperaturas de suministro muy variadas. Los refrigerantes HFO se usan en general para capacidades de potencia térmica medias o elevadas y temperaturas de suministro de 160 °C, aunque existe un modelo que puede alcanzar temperaturas de hasta 200 °C. En cuanto a los refrigerantes HCFOs, son empleados para potencias térmicas de 0,3 MW_{th} hasta los 70 MW_{th} (potencia máxima). La temperatura de suministro de este tipo de refrigerante ronda los 150 y 160 °C. Por último, con respecto a los refrigerantes naturales, existen 8 modelos de BCAT que pueden alcanzar temperaturas superiores a los 100 °C con potencias desde los 0,1 MW_{th} a los 50 MW_{th}. Este tipo de refrigerante es el que posee el modelo de BCAT con mayor temperatura de suministro, 250 °C.

Con el objetivo de estudiar con mayor exactitud el funcionamiento de las BCAT en función del refrigerante utilizado, se ha realizado una recopilación de datos de COP de distintas BCAT basándose en el refrigerante empleado y los saltos de temperatura fijados (ΔT_{lift}). A continuación, se muestra en una gráfica los resultados obtenidos:

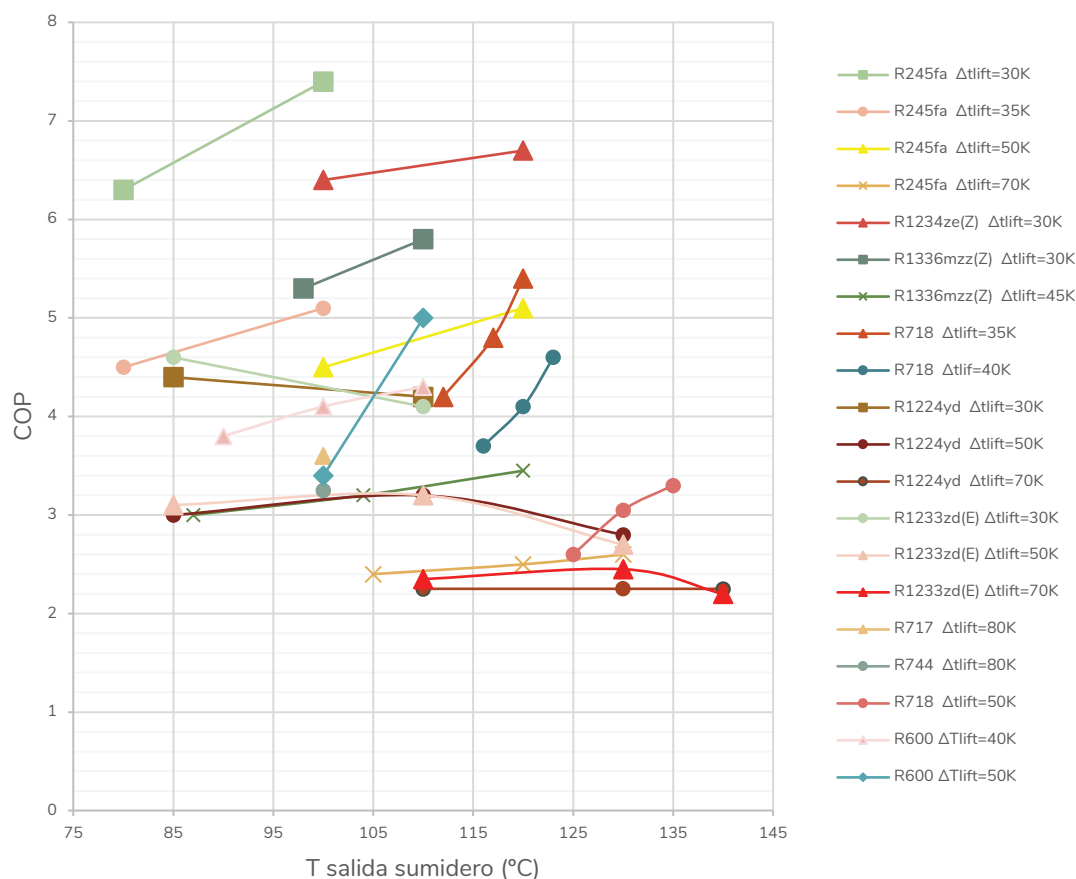


Figura 31: Representación de la variación del COP con la temperatura de salida para distintos saltos de temperatura y refrigerantes. Elaboración propia [44],[69],[70]. Elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 30, al incrementar la diferencia de temperatura entre la corriente de salida del sumidero y la corriente de entrada de la fuente (ΔT_{lift}), disminuye el COP para cualquier refrigerante. Esto se debe al aumento del ratio de presión, disminuyendo la eficiencia del compresor. Así mismo, la gráfica refleja que el refrigerante R245fa es el que mayores COP consigue para todos los saltos de temperatura. Con el uso de refrigerantes naturales también se alcanzan elevados rendimientos energéticos ya que sus COP son superiores a los de los refrigerantes R1224yd(E), R1233zd(E) y R1335mzz(Z) en los experimentos con igual o menor salto de temperatura. Los refrigerantes R1224yd y R1233zd(E) tienen curvas muy semejantes y son los que peores valores de COP alcanzan para distintos saltos de temperatura.

6. Eficiencia

Según la UNE-EN 14511 se define coeficiente de rendimiento (COP) como el ratio entre la potencia calorífica y la potencia útil absorbida del equipo. Cuanto mayor sea el valor del COP, más eficiente será la conversión de la energía motriz en calor útil. Por lo tanto, comprender y mejorar el COP es fundamental para maximizar la eficiencia energética, reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental de los sistemas de calefacción basados en bombas de calor.

En la siguiente tabla aparece recogidas las distintas ecuaciones utilizadas para el cálculo del COP para las distintas tecnologías de las BCAT, según el ciclo de Carnot, es decir, el máximo termodinámicamente posible:

MVR	TVR	Compresión de vapor	Absorción tipo II	Absorción tipo I y adsorción etapa simple
$COP = \frac{Q_{\text{útil}}}{P_{\text{eléctrica}}} \quad (1)$	$COP = \frac{Q_{\text{útil}}}{m_a \cdot h_a} \quad (2)$	$COP = \frac{Q_{CD}}{P_{\text{eléctrica}}} \quad (3)$	$COP = \frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{CD} + Q_{\text{gen}}} \quad (4)$	$COP = 1 + \frac{Q_o}{Q_2} \quad (5)$

Tabla 15: Ecuaciones para el cálculo del COP de las distintas BCAT [14],[71].

Donde $Q_{\text{útil}}$ es el calor útil del proceso, m_a la masa del vapor motriz, h_a su entalpía, Q_{CD} es el calor suministrado al corriente sumidero, P_e la potencia eléctrica consumida por los compresores, Q_{Abs} el calor producido en el absorbedor, Q_{gen} el calor absorbido en el generador, Q_o la fuente de calor de baja temperatura y Q_2 el calor de funcionamiento. En las tecnologías MVR y TVR la definición de calor útil depende de la aplicación individual. No obstante, en la mayoría de los casos se considera el calor de condensación y el calor sensible empleado para el subenfriamiento [14].

6.1 Ciclos teóricos de Lorenz y de Carnot

El ciclo ideal de Carnot representa el rendimiento teórico más alto a temperaturas constantes de fuente de calor y sumidero para las BCAT de compresión de vapor, aunque también puede obtenerse el equivalente teórico del ciclo de Carnot para las bombas de calor de sorción. Por otro lado, el ciclo de Lorenz representa el límite teórico considerando un deslizamiento de temperatura en los lados de la fuente de calor y el sumidero (temperaturas medias logarítmicas), equivalente a un ciclo de Carnot de múltiples etapas infinitas. El deslizamiento de temperatura de la fuente de calor y el sumidero puede variar significativamente según la aplicación industrial. Por ejemplo, los procesos de secado y generación de vapor se asemejan más al ciclo de Carnot, mientras que otras aplicaciones como las redes de alta temperatura tienen deslizamientos de temperatura más altos, por lo que el COP de Lorenz es más apropiado.

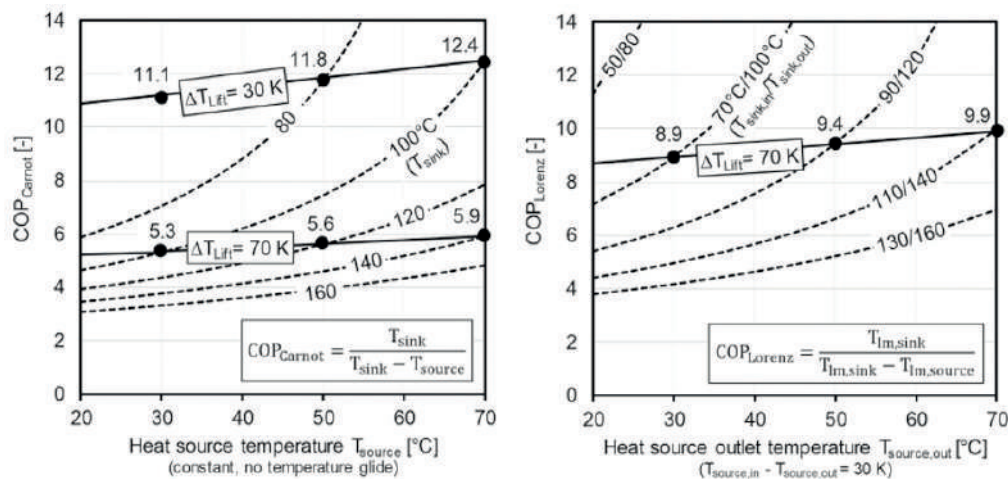


Figura 32: Siendo el COP de Carnot (izquierda) y el COP de Lorenz (derecha) función de las temperaturas de la fuente de calor y el sumidero de calor. Los valores marcados corresponden al mismo aumento de temperatura de 70 K y 30 K, ilustrando un aumento casi lineal en el COP con la temperatura de la fuente de calor. El cálculo del COP de Lorenz asume un deslizamiento de temperatura de 30 K en los lados de la fuente de calor y el sumidero de calor [44].

La Figura 31 compara los valores alcanzables de COP de Carnot y COP de Lorenz como función de las temperaturas de la fuente de calor y el sumidero. El cálculo del COP de Lorenz asume un deslizamiento de temperatura de 30 K en los lados de la fuente y el sumidero. Para una temperatura constante del sumidero de calor, se logra un COP de calefacción más alto con una temperatura de fuente de calor más elevada, es decir, con un menor salto de temperatura. Por otro lado, para un salto de temperatura constante la temperatura del sumidero de calor produce tan solo un ligero aumento del valor del COP, en comparación con la disminución del salto de temperatura, en especial para saltos de temperatura superiores a 50 K.

Ciclo de Carnot

El ciclo de Carnot se basa en:

- Proceso 1-2: Compresión isentrópica (adiabática y reversible).
- Proceso 2-3: Transformación isoterma, una expulsión de calor a temperatura constante.
- Proceso 3-4: Expansión isentrópica.
- Proceso 4-1: Transformación isoterma, absorción de calor.

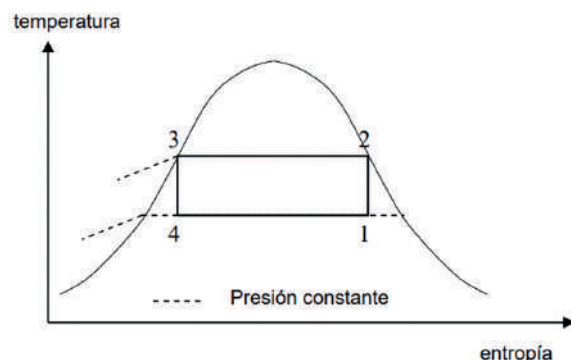
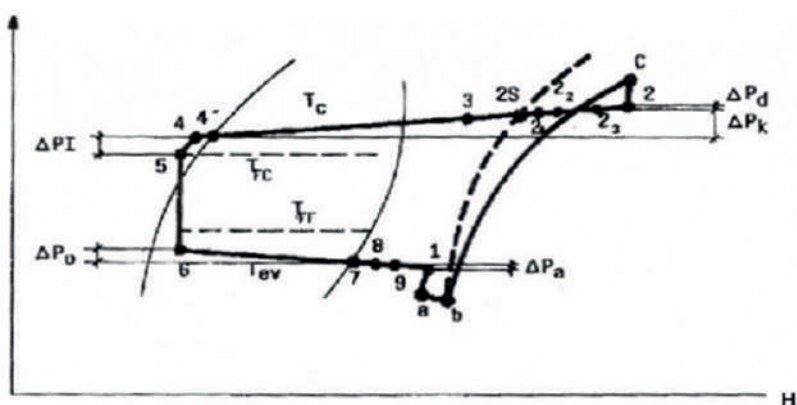


Figura 33: Diagrama T-s ciclo de Carnot ideal [27].

Estos cuatro procesos que componen el ciclo de Carnot son termodinámicamente reversibles. La absorción de calor se lleva a cabo a través de un evaporador y la expulsión de calor al exterior se realiza a través del condensador.

Al ser los cuatro procesos que lo integran reversibles, la eficiencia de este ciclo es más alta que la que se encuentra en su proceso real. El ciclo real difiere al teórico ya sea por:

- Las temperaturas de evaporación y condensación no coinciden con las de los focos frío y caliente. En los procesos reales de transferencia de calor, es necesario que exista una diferencia de temperaturas entre los dos medios que están intercambiando calor. Esto significa que la temperatura del foco frío debe ser algo mayor que la temperatura de evaporación, y la temperatura de condensación debe ser algo mayor que la corriente de salida del sumidero.
- La expansión no es isentrópica y reversible, sino isoentálpica irreversible por lo que debe emplearse una válvula en vez de una turbina. Esto es debido a que el trabajo obtenido es pequeño en comparación al necesario para mover el compresor.
- La compresión no puede darse en zona bifásica como ocurre en el ciclo teórico, pues la presencia de gotas dañaría el compresor. Además, la compresión real no es isentrópica.
- Procesos de recalentamiento a la salida del evaporador para evitar la presencia de gotas en el compresor y subenfriamiento del líquido a la salida del condensador para aumentar la potencia térmica por masa de refrigerante.
- Pérdidas de carga y térmicas en tuberías y en los distintos equipos del ciclo.



1-a: Pérdida de carga en la válvula de aspiración del compresor.	6-8: Evolución en el condensador.
a-b: Calentamiento debido a la transmisión de calor desde el cilindro	7-8: Sobrecalentamiento útil en el evaporador.
b-c: Compresión real no isentrópica.	8-9: sobrecalentamiento en la línea de aspiración.
c-2: Pérdida de carga en válvula la de escape del compresor.	ΔP : Pérdida de carga en el condensador.
2-3: Enfriamiento y pérdida de carga en tuberías de descarga.	ΔP_o : Pérdida de carga en el evaporador.
3-4: Evolución den el condensador con su pérdida de carga	ΔP_a : Pérdida de carga en tuberías de aspiración.
4-4': Subenfriamiento en el condensador.	ΔP_d : Pérdida de carga en tuberías de descarga.
4-5: Transferencia de calor y pérdida de carga en tuberías.	ΔP_l : Pérdida de carga en tuberías de líquido.
5-6: Expansión isoentálpica en la válvula	

Figura 34: Diagrama P-H real [27].

6.2 Configuraciones de ciclos y su influencia en el COP

A continuación, se introducirán distintas estrategias de configuraciones de ciclos cerrados en bombas de calor con el objetivo de analizar su eficiencia y funcionamiento.

6.2.1 Eyectores

El uso de eyectores permite recuperar parte de la energía de expansión. Se utilizan junto con tanques flash mezclando fluidos de alta presión con baja presión para crear una corriente de presión intermedia. Su funcionamiento se basa en tres etapas: etapa de boquilla, etapa de mezcla y etapa de difusión. El refrigerante entra en la boquilla transformando energía hidráulica en cinética y el vapor acelerado arrastra al refrigerante de baja presión. En la etapa de difusión, la velocidad de la mezcla se reduce alcanzándose una presión intermedia. La corriente de salida se dirige a un tanque flash donde se separa las fases líquidas y de vapor del refrigerante, de manera que el vapor se envía al compresor y el líquido se expande antes de pasar al evaporador. Con el uso de un eyector se consigue aumentar la presión de succión del compresor con la misma temperatura de evaporación. Se disminuye por tanto las pérdidas por estrangulamiento y la relación de compresión aumentando el COP. Las características de los eyectores están estrechamente ligadas a los volúmenes de flujo y las presiones. Pequeñas desviaciones en estas variables con respecto a los valores de diseño pueden provocar una disminución significativa en el rendimiento de los eyectores. Para abordar parcialmente este problema en situaciones de carga térmica variable, se ha propuesto el uso de múltiples eyectores trabajando en paralelo, ajustándose la carga térmica. Esta estrategia permite mantener los flujos de manera óptima a través de cada eyector, minimizando así los efectos negativos. La mayor relación de compresión de un ciclo de alta temperatura naturalmente conduciría a un mejor rendimiento de los eyectores en BCAT [25]. Zhou et al. ha desarrollado un ciclo con eyección de vapor que permite obtener una temperatura de sumidero de 130 °C con un COP de 2,52 a partir de una fuente de calor a 74 °C.

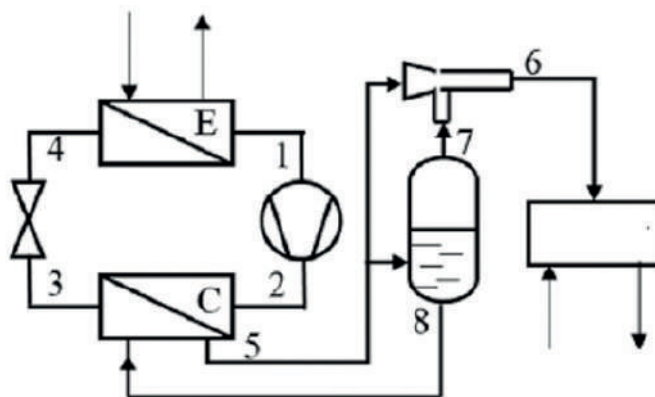


Figura 35: ciclo subcrítico con eyección y separador flash [72].

6.2.2 Subenfriadores externos

Los subenfriadores que utilizan un disipador de calor externo reducen el gas flash por estrangulamiento y el caudal de calor para una misma transferencia de calor. Para un modelo de BCAT de compresión de etapa simple que usaba como con temperatura de sumidero de 97 °C y un salto de temperatura de 26,8 se alcanzó un COP de 2 [25].

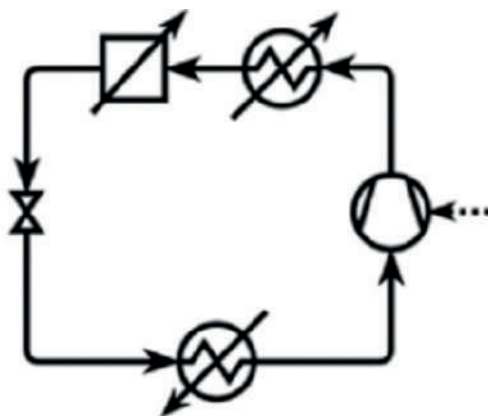


Figura 36.Ciclo cerrado con subenfriador [25].

6.2.3 Intercambiador de calor intermedio

Es común en ciclos de etapa simple, como en ciclos cascada, usar un intercambiador de calor intermedio. La localización más común del intercambiador de calor interno es entre la salida del condensador/enfriador de aire y la salida del evaporador. En él la corriente de salida del condensador transfiere calor a la corriente de salida del evaporador. Al aumentar la temperatura de succión del compresor, se incrementa la temperatura de descarga del compresor y por ende la temperatura de

la corriente de salida de sumidero, a expensas de un trabajo de compresión mayor. Además, emplear un intercambiador de calor interno permite disminuir el ratio de presión óptimo y aumentar el COP alrededor de un 12 % en ciclos transcríticos. Para una configuración de un ciclo transcrítico con un intercambiador de calor intermedio entre dos enfriadores de gas y un segundo intercambiador de calor a la salida del segundo enfriador de gas, se consiguió un COP de 7,9 con temperaturas de sumidero de 100 °C. En otro estudio, para un ciclo subcrítico de etapa simple con intercambiador de calor intermedio, se han conseguido temperaturas de sumidero de 140 °C con un COP de 3,2 y una fuente de calor de 80 °C [72].

Con el fin de optimizar el funcionamiento del intercambiador de calor interno pueden manipularse los parámetros de calor transferido, la posición, el área del intercambiador, efectividad de éste y la diferencia media de temperaturas en el intercambiador.

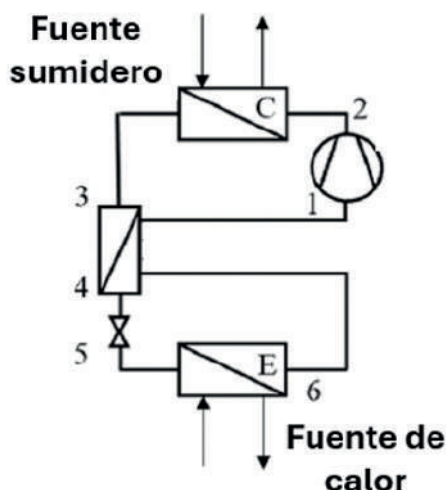


Figura 37: Ciclo cerrado con intercambiador de calor intermedio [57].

6.2.4 Economizador interno, compresión paralela y compresión múltiple

Los economizadores internos actúan como subenfriadores a partir de expansiones multietapa. Este equipo puede aumentar el COP y suelen usarse en ciclos multietapa. En un ciclo con economizador, se expande una corriente de refrigerante después del condensador en una válvula a presión intermedia. De esta manera, la temperatura de la corriente disminuye evaporándose parcialmente. Si se emplea un economizador cerrado, en el intercambiador de calor se junta la corriente de alta presión con la de presión intermedia evaporando totalmente la corriente intermedia. Posteriormente la corriente de salida del economizador cerrado se lleva a la etapa de compresión. Si el economizador es abierto, la corriente de presión intermedia se lleva a un separador flash donde el refrigerante en estado vapor a presión intermedia se deriva al compresor y el refrigerante líquido se expande de nuevo. Los economizadores se utilizan para inyectar total o parcialmente vapor y con ello mejorar la eficiencia durante la compresión. En la siguiente tabla se recogen diferentes configuraciones de ciclos con economizadores y los COP obtenidos.

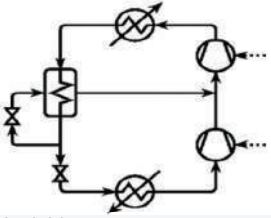
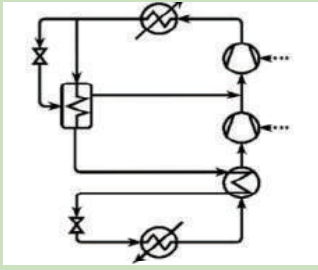
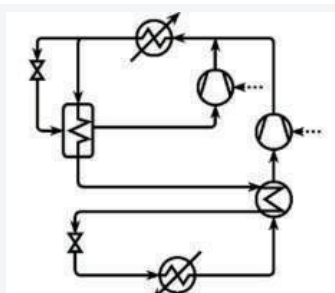
Ciclo	T salida sumidero (°C)	T entrada fuente de calor (°C)	COP
 Ciclo doble etapa con economizador cerrado	80	0	2,1
 Ciclo doble etapa con economizador cerrado e intercambiador de calor intermedio	130 130	30 90	2,1 5

Tabla 16: Ciclos cerrados BCAT con intercambiador de calor intermedio y o economizador [25].

Con respecto a la compresión paralela, permite obtener dos etapas de compresión y expansión. En este ciclo el compresor principal succiona gas del evaporador y lo comprime a una presión intermedia para que el segundo compresor sea el encargado de comprimirlo a la presión final, estando ambos compresores en paralelo. Al existir menor ratio de compresión que si se utilizase un ciclo convencional, se aumenta la eficiencia isotrópica del compresor y por ende la del ciclo. Por último, la compresión multietapa en serie consiste en emplear varios compresores, en general dos, para conseguir mayores saltos de temperatura.

En la Tabla 17 se muestran distintos ciclos BCAT con compresión paralela y sus parámetros más relevantes.

Ciclo	T salida sumidero (°C)	T entrada fuente de calor (°C)	COP
 Ciclo etapa simple con compresión paralela y economizador cerrado	130 130	30 90	6,9 1,5

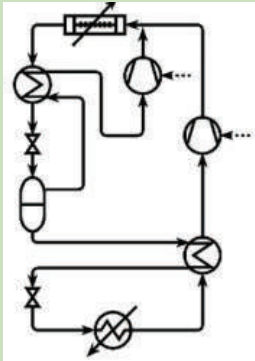
 Ciclo etapa simple con economizador flash con sobrecalentamiento e intercambiador de calor intermedio	200 200	30 80	3,3 2,7
--	-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

Tabla 17: Ciclos compresión mecánica cerrados con compresión paralela [25].

6.2.5 Ciclo en cascada

En la bomba de calor en cascada un intercambiador de calor conecta dos ciclos cerrados de manera que existe una zona de alta temperatura por encima del intercambiador de calor y otra de baja temperatura por debajo de éste. Se utiliza para elevados saltos de temperatura debido a su eficiencia en dichas condiciones. Este intercambiador de calor actúa como evaporador para la parte superior del ciclo y como condensador para la zona de baja temperatura. Un ciclo en cascada actúa termodinámicamente de manera similar a un ciclo con dos etapas de expansión y compresión a excepción de la diferencia de temperatura creada por el intercambiador de calor. Esta configuración permite trabajar con refrigerantes distintos en la parte superior e inferior con el objetivo de optimizar la eficiencia del ciclo y existe la opción de que cada parte sea subcrítica y transcítica respectivamente.

En la tabla 18 aparecen distintas configuraciones de ciclos cascada con sus COP correspondientes.

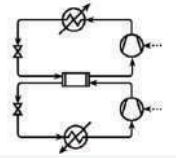
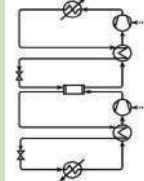
Ciclo	T salida sumidero (°C)	T entrada fuente de calor (°C)	COP
 Ciclo en cascada	80	0	2,1
 Ciclo en cascada de etapa simple y con intercambiador de calor intermedio en ambas partes.	127	65	3,23

Tabla 18: Ciclos cerrados BCAT en cascada [25].

6.2.6 Ciclo multitemperatura

Las bombas de calor multitemperatura se basan en el uso de varios condensadores/enfriadores de gas (ciclos transcritos) y/o evaporadores. Suelen combinarse con configuraciones como intercambiadores de calor intermedios, compresión multietapa o paralela, ciclo en cascada, etc. Kondou y Koyama analizaron un ciclo con tres etapas de compresión y varios refrigerantes de bajo GWP. En dicho ciclo, el uso de un intercambiador de calor adicional y una etapa de condensador aumentaron el COP de 4,53 a 4,77 para temperaturas de fuente y sumidero de 80 y 160 °C, respectivamente [58]. Para situaciones en las que las temperaturas de entrada y salida son comparables, otra investigación llevó a cabo un análisis experimental de un sistema que constaba únicamente de dos compresores, dos condensadores, un intercambiador de calor y un dispositivo de subenfriamiento. Durante estas pruebas, se evaluaron los rendimientos de los refrigerantes R1234ze(Z), R1233zd(E) y R365mfc, concluyendo que el refrigerante R1234ze(Z) exhibió el COP más elevado, alcanzando 4,58 [26].

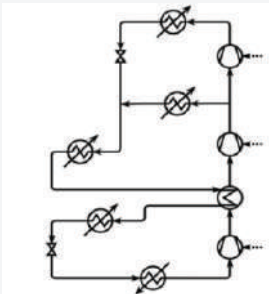
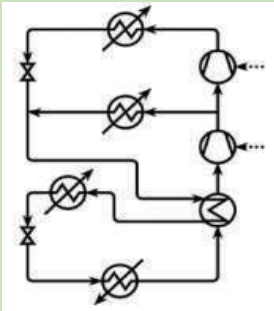
Ciclo	T salida sumidero (°C)	T entrada fuente de calor (°C)	COP
 Ciclo con dos condensadores, un intercambiador de calor intermedio y dos subenfriamientos externos	160	80	4,53
 Ciclo con dos condensadores, un intercambiador de calor intermedio y un subenfriamiento	160	80	4,58

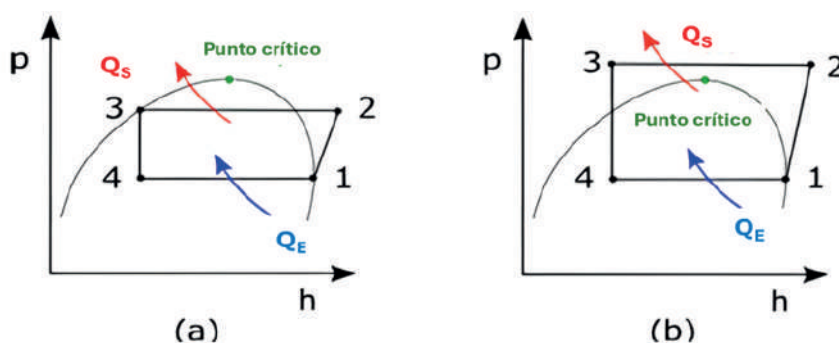
Tabla 19: Ciclos compresión mecánica cerrados multitemperatura [25].

Ciclo transcrito

Como ya se ha explicado brevemente en el apartado de tecnologías, los ciclos transcritos son aquellos en los que la presión de descarga del compresor está por encima de la presión crítica del refrige-

rante por lo que posteriormente no se condensa sino simplemente se produce un enfriamiento del refrigerante en estado vapor. La absorción de calor tiene lugar en rango subcrítico bajo la evaporación del refrigerante. Las etapas del ciclo transcrito son las siguientes [30]:

1. Compresión isoentrópica desde el estado 1 al 2 aumentando la presión y la temperatura.
2. Transferencia de calor isobárica de 2 a 3.
3. Expansión isoentálpica del estado 3 al 4.
4. Absorción de calor isobárica desde el punto 4 al 1.



En la siguiente tabla se recogen distintas configuraciones de ciclos transcritos, así como sus especificaciones:

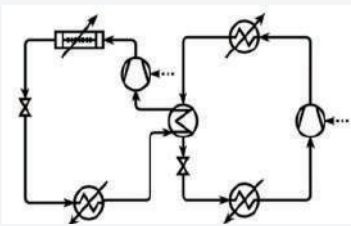
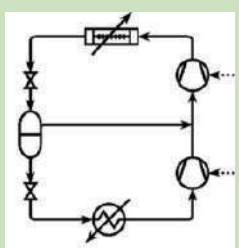
Ciclo	T salida sumidero (°C)	T entrada fuente de calor (°C)	COP
 Ciclo en cascada con ciclo transcrito y subenfriamiento en la parte superior y ciclo subcrítico en la zona inferior	100 92	50 50	4,47 5,24
 Ciclo transcrito con economizador abierto	150	82	3,61

Tabla 20: Distintas configuraciones transcricas y sus especificaciones [25].

7. Retos de Desarrollo Tecnológico

Las BCAT representan una innovación prometedora en el ámbito de la producción de calor sin el empleo de combustibles. Ofreciendo un potencial significativo para mejorar la eficiencia energética de procesos térmicos y reduciendo además las emisiones de dióxido de carbono.

A pesar del creciente interés y la investigación en este campo, persisten desafíos importantes en su desarrollo y despliegue a gran escala. En este apartado, se abordan los retos a los que se enfrentan las BCAT, destacando la necesidad de vencer estos obstáculos para lograr su pleno aprovechamiento en la transición hacia sistemas de energía más sostenibles.

Es de vital importancia el apoyo público al desarrollo de los sistemas de bombas de calor de alta temperatura por su elevado potencial de electrificación de la demanda térmica, especialmente en la industria, donde los niveles de temperatura han venido requiriendo el uso tradicional de combustibles. Aunque estos combustibles fuesen de origen renovable, estos deberían ser reservados para aplicaciones que actualmente no se pueden satisfacer con electricidad.

Más allá de la I+D que permita vencer las barreras tecnológicas que aún existen, es fundamental un decidido apoyo de la administración y las empresas a la innovación, para el más rápido despliegue comercial de los nuevos equipos y sistemas de bomba de calor.

En el ANEXO I se presentan proyectos recientemente acabados o en marcha relacionados con la investigación y desarrollo tecnológicos de bombas de calor.

7.1. Barreras no tecnológicas

Los principales retos de las BCAT son los siguientes:

- La integración de las BCAT en la industria requiere del conocimiento tanto de éstas, como del proceso en el que se quieran integrar. En la actualidad, encontrar a expertos que conozcan tanto de BCAT como del proceso subyacente puede ser complicado [75].
- La falta de conciencia por parte de los usuarios finales sobre las necesidades o patrones de consumo de calor dificulta la identificación de oportunidades para integrar bombas de calor, lo que desemboca en un proceso tedioso [75].
- En determinadas situaciones, aunque la tecnología esté disponible, los extensos periodos de recuperación de la inversión hacen poco atractivas a las BCAT para los usuarios finales dificultando la viabilidad comercial [75].
- En muchas ocasiones, la tecnología requerida para su integración industrial no está disponible debido a las limitaciones en la temperatura máxima de suministro de las BCAT [75].
- El número de fabricantes de BCAT es limitado comparado con el de otras tecnologías convencionales. Esto puede deberse a la falta de conocimiento sobre su potencial y el mercado. En algunos casos esta limitación se deriva de la percepción de que el desarrollo de BCAT es un proyecto con alto riesgo y largo periodo de recuperación de la inversión, incluso para fabricantes consolidados que ya cuentan con modelos de menor temperatura [75].
- Se ha realizado un número limitado de pruebas y validaciones de fiabilidad tecnológica de bombas de calor en entornos industriales [75].

- El escaso número de refrigerantes con bajo GWP [44]. Debido a las nuevas normativas sobre el uso de refrigerantes, se ha comenzado a utilizar refrigerantes con bajo GWP con alto grado de deslizamiento. Esto supone problemas de adaptabilidad en el sellado en equipos diseñados para otro tipo de refrigerantes, la necesidad de aumentar la superficie de intercambio de calor, y valores de COP menores.

7.2. Retos de desarrollo tecnológico

La siguiente tabla recoge los principales retos de distintos sistemas de BCAT, así como de sus elementos:

Sistema	Principales retos del I+D
Compresión simple, multietapa o cascada	• Configuración del compresor y coste inicial: mejora de los distintos tipos de compresor existentes, así como la configuración y parámetros óptimos de diseño. • Las altas relaciones de compresión de ciertos refrigerantes, como el CO₂, dificulta la viabilidad del sistema por lo que se está investigando el recalentamiento antes del compresor o refrigerantes con presiones críticas relativamente bajas. • Temperatura de descarga del compresor: Limita la temperatura máxima de sumidero y si es demasiado alta puede producir la descomposición térmica del lubricante y daños en los materiales del compresor. Por tanto, existe la necesidad de mejorar la resistencia de los materiales a altas presiones, y por ende altas temperaturas de descarga. • Reducir las vibraciones del compresor en especial cuando se emplean refrigerantes como el NH₃, CO₂ o H₂O, los cuales se caracterizan por las altas presiones de descarga necesarias en el compresor. • Cuando se usa aceite para lubricar se necesitan elementos adicionales de separación y enfriamiento, además de un circuito de recirculación ya que tiende a penetrar en el circuito perjudicando a la BCAT. • Para diferencias medias de temperatura más estrechas, son esenciales superficies de transferencia de calor sustanciales. • Investigar la compensación entre el aumento de temperatura del ciclo y su influencia en el COP, la caída de presión, la potencia de bombeo requerida, la relación de presión deseada y la potencia del compresor. • Desarrollo de equipos adecuados para refrigerantes de bajo GWP incluyendo intercambiadores de calor, compresores, sensores, etc. • Mejorar el sellado y soldadura de los equipos. • Aumento de la temperatura de suministro, mejorar la eficiencia para los sistemas de más alta temperatura de suministro y disminuir las pérdidas exergéticas.
Eyector de válvulas mariposa	• Poca flexibilidad en el diseño del eyector dificultando su adaptación en amplios escenarios. • Pérdidas del fluido de trabajo durante la compresión multietapa. • Gestión de la capacidad térmica.
Eyectores múltiples	• Control del sistema de presión, especialmente cuando se usa R744. • La configuración y las variables de diseño cambian según diferentes ciclos.
Sistemas de absorción-compresión	• Los compresores que pueden operar sin aceites o la lubricación la realiza la solución, tienen mayores costes de inversión o necesita modificaciones en los equipos. • Diseño del absorbedor y desorbedor: Mejora de la transferencia de calor. • Proceso de mezcla líquido-vapor y su distribución: Una selección adecuada del modo de operación, junto con una distribución efectiva de la mezcla líquido-vapor, son necesarias para lograr elevados coeficientes globales de transferencia de calor cuando se emplea intercambiadores de calor de placas corrugadas. • Bomba de la solución: Se puede producir cavitación debido a los rápidos cambios de las condiciones de operación y en el compresor.

Tabla 21: Principales retos de las BCAT en función del sistema empleado [76],[77].

8. Áreas de interés y plantas industriales que operan con BCAT

En este apartado, se explorará los campos de interés clave para la aplicación de BCAT.

Existen numerosos campos industriales donde las BCAT pueden ser aplicadas actualmente con la tecnología existente, así como sectores que presentan un gran potencial para su implementación futura. En la siguiente tabla se muestra el rango de temperaturas de operación de distintos sectores industriales. Cabe destacar que, para el análisis de las temperaturas de suministro de los modelos actuales, no se ha tenido en cuenta los modelos TVR debido a su baja integración industrial y desarrollo, así como su limitada eficiencia energética. Si en un futuro esta situación cambiase, la temperatura de suministro viable actual sería de hasta 380 °C.

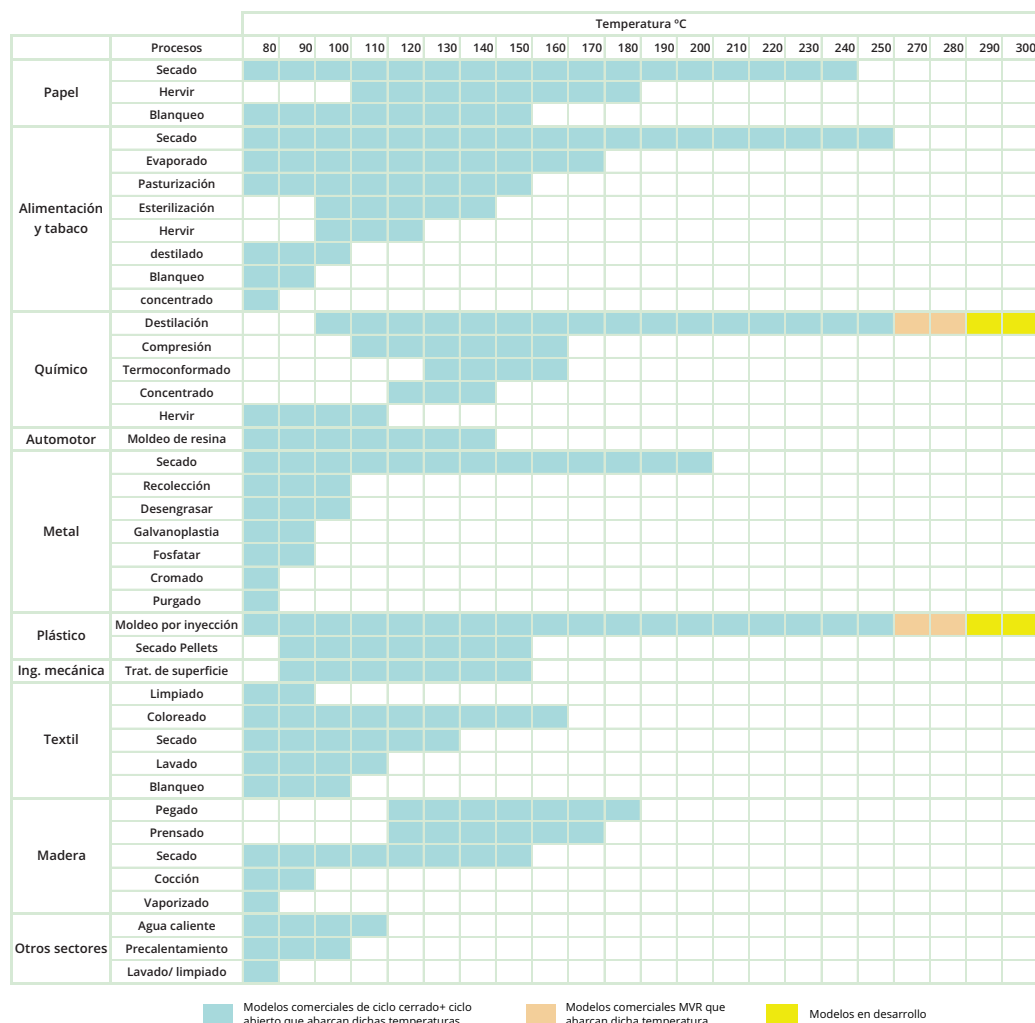


Tabla 24: Temperaturas de operación superiores a 80 °C donde pueden emplearse BCAT [75],[14]. Elaboración propia.

Con respecto a la implementación en los sectores mostrados en la Tabla 24, en el caso del lado del sumidero de BCAT de circuito cerrado, puede integrarse directamente en el flujo del proceso mediante el uso de condensadores y/o enfriadores, o bien, para suministrar calor a una corriente de servicio empleada como medio de calentamiento en un proceso. Otra posibilidad de integrar una BCAT es a través de sistemas MVR. Este sistema ha sido objeto de estudio recientemente para su aplicación en la industria del petróleo como medida de intensificación del proceso en unidades de destilación, donde el consumo energético es elevado. Por otro lado, los sectores en los que se necesite tanto un proceso de calentamiento como de enfriamiento son un mercado potencial para las BCAT.

En la siguiente figura se han representado las demandas energéticas de los distintos sectores comentados en UE. La calefacción del espacio se encuentra generalmente en un rango de 60 a 70 °C y la producción de agua caliente entre 70-80 °C por lo que se encontrarían fuera del rango de operación de las BCAT.

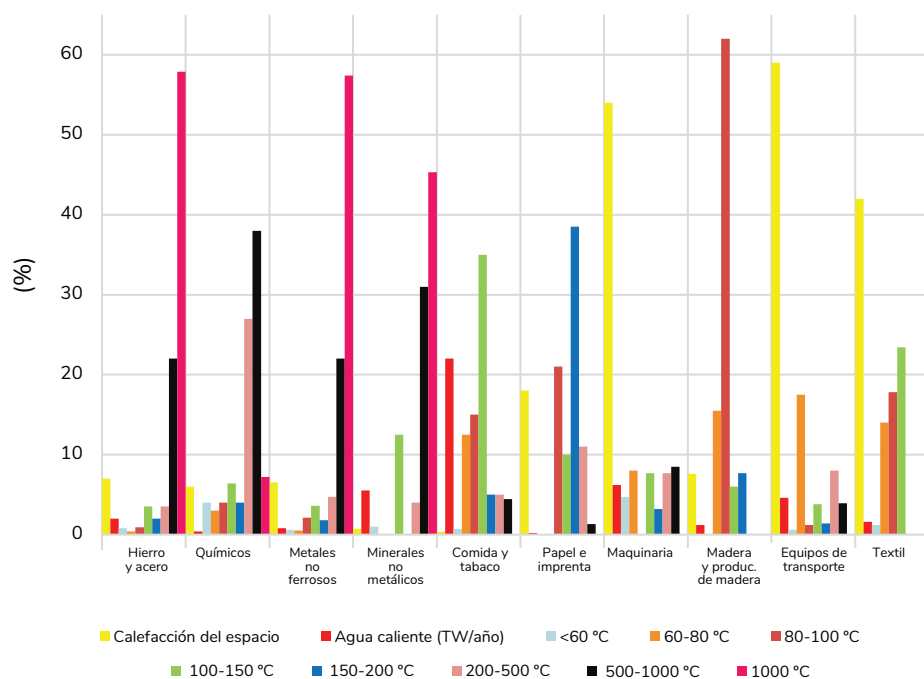


Figura 38: Demanda térmica de los distintos sectores industriales en tanto por ciento y por rango de temperatura en UE [92]. Elaboración propia.

Los sectores en los que se podría utilizar una BCAT para suministrar la mayoría de la potencia demandada sería los sectores del papel, el textil, el de la alimentación y el tabaco. En los sectores del hierro y del acero, metales no ferrosos y minerales ferrosos las BCAT de temperatura de suministro de 80 a 200 °C, podrían cubrir un porcentaje de la demanda calorífica entre 10 % y el 20 %, ya que la mayoría de las necesidades caloríficas exceden la temperatura de suministro actual de las BCAT, de hasta 250 °C. Si bien es cierto que los sistemas TVR podrían aumentar el uso de las BCAT en los sectores anteriormente mencionados, ya que suministran temperaturas máximas de hasta 380 °C, se encuentran poco desarrolladas por lo que no se tienen en cuenta en el campo de aplicación actual. Por otro lado, en el sector químico alrededor del 25 % de su demanda calorífica pertenecen a un intervalo de temperatura viable para las BCAT. Por último, en los sectores de maquinaria, elementos de transporte,

madera y textil la mayoría de la demanda de la energía térmica es para la calefacción del espacio, no obstante; todas las necesidades de suministro de calor restantes de dichos sectores podrían ser satisfechas usando una BCAT.

Para ser económicamente viable la integración de las BCAT, el requisito principal es contar con una fuente de calor adecuada. Las fuentes de calor típicas para su uso en una bomba de calor son las siguientes:

- Calor residual de procesos industriales.
 - Calor residual de sistemas de refrigeración o enfriamiento.
 - Agua de refrigeración (dirigida a una torre de enfriamiento).
 - Calor radiante procedente de productos.
 - Aire con alto contenido de humedad.
- Corrientes de recirculación en procesos.
- Calor procedente de fuentes renovables.
 - Energía solar térmica.
 - Geotérmica.
 - Agua de mar o de río.
 - Aire ambiente.

La siguiente figura plasma la cantidad de calor residual desglosada por sector industrial y categorizada según diferentes rangos de temperatura. Esta distribución del calor residual es una métrica fundamental, ya que refleja el potencial de recuperación y reutilización de energía en cada sector.

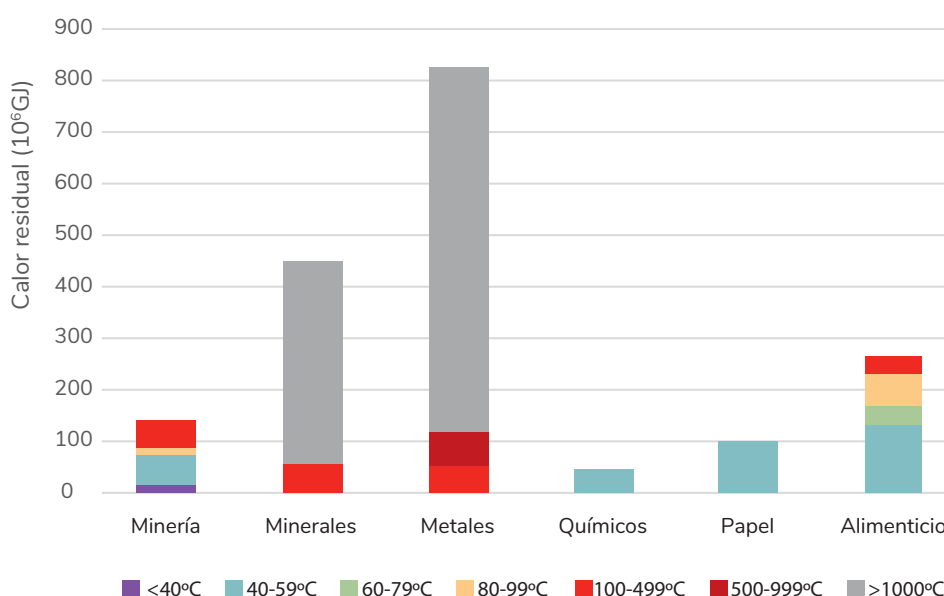


Figura 39: Calor residual por sectores en UE [75].

Los sectores en los que existan corrientes de calor residual elevadas son los que podrán alcanzar temperaturas de sumidero mayores sin implementar un método de precalentamiento de la corriente de fuente de calor y conseguir mejores eficiencias energéticas. Como puede observarse en la Figura 48 ,

los sectores de la minería y de los metales son los que poseen temperaturas de sumidero con mayores temperaturas, por encima de los 100 °C, aunque también cuentan con corrientes de calor residual entre 100-999 °C y entre 500-999 °C respectivamente. Tanto el sector del papel como el químico, podría emplear corrientes de fuente de calor con temperaturas solamente entre 40-59 °C. El sector alimenticio es el que más versatilidad cuentan en las temperaturas de calor residual. Pueden conseguirse corrientes de calor de residual con temperaturas entre los 40 y 499 °C. Por último, en el sector químico sus corrientes de calor residual se encuentran entre 40-59 °C.

La Figura 49 representa la demanda térmica industrial por rangos de temperatura de algunos países de la UE.

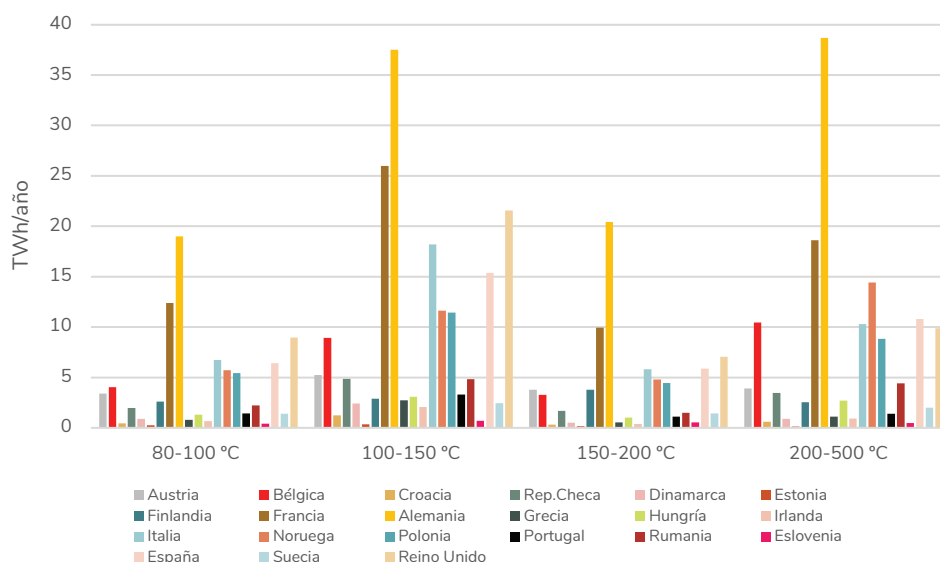


Figura 40: Consumo de energía en la industria de los países de UE por temperatura [92]. Elaboración propia.

El rango de temperaturas de 100 -150 °C se caracteriza por ser el de mayor requerimiento energético, seguido del intervalo de 200 a500 °C. No obstante, en este último sólo podían integrarse las BCAT de mayor temperatura de suministro cubriendo temperaturas por debajo de los 300 °C. Por el contrario, los rangos de temperatura de 80-100 °C y 150-200 °C son los que menor necesidad calorífica poseen, aunque son los de mayor potencial para las BCAT, junto con el intervalo de 100-150 °C. Con respecto a la demanda energética industrial por país, destaca en primera posición Alemania seguida de Francia Croacia y Bélgica.

En las figuras 50 y 51 se han representado el consumo de energía térmica de los distintos sectores industriales de los países de la UE con mayor demanda.

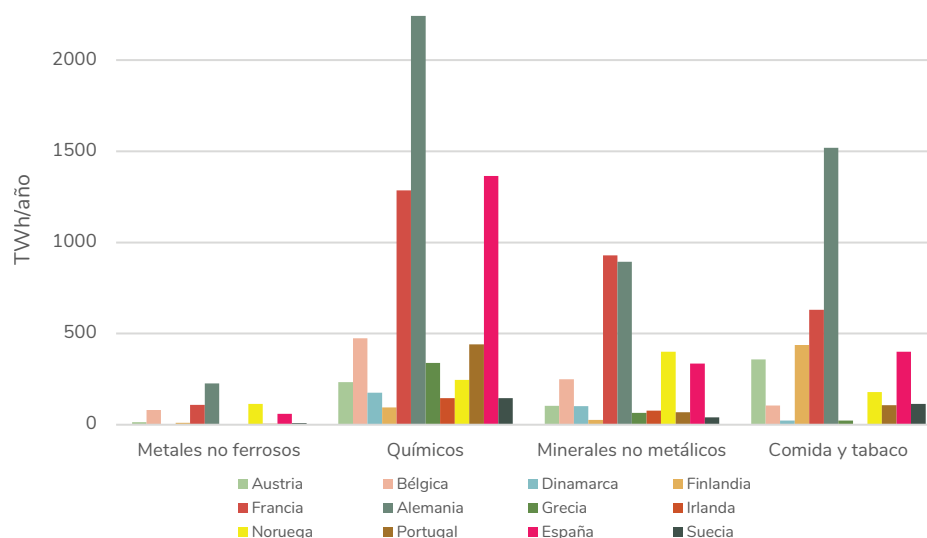


Figura 41: Potencial de suministro de calor en UE por sector industrial y país [92]. Elaboración propia

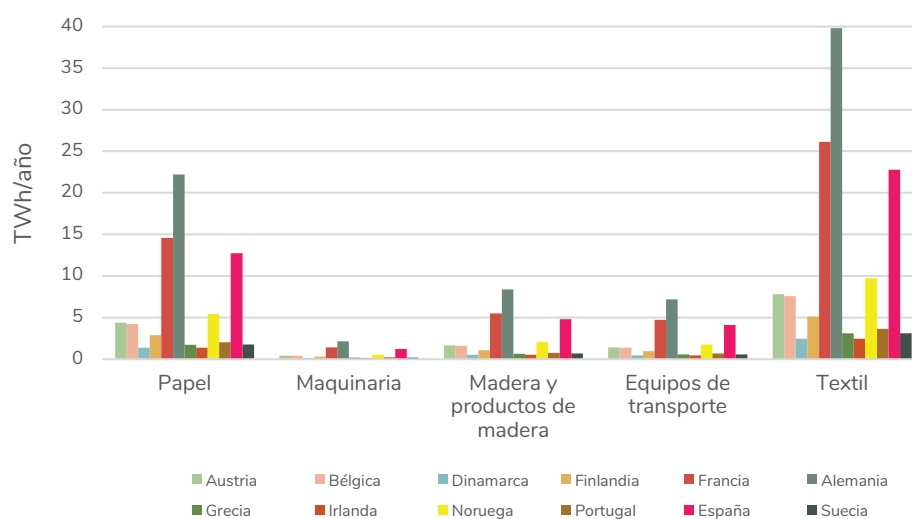


Figura 42: Potencial de suministro de calor en UE por sector industrial y país [93]. Elaboración propia.

De nuevo, Alemania y Francia son los países con mayor demanda térmica en todos los sectores estudiados a excepción del sector químico donde España supera a Francia. El tercer país con mayor demanda térmica es España salvo en los sectores de metales no ferrosos y minerales no metálicos donde Noruega le sobrepasa. De los sectores analizados, los que parecen presentar mayor potencial son el sector químico, seguido de los sectores alimenticio y de tabaco, el de los minerales no metálicos, el sector de los metales no ferrosos, el textil y el del papel; en orden descendente de demanda calorífica. No obstante, se debe tener en cuenta que los sectores de metales no ferrosos, minerales no metálicos y el sector químico necesitan principalmente, en especial los primeros sectores, temperaturas de suministro superiores a las suministradas por las BCAT comerciales en la actualidad. Por último, el sector con menor demanda térmica es el de la maquinaria seguido de los sectores de la madera y el de equipos de transporte.

Otra aplicación potencial de las BCAT, aparte de las anteriormente comentadas, podría ser su uso en el almacenamiento energético. En la actualidad, la electricidad procedente de sistemas de energía renovable constituye el principal objetivo en la agenda energética de la mayoría de los países. La principal desventaja de los sistemas de energía renovable es su patrón intermitente de producción, que por lo general no coincide con los períodos de máxima demanda de energía. Se pueden implementar varios sistemas para mejorar dicha situación, incluyendo baterías, bombeo hidroeléctrico, aire comprimido o sistemas de almacenamiento de energía térmica bombeada. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica bombeada, que esencialmente son baterías de Carnot, pueden almacenar electricidad en forma de calor. Estos sistemas son más económicos y pueden instalarse independientemente de las características geológicas o geográficas. Los sistemas con BCAT pueden formar parte de los sistemas de almacenamiento de energía térmica bombeada como parte del sistema de carga térmica. El exceso de energía es utilizado por la BCAT para cargar el almacenamiento térmico con calor de alta temperatura. Cuando se requiere electricidad, el calor almacenado se utiliza para impulsar un ciclo de energía térmica, es decir, el ciclo Rankine, obteniendo electricidad durante el proceso de descarga. Estos sistemas pueden alcanzar eficiencias elevadas y permiten la integración de fuentes de calor de baja temperatura, como corrientes de calor residual, la energía solar térmica, la geotérmica y las instalaciones de centros de datos.

Por último, se ha realizado el estudio de plantas industriales que operan actualmente con una BCAT. En las tablas 25-27 aparecen las plantas industriales localizadas:

Fabricante	Industria	Proceso	Fuente de calor			Corriente sumidero			Tipo BCAT	Refrigerante	Compr.	Capac.	COP
			Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)	Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)					
Qpinch	Química	Producción de vapor	Vapor exhausto	120-145	120-146	Generación de vapor	140-185	140-185	Adsorción tipo II	H ₂ PO ₄	-	2900	0,45
Huayuan Taimeng	Refinería	Alquilbenceno	Calor residual	86	127	Generación de vapor	150	n.a	Absorción tipo II	LiBr/H ₂ O	-	5100	0,48
Bs Nova	Producción estireno-butadieno	Químico	Vapor condensado	90 -	85 -	Generación de vapor	100-110	n.a	Absorción tipo II	LiBr/H ₂ O	-	1300	0,47
-	Lechera	Pasterización	Enfriador	20 -	40 -	Producción agua caliente	67 95	60 -	Absorción/compresión	R717+R718	-	1577 940	5,9
Hybrid Energy	Lechera	Pasterización		65	60	Generación de vapor	95	73	Absorción/compresión	R717+R718	-	900	5,5

Tabla 25: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología MVR. [30].

Fabricante	Industria	Proceso	Fuente de calor			Corriente sumidero			Tipo BCAT	Refrigerante	Compresor	Capac. (kW _{th})	COP
			Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)	Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)					
Mayekawa	Electrónica	Secado de bobina	Enfriado en pintura por electrodeposición	25	30	Destilación	120	20	CCHP	R744	Pistón	89	3,1
AMT/AIT	Alimenticia	Secado de almidón	Calor residual	72	76	Secado	138	96	CCHP	R1336mzz(Z)	Tornillo	374	3,2
Olvondo	Farmacéutica	Atemperamiento	Calor de atemperamiento	34	36	Secado	183	178	Stirling	R704	Pistón	2250	1,7
Kobelco	Refinería	Destilación bioetanol	Proceso de enfriado	60	65	Generación de vapor	115	110	CCHP + tanque flash	R245fa	Doble tornillo	1850	3,5
MHI	Electrónica	Secado de bobina	Calor residual	50	55	Destilación	130	70	CCHP	R134a	Centrífugo	627	3
AMT/AIT	Minerales	Secado de ladrillo	Aire de secado exhausto	80	84	Generación de vapor	121	96	CCHP	R1336mzz(Z)	Pistón	296	5
Olvondo	Lechera	Agua caliente	Enfriamiento	12	20	Generación de vapor	115	95	CCHP	R290y R600	Pistón	300	2,5
Shanghai Nuotong	Bebidas	Destilación alcohólica	Aire de secado exhausto	n.a	18.9	Generación de vapor	120	90	CCHP + tanque flash + MVR	LT: R410 a HT: R245fa	Tornillo	180	1,85
SPH	Papel	Secado de pulpa	Aire de secado exhausto	35	55	Generación de vapor	123	n.a	CCHP	n.a	Pistón	1180	2,3
Enerin	Alimentación animal	Pellets	Aire de secado exhausto	n.a	n.a	Generación de vapor	>150	n.a	Stirling	R704	Pistón	n.a	2,5
Enertime	Papel	Planta de cogeneración	Agua de enfriamiento	90	85	Generación de vapor	117-137	n.a	CCHP + tanque flash + MVR	bajo ODP	Turbo	2100	3.5
Man Energy Solutions	Lechera	Pasterización	Enfriador	-	-	Generación de vapor	-	-	-	R744	Turbo	-	-

Tabla 26: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología compresión mecánica.[30],[94].
CCHP hace referencia a BCAT de compresión mecánica

Fabricante	Industria	Proceso	Fuente de calor			Corriente sumidero			Tipo BCAT	Refrig.	Compresión	Cap. (kW _{th})	COP
			Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)	Unidad Operacional	Ts (°C)	Te (°C)					
n.a	Bebidas	Destilación alcohólica	Producción de frío	75	78,3	Destilación	140	n.a	MVR	n.a	n.a	350	5,2
Kobelco	Aguas residuales	Secado de lodos	Aire de secado exhausto	93	93	Generación de vapor	160	160	MVR	R718	Doble tornillo, soplate de lóbulos	675	2,9
Epcon	Aguas residuales	Secado de lodos	Vapor excedente	100	n.a	Proceso agua caliente	146	n.a	MVR	R718	Turbo (2 etapas)	500	4,5
Shandong Zhangqiu	Refinería	Destilación etanol	Vapor exhausto	76	n.a	Generación de vapor	116	n.a	MVR	R718	Centrífugo	n.a	7,68
Piller	Plásticos	Separación térmica	Vapor exhausto	60	60	Secado	131	126	MVR	R718	Tubo 4 (8 soplantes)	10000	4,4
Spilling	Papel	Secado de pulpa	Vapor exhausto	105	133	Generación de vapor	201	n.a	MVR	R718	Pistón	11200	4,2
Spilling	Química	Químico	Vapor exhausto	105	152	Generación de vapor	211	n.a	MVR	R718	Pistón	12000	5,3

Tabla 27: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología sorción e híbrida. [30],[95].

9. Análisis Económico

El análisis económico desempeña un papel fundamental en la evaluación de la viabilidad y la eficacia de la implementación de BCAT en diversos contextos industriales. En este apartado, se analizarán los distintos aspectos económicos relacionados con estas tecnologías, centrándose en la comparación entre diferentes fabricantes y sus productos. Cabe destacar que no se ha realizado el análisis económico de las tecnologías TVR debido a su poco desarrollo y, por tanto, la baja información existente sobre su COP e inversión. Sí bien es cierto que, según fuentes bibliográficas, el coste de inversión y mantenimiento de las tecnologías TVR son aproximadamente la mitad que las de las tecnologías MVR, por lo que en un futuro podría ser de interés su estudio económico si consiguiese mejorar su eficiencia energética [14]. Los resultados numéricos obtenidos del análisis, los cuales han sido empleados para representaciones gráficas aparecen registrados en la tabla I de anexos.

9.1 Inversión

La inversión inicial en la adquisición e instalación de sistemas de BCAT puede representar un desembolso significativo para las empresas. A partir de estudios bibliográficos y de proveedores se ha realizado una recopilación de las BCAT localizadas. Dicho estudio incluye tanto las bombas que actualmente son comerciales, es decir, las que aparecen en el apartado de fabricantes, como las que aún están en la etapa de prototipado, mencionadas en el apartado de I+D, así como algunas referencias bibliográficas para las BCAT de absorción. Para todos los valores de coste de inversión no se ha tenido en cuenta el desembolso de capital necesario para su integración.

En la siguiente figura se ha representado el valor medio de la inversión de cada tipo de tecnología en función de la capacidad térmica con el objetivo de realizar una comparativa entre ellas a partir de los distintos modelos estudiados.

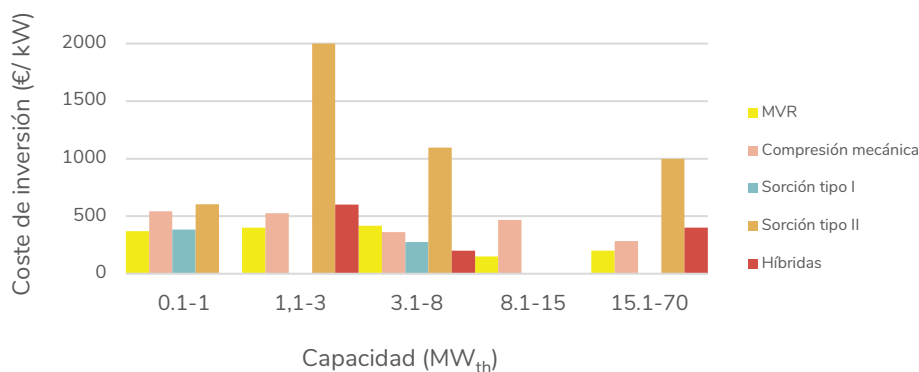


Figura 43: Inversión en función de la potencia térmica de las tecnologías existentes. Elaboración propia.

Puede concluirse, que las BCAT de sorción tipo II son las que requieren mayor coste de inversión para cualquier potencia debido a la transformación de calor. Concretamente para el rango de 1,1-3 kW_{th} su diferencia es notablemente mayor, ya que sólo se encontró como referencia la BCAT del fabricante Qpinch, la cual tiene el valor más alto de coste de inversión de las BCAT estudiadas. Para el intervalo más bajo de potencia térmica, 0,1-1 kW_{th} , la segunda tecnología con mayor coste de inversión son las

BCAT de compresión mecánica de ciclo cerrado. Para cualquier intervalo de potencia, a excepción de bombas de calor de potencias de 3 a 8 kW_{th}, la tecnología más barata es la MVR, debido a su sencillez. La media de la tecnología MVR en el intervalo 3,1- 8 MW_{th} es notablemente superior al resto de intervalos debido al modelo de Piller. Por último, no han podido encontrarse modelos de BCAT de sorción tipo I para potencias entre 1,1-3 MW_{th} ni para intervalos entre 15-70 MW_{th}. De igual modo, tampoco han podido encontrarse modelos de BCAT híbridas para el rango de potencia de 0,1-1 MW_{th}. De los intervalos de potencia en el que sí se han registrado datos para la tecnología híbrida, puede afirmarse que es segunda tecnología con mayor coste de inversión, seguida de la tecnología de compresión mecánica de ciclo cerrado, a excepción del intervalo 3,1-8 MW_{th} previamente comentado. Con respecto a la tecnología de sorción tipo I, parecen tener costes de inversión similares a los de tecnología MVR.

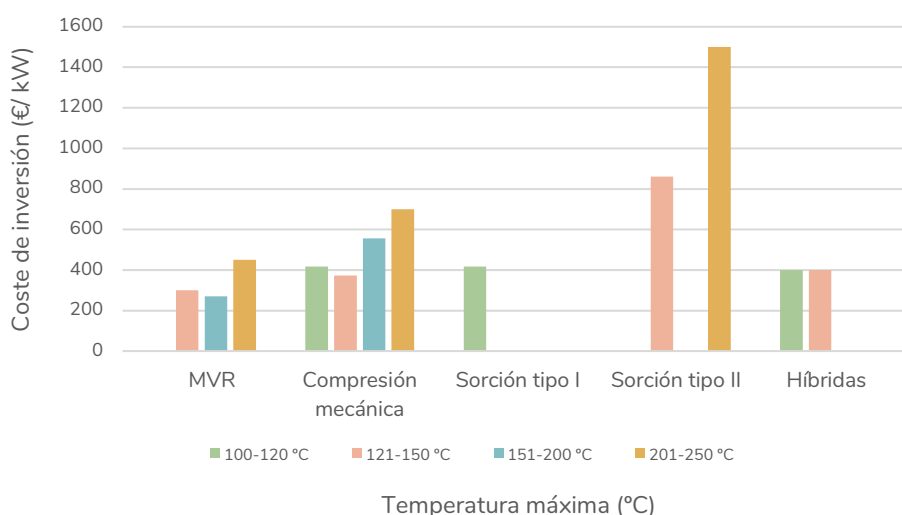


Figura 44: Coste de inversión promedio por tecnología y temperatura de suministro máxima. Elaboración propia.

En la Figura 53 se ha representado los costes de inversión promedio por temperatura máxima de suministro. De nuevo para cualquier intervalo de temperatura, las BCAT de mayor inversión son las de sorción tipo II las cuales ofrecen temperaturas de suministro superiores a 200 °C. Para el rango de 201-250 °C la tecnología MVR es la de menor coste de inversión seguida de la de compresión mecánica. Para intervalos de temperatura de 100 a 120 °C los modelos híbridos son los que menor inversión requieren seguidos de los de sorción tipo I y compresión mecánica. Estas dos últimas tecnologías parecen presentar costes de inversión semejantes para el rango de temperatura anteriormente mencionado. Con respecto al intervalo entre 121-150 °C de temperatura de suministro máxima, la tecnología MVR es la de menor coste de inversión seguida, de los modelos de compresión mecánica, cuyo coste de inversión es ligeramente menor que los modelos de tecnología híbrida registrados en dicho rango.

A continuación, se realizará un análisis detallado de los costes de inversión por tecnología:

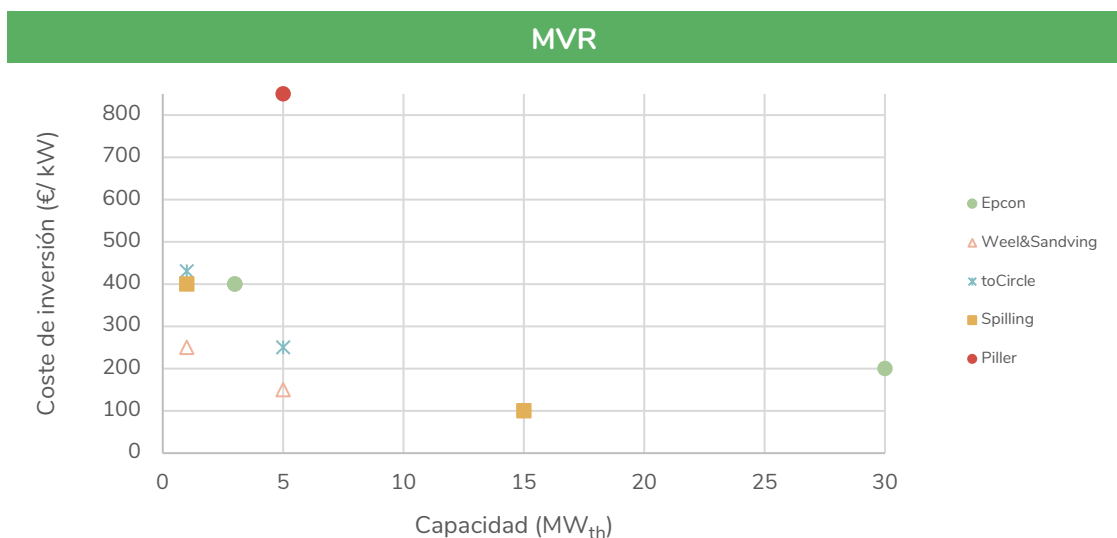


Figura 45: Coste de inversión en función de la capacidad térmica de los distintos modelos MVR. Elaboración propia.

En la Figura 54 aparecen todos los modelos de BCAT de tecnología MVR localizados con su coste de inversión en función de la potencia térmica. De dicha gráfica destaca que para potencias térmicas de hasta 5 kW_{th}, la opción de menor inversión sería el modelo de Weel&Sandving seguido del modelo de toCircle. En contraste, el modelo Piller sería el que mayor inversión requeriría. Para potencias superiores a 5 MW_{th} solo se han registrado datos de los modelos de Spilling y Epcon. Este último posee mayor coste de inversión que el modelo de Spilling, aunque también permite trabajar a potencias térmicas superiores.

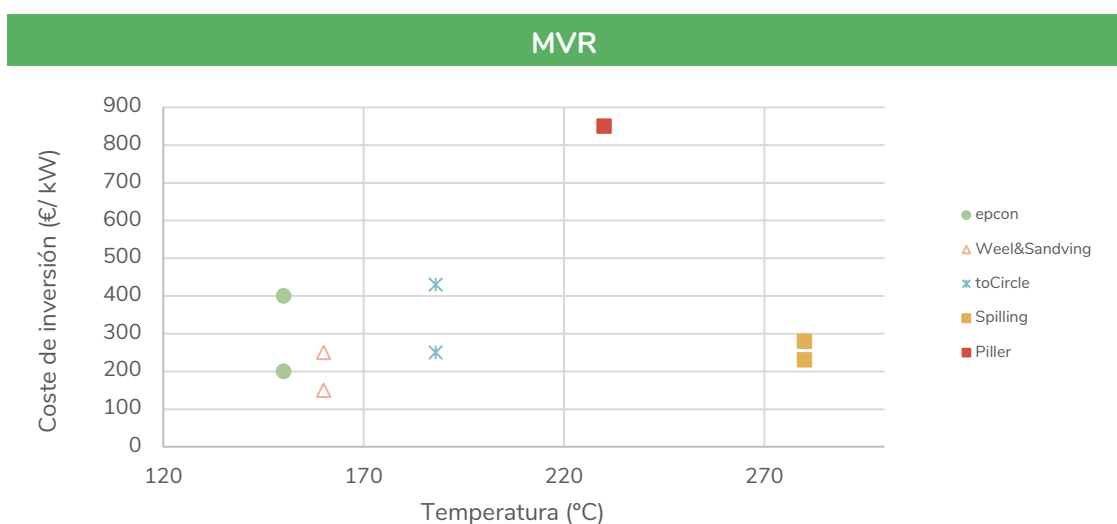


Figura 46: Costes de Inversión de los distintos modelos de MVR por su temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 55 se ha representado los costes de inversión de los modelos MVR, aunque esta vez en función de la temperatura máxima de suministro. Destaca que el modelo de Spilling, pues a pesar de ser el modelo que mayores temperaturas de suministro proporciona, posee un coste de inversión menor que los modelos toCircle, el de Piller y el de Epcon, además de valores muy similares al de Weel&Sandving. Por otro lado, para un rango de temperaturas de trabajo requerido de 120 a 165 °C la opción con menor coste de inversión sería la de Weel&Sandving.

Las siguientes figuras representan los costes de inversión de las BCAT de compresión mecánica de ciclo cerrado, en función de la potencia térmica.

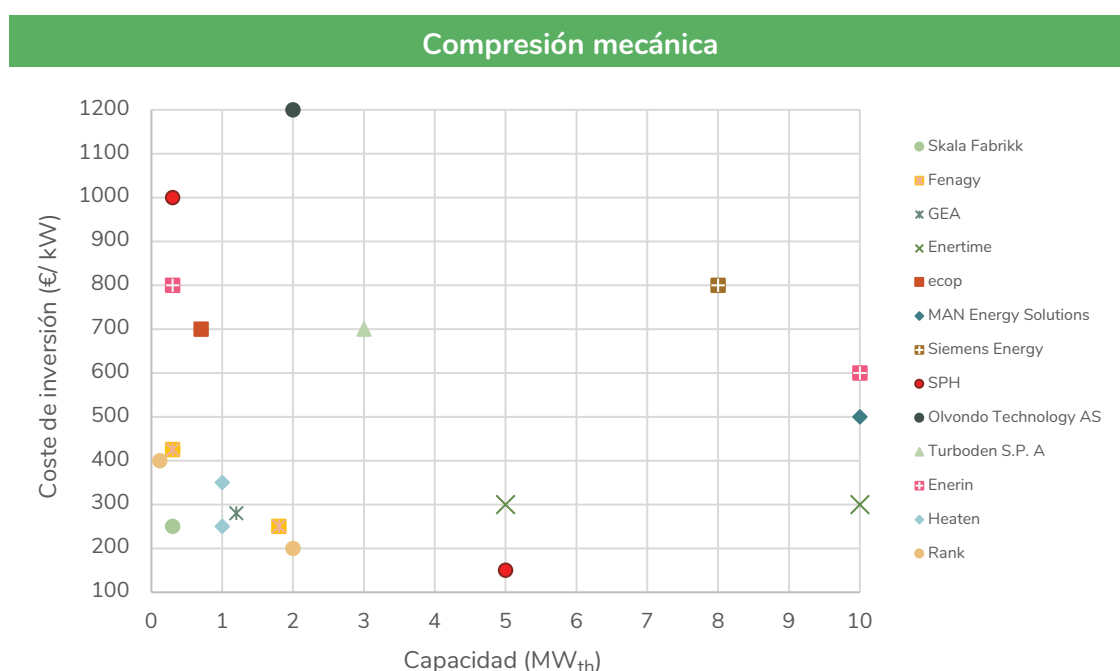


Figura 47: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de su potencia térmica. Elaboración propia.

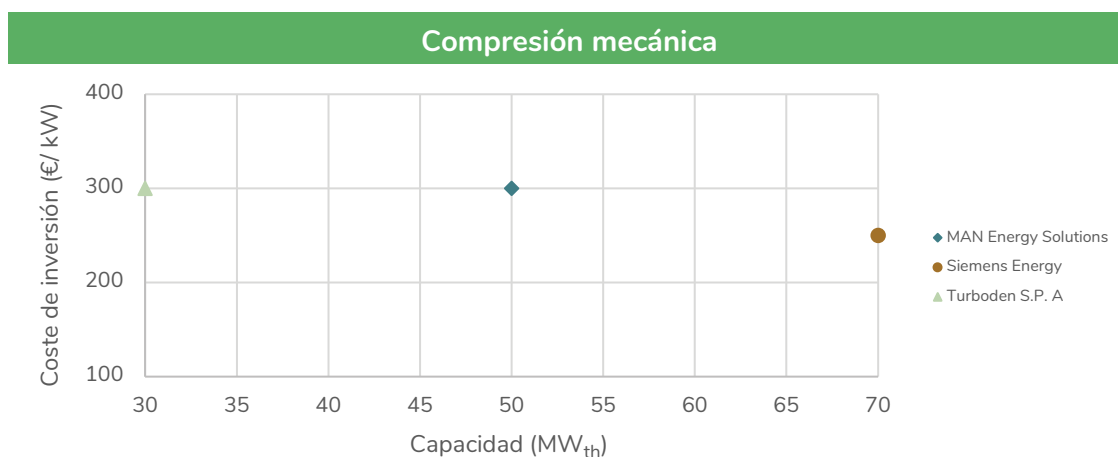


Figura 48: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de su potencia térmica. Elaboración propia.

Para capacidades térmicas de hasta 2 MW_{th}, los modelos ofrecidos por Siemens Energy, Mayekawa Europe, Fenagy, Skala Fabrikk y Rank presentan los costes de inversión más bajos, mientras que Olvondo se caracteriza por ser el de mayor requerimiento de capital inicial seguido de ECOP. En el segmento de 2 a 5 MW_{th}, el modelo de Turboden representa la opción más costosa en términos de inversión inicial, seguido por el de Enertime. Por otro lado, los modelos de SPH y COMBITHERM se distinguen por tener los costes de capital más reducidos dentro de este rango de potencia. Ascendiendo a la categoría de 5 a 10 MW_{th}, Siemens Energy encabeza la lista como la opción de mayor costo de inversión, con Enerin y MAN Energy situándose justo detrás. En contraste, Enertime ofrece los modelos con los menores costes de inversión para este intervalo de potencia. En el extremo superior de la escala, para las capacidades más altas evaluadas, los modelos de MAN Energy y Siemens Energy requieren costos de inversión comparables. Turboden sobresale por tener el modelo con la mayor capacidad térmica reportada, acompañado de un coste de inversión estimado en 250 €/kW.

La Figura 58 representa los costes de inversión de distintos modelos de compresión mecánica en función de la temperatura máxima de suministro que puede aportar.

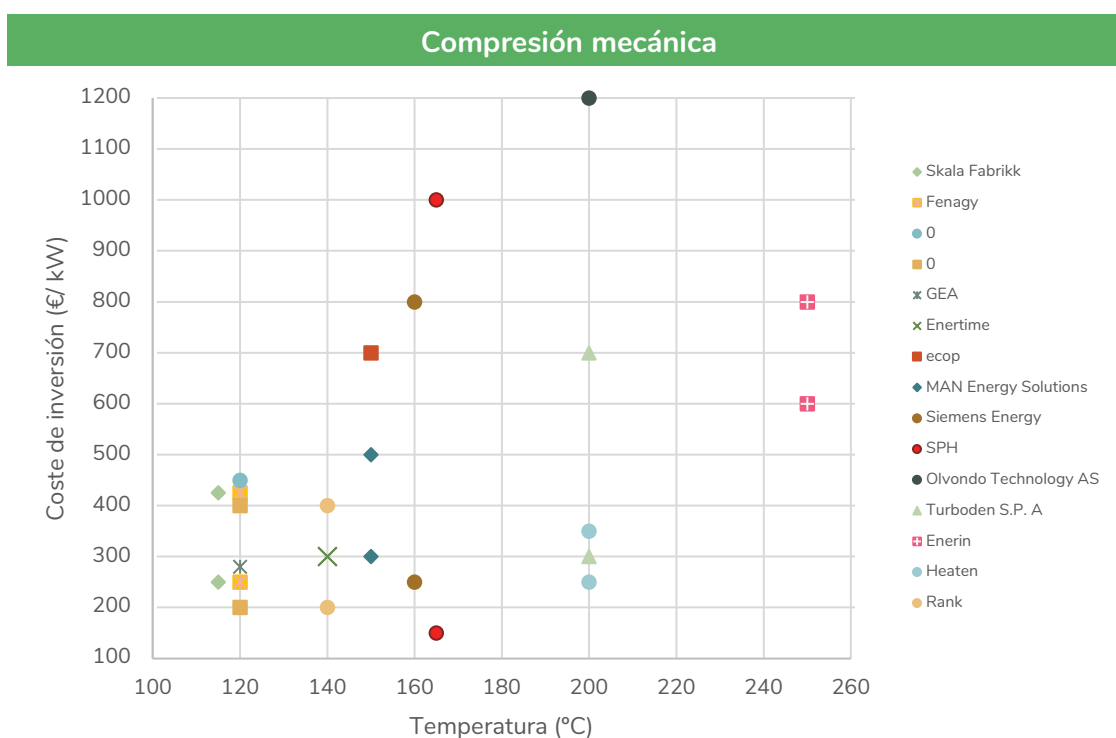


Figura 49: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de la temperatura de suministro máxima. Elaboración propia.

En el segmento de temperaturas comprendido entre los 100 y 140 °C, se observa que el equipo de Mayekawa Europe representa la opción con la mayor exigencia de capital inicial. En una categoría similar de requerimientos de inversión, se encuentran los modelos de Fenagy y Skala Fabrikk. En contraposición, el modelo de Rank destaca por la exigencia de inversión significativamente más baja. Dentro del espectro térmico que va de 140 a 165 °C, la unidad SPH de menor capacidad demanda la inversión más alta en comparación con su versión de menor potencia, que se presenta como la alter-

Sorción

Coste de inversión (€/kW)

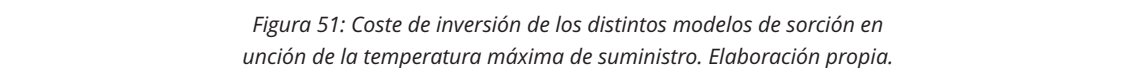
Capacidad (MW_{th})

Legend:

- Absorción tipo I: Soroka 2015
- Absorción tipo I: Radgen 2022
- Absorción tipo II: Soroka 2015
- Híbrida: Hybrid Energy
- Híbrida: AGO
- Adsorción tipo II: Qpinch
- Scheinhning

Capacidad (MW _{th})	Coste de inversión (€/kW)	Tecnología
1.5	400	Absorción tipo I: Soroka 2015
1.5	900	Absorción tipo II: Soroka 2015
2.0	2000	Adsorción tipo II: Qpinch
2.0	350	Absorción tipo I: Radgen 2022
2.5	600	Absorción tipo II: Soroka 2015
3.0	300	Absorción tipo I: Soroka 2015
3.5	700	Absorción tipo II: Soroka 2015
4.0	300	Absorción tipo I: Radgen 2022
4.5	800	Absorción tipo II: Soroka 2015
5.0	200	Híbrida: Hybrid Energy
5.0	300	Absorción tipo I: Radgen 2022
5.5	600	Absorción tipo II: Soroka 2015
6.5	250	Absorción tipo I: Radgen 2022
7.0	1500	Absorción tipo II: Soroka 2015
15.0	1000	Adsorción tipo II: Qpinch
20.0	400	Híbrida: AGO

En la Figura 59 se muestran los costes de inversión para distintas potencias térmicas de las BCAT de tecnología de sorción donde también se han incluido los modelos híbridos de absorción/compresión de AGO y de Hybrid Energy. El modelo de mayor coste de inversión es la BCAT de Qpinch de adsorción tipo II, seguida de los modelos de absorción tipo II. Las BCAT de absorción tipo I son las que menor coste de inversión requieren. Para potencias superiores a 15 MW_{th} solo se han encontrado datos para el modelo de AGO, el cual presenta un desembolso de capital inicial de 400 €/kW.



En la Figura 60 aparecen los costes de inversión en función de la temperatura máxima de suministro de las BCAT de sorción y los modelos híbridos. La tecnología de adsorción tipo II, gracias al modelo Qpinch, es la que mayor temperatura de suministro aporta, aunque también es la que requiere más inversión. Los modelos de absorción tipo II son los segundos con mayor coste de inversión, aunque proporcionan mayores temperaturas de suministro que los sistemas de absorción tipo I y sistemas híbridos.

9.2 Análisis Rentabilidad Operacional

En este apartado se realizará una comparativo entre el coste operacional empleando un combustible fósil o usar una BCAT para obtener energía térmica. Como combustible fósil se ha seleccionado el gas natural, puesto que es uno de los más empleados en Europa con ese fin y como base de cálculo, la producción de 1 kW_{th}. Con respecto al coste de electricidad, se ha utilizado el valor numérico de la estimación para 2024 en España de 0,055 €/kWh, mientras que para el precio del gas natural se ha fijado un valor de 0,04 € kWh [96] [97]. El rendimiento de la caldera puede variar desde el 75 % hasta el 98 %, en función de si se trata de calderas convencionales o por condensación, por ello, se ha escogido el valor intermedio del 90 %. Con respecto al número de horas operativas al año, se ha considerado un valor típico de 5962 horas al año [98]. Según ciertos estudios bibliográficos los costes de mantenimiento de una caldera de gas podrían considerarse similares a los de la bomba de calor, no obstante, con el fin de realizar un estudio más conservador, se ha considerado que los gastos de mantenimiento de BCAT son superiores a los de una caldera de gas debido a la mayor complejidad del sistema, específicamente un 2 % de la inversión del modelo de bomba calor [99]. En el caso de los modelos de bombas de calor de compresión mecánica de ciclo cerrado que no se han podido recopilar su coste de inversión, se ha considerado un valor habitual de 400 €/ kWh para establecer los costes de mantenimiento. Se ha estimado que las fuentes de calor requeridas son corrientes de calor residual del proceso, a excepción de los modelos de sorción de tipo I, por lo que su coste de producción es cero. Sin embargo; depende de la fuente de calor residual del proceso, pudiese ser necesario su recalentamiento y, por tanto, debería tenerse en el análisis económico el gasto operativo debido a ello.

En el caso de las bombas de calor de compresión de ciclo cerrado y las MVR se han utilizado las ecuaciones 5 y 6 para el cálculo de la rentabilidad operacional donde C_{G,N} es el coste del gas natural, h_{op} las horas operacionales del equipo al año, η_c el rendimiento de la caldera, C_{op} el coste operacional, C_{inv} el valor de la inversión inicial y C_{el} el coste de la electricidad:

$$COP_{comp.vapor y MVR} = \frac{\text{Potencia térmica producida}}{\text{Potencia eléctrica requerida}} = \frac{1 (kW_{th})}{\text{Potencia eléctrica requerida}} \quad (5)$$

$$R_{OP comp.mec y MVR} \left(\frac{\text{€}}{kW} \right) = \frac{1(kW) \times C_{G.N} \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right) \times h_{op}}{\eta_c} - \left(\frac{1}{COP} \times C_{el} \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right) \times h_{op} + 0,02 \times C_{inv} \left(\frac{\text{€}}{kW} \right) \right) \quad (6)$$

En el caso de los modelos de sorción tipo II y los modelos híbridos absorción/compresión, se ha utilizado la ecuación 7 para obtener la rentabilidad operacional. Con respecto a los modelos bibliográficos de sorción tipo II, se ha considerado un consumo eléctrico del 6 % de la potencia térmica mientras que, para la BCAT de Qpinch su gasto eléctrico (G_{el}) es un 3 % [24],[100]. En el caso de las BCAT híbridas el consumo eléctrico se ha definido como un 15 % de la potencia térmica [101]:

$$R_{OP \text{ sorción II e híbridos}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) = \frac{1(\text{kW})x C_{G.N} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) x h_{op}}{\eta_c} - \left(G_{el} x C_{el} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) x h_{op} + 0,02 x C_{inv} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) \right) \quad (7)$$

Puesto que las bombas de absorción de tipo I requieren de una fuente de calor de alta temperatura, se ha considerado que no se puede utilizar una fuente de calor residual con la temperatura necesaria en el generador y se requiere, por tanto, de energía primaria, específicamente gas natural. En este análisis el consumo eléctrico de los equipos auxiliares de las BCAT de sorción tipo I es el mismo que los modelos de sorción tipo II bibliográficos:

$$R_{OP \text{ sorción I}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) = \frac{1(\text{kW})x C_{G.N} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) x h_{op}}{\eta_c} \left(1 - \frac{1}{COP} \right) - \left(0,06 x C_{el} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) x h_{op} + 0,02 x C_{inv} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) \right) \quad (8)$$

Por último, la rentabilidad operacional de cada modelo se ha representado como porcentaje de ahorro con respecto al coste operacional usando gas natural:

$$R_{OP}(\%) = \frac{R_{OP} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right)}{\frac{1(\text{kW})x C_{G.N} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) x h_{op}}{\eta_c}} x 100 \quad (9)$$

Con el fin de realizar una comparativa entre las distintas tecnologías existentes, se ha realizado la media de la rentabilidad operacional en tanto por ciento de cada uno de los modelos de las distintas tecnologías como se muestra en la siguiente figura:

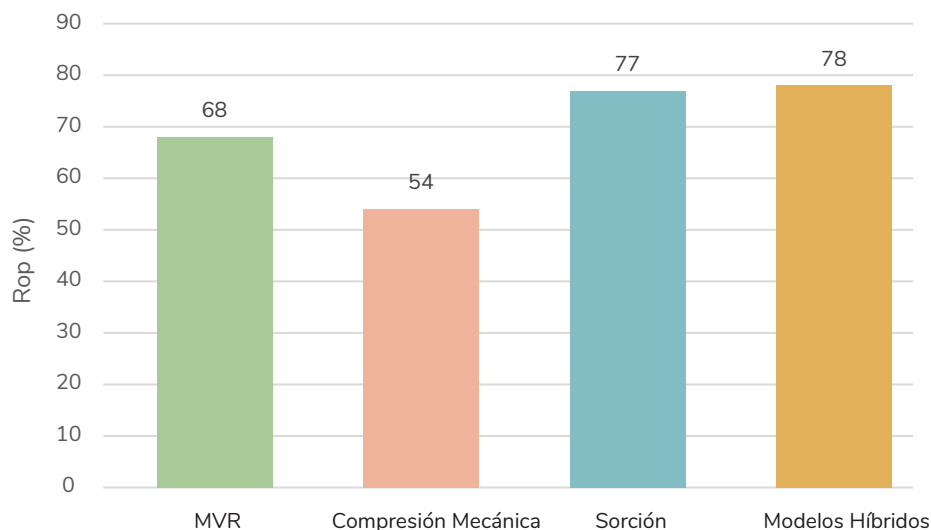


Figura 52: Rentabilidad operacional en tanto por ciento de las tecnologías existentes. Elaboración propia.

La tecnología con mayor rentabilidad operacional es la de sorción, seguida de la tecnología híbrida de absorción compresión. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que ambas permiten menores saltos de temperatura que las tecnologías MVR y de compresión de ciclo cerrado. Aun siendo esta última la tecnología con menor rentabilidad operacional, permite reducir un 57 % los costes operativos con respecto al uso de gas natural para la producción de calor. Además, las BCAT de compresión de ciclo cerrado son las que permiten alcanzar mayores saltos de temperatura y temperaturas de suministro de hasta 250 °C en algún caso.

A continuación, se ha realizado una comparativa con respecto a la rentabilidad operacional de los distintos modelos de cada tecnología en función del salto de temperatura:

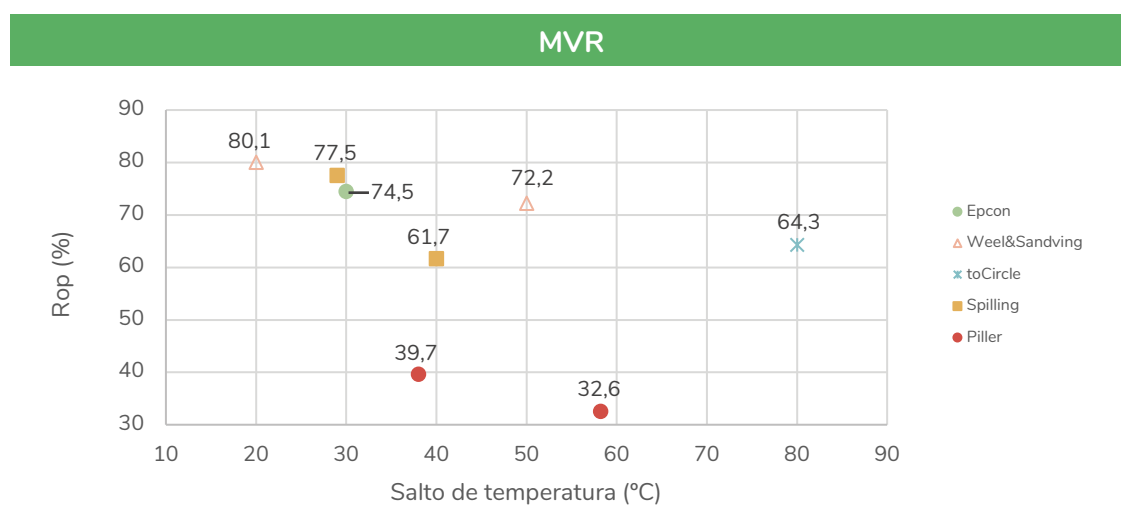


Figura 53: Rentabilidad operacional en función del salto de temperatura de los distintos modelos MVR. Elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 62, el modelo de Weel&Sandving es el que mayor rentabilidad económica podría ofrecer, 80,1 %, aunque su rentabilidad podría disminuir hasta los 72,1 % en función del COP obtenido. El compresor pistón de Spilling, segundo con mayor rentabilidad, permite un ahorro de costes operacionales del 77,5 % para un salto de temperatura de 30 °C, pero de nuevo su rentabilidad podría descender a 61,7 % si se aumentase el salto de temperatura a 40 °C. El compresor de paletas de toCircle para un salto de temperatura de 80 °C posee un valor de rentabilidad semejante al turbocompresor de Spilling para un salto de 40 °C. Cabe destacar que el compresor de Piller es el que menor rentabilidad operacional ofrece sin ser el que suministra mayores saltos de temperatura. Se puede deducir del análisis de resultados que el compresor rotatorio de toCircle es el que mayores saltos de temperatura puede proporcionar permitiendo un ahorro de los gastos operacional con respecto al uso de un combustible fósil de entre el 32 y el 80 %.

A continuación, con el fin de identificar en función de la temperatura necesaria qué modelos MVR pueden ser más interesantes desde el punto de vista económico, se ha representado la rentabilidad operacional en función de la temperatura máxima de la cual se ha podido obtener el COP de cada modelo:

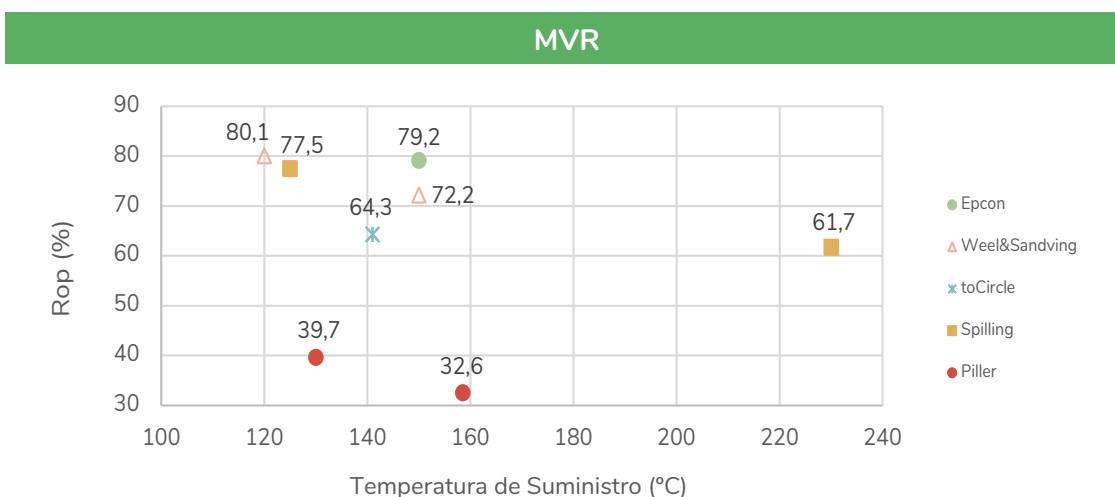


Figura 54: Rentabilidad operacional de los distintos modelos MVR en función de la temperatura máxima de suministro a partir de la cual se ha podido obtener su valor de COP. Elaboración propia.

Del análisis de los datos presentado en la Figura 63, se deduce que los modelos existentes trabajan en rangos de temperaturas de suministro entre 100 y 230 °C. El modelo de Weel&Sandving es el que permite alcanzar mayor rentabilidad, aunque para bajas temperaturas de suministro. Por otro lado, el turbocompresor de Piller alcanza una rentabilidad del 32,6 % siendo la más baja de todas y presenta una rentabilidad notablemente inferior a los modelos de Spilling y Weel&Sandving para temperaturas similares.

En la Figura 64 se han representado los valores de rentabilidad operacional calculados para un salto de temperatura dado de los distintos modelos de compresión de ciclo cerrado.

MVR

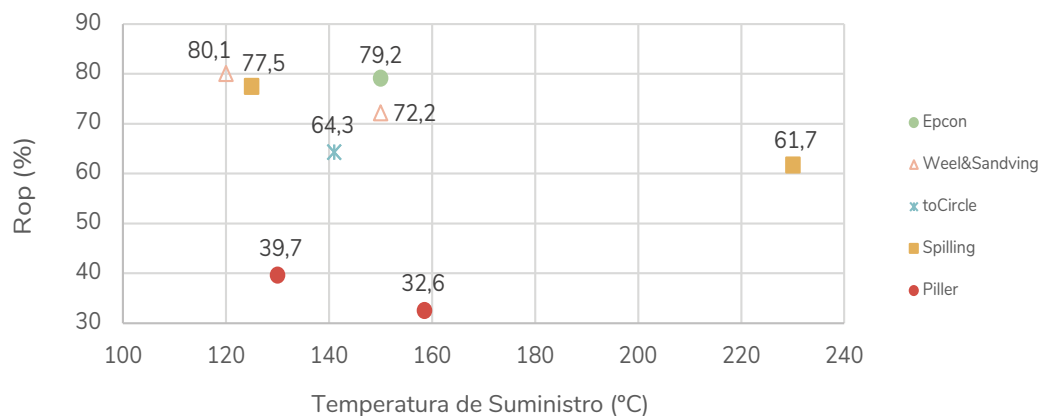


Figura 54: Rentabilidad operacional de los distintos modelos MVR en función de la temperatura máxima de suministro a partir de la cual se ha podido obtener su valor de COP. Elaboración propia.

Compresión mecánica

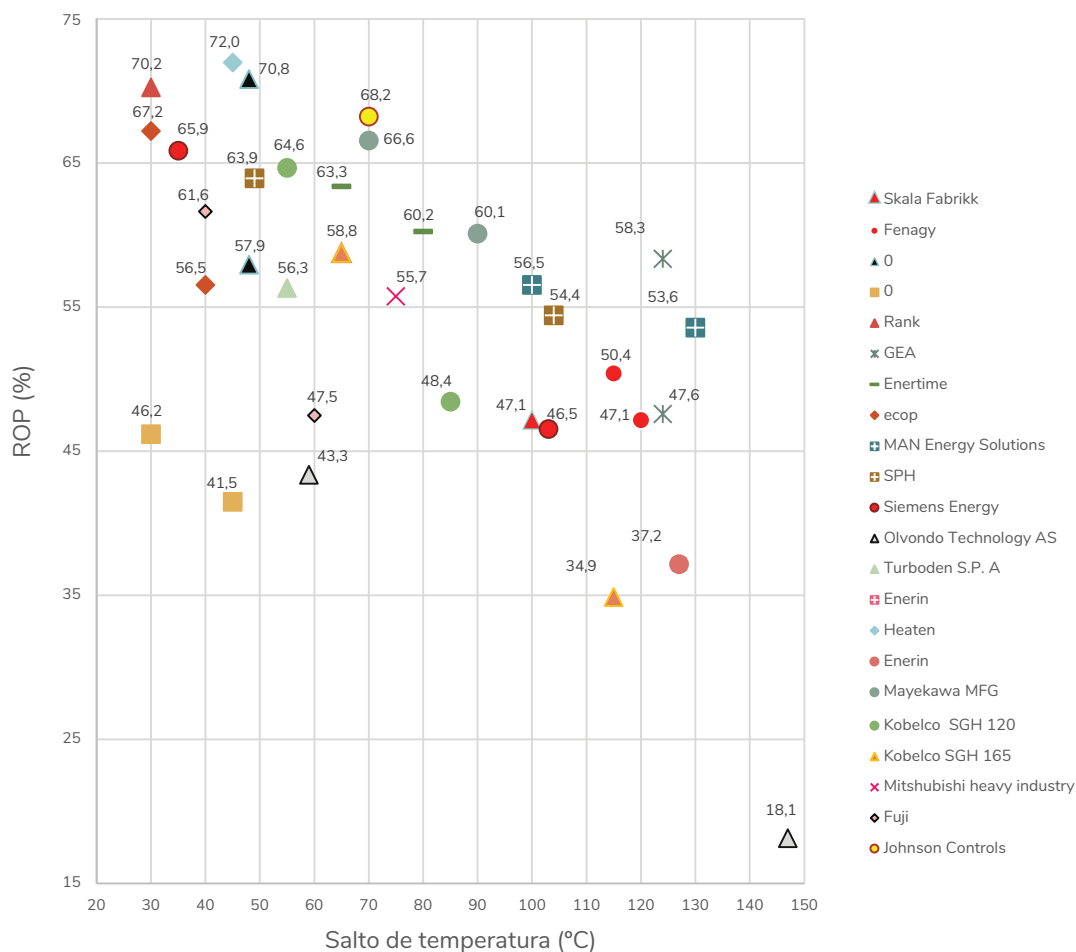


Figura 55: Rentabilidad operacional de los distintos modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado en función del salto de temperatura. Elaboración propia.

El modelo de Heaten es el que mayor rentabilidad operacional ofrece, aunque para un salto de temperatura bajo, 40 °C. Cabe destacar que para un intervalo de salto de temperatura entre 50 y 70 °C los modelos de SPH, Johnson Controls y Kobelco SGH 120 son con los que mayor ahorro en costes operacionales consiguen para temperaturas de suministro de hasta 120 °C. En contraste, en ese mismo intervalo, la BCAT de Olvondo Technology permite ahorros operativos menores, aunque puede emplearse en procesos con un requerimiento de temperatura más exigente. Para un intervalo de 71 a 100 °C, las BCAT de los fabricantes de Enertime y Mayekawa mfg parecen alcanzar valores de rentabilidad muy similares, 60,2 % y 60, 1% respectivamente. Si bien es cierto que, el modelo de Enerin se caracteriza por una temperatura de suministro notablemente superior. En el caso del rango de mayor salto de temperatura, de 101 a 140 °C, destaca el ahorro operacional de los modelos de MAN Energy, SPH y GEA, capaces de suministrar temperaturas de suministro de 150 °C ,165 °C y 130 °C respectivamente. A pesar de ser la BCAT de Olvondo Technology la menos rentable a nivel de reducción de costes operativos, el cálculo se ha realizado a partir de su COP para el salto de temperatura mayor registrado ,147 °C, de todos los modelos de BCAT.

En la siguiente figura se ha representado la rentabilidad operacional de los modelos de compresión mecánica en función de la temperatura máxima de salida del corriente sumidero a la que se ha podido obtener un valor de COP:

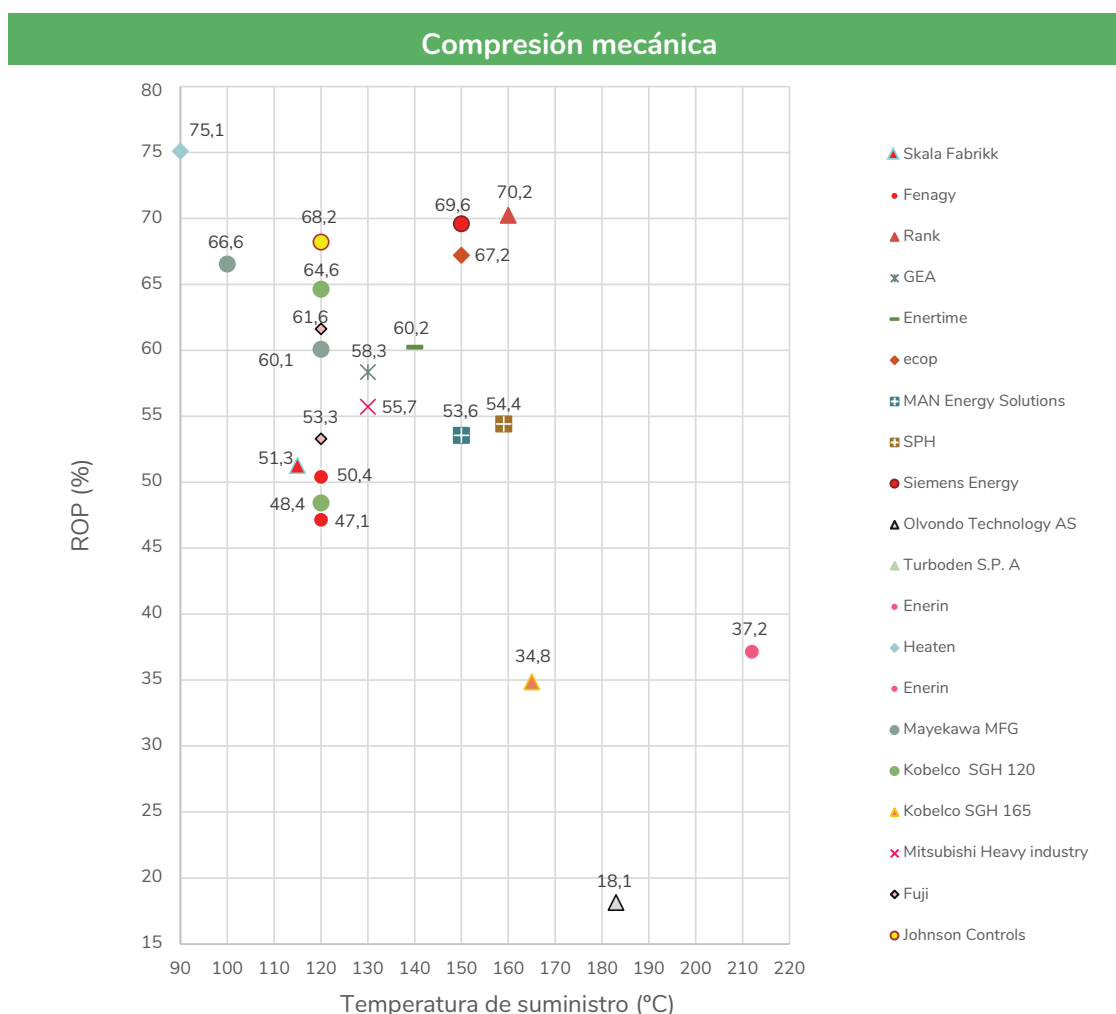


Figura 56: Rentabilidad operacional de los distintos modelos de compresión mecánica en función de la temperatura de operación para la que se ha obtenido el COP. Elaboración propia.

Analizando los datos de la Figura 65, se observa una variabilidad significativa en la rentabilidad operativa entre las diferentes fabricantes y modelos a medida que varía la temperatura máxima, aunque existe una tendencia descendente a medida que si incrementa la temperatura máxima de suministro. Para una temperatura de suministro de 120 °C el modelo de Mayekawa mfg, seguido del modelo de Mayekawa Europe, es el que mayor rentabilidad operacional posee. No obstante; la reducción de costes operativos del primer modelo podría reducirse a 67,3 % si se incrementa el salto de temperatura. En el rango de temperaturas entre 130 y 150 °C, los fabricantes ECOP y Siemens Energy son los que permiten alcanzar mayores rentabilidades operativas. En cambio, el modelo de MAN Energy Solutions, es el que menor ahorro proporciona, si bien sigue consiguiendo un ahorro de costes considerable (53,6 %). En el caso del rango de temperaturas de suministro entre 160 a 175 °C, el fabricante español Rank se posiciona en cabeza con una rentabilidad operacional del 70,2 %, seguido de la BCAT de SPH. Con respecto al rango de temperaturas de 176 a 212 °C, existen tan solo dos modelos de los que se han obtenido sus COP correspondientes, la bomba de calor de Olvondo Technology y el de Enerin, este último, es capaz de alcanzar una temperatura superior a 200 °C manteniendo una rentabilidad operacional relativamente alta (37,2 %). Cabe destacar, que para los modelos de temperatura de suministro máxima superior a 160 °C, no existen datos registrados de su COP a su máxima temperatura de suministro por lo que existe cierta incertidumbre acerca de su rentabilidad económica en dichas condiciones.

Con respecto a la tecnología de sorción, en la siguiente figura se ha representado la rentabilidad operacional de los distintos modelos para un salto de temperatura dado. Se ha incluido también en la gráfica los modelos híbridos de absorción/ compresión de AGO y Hybrid Energy:

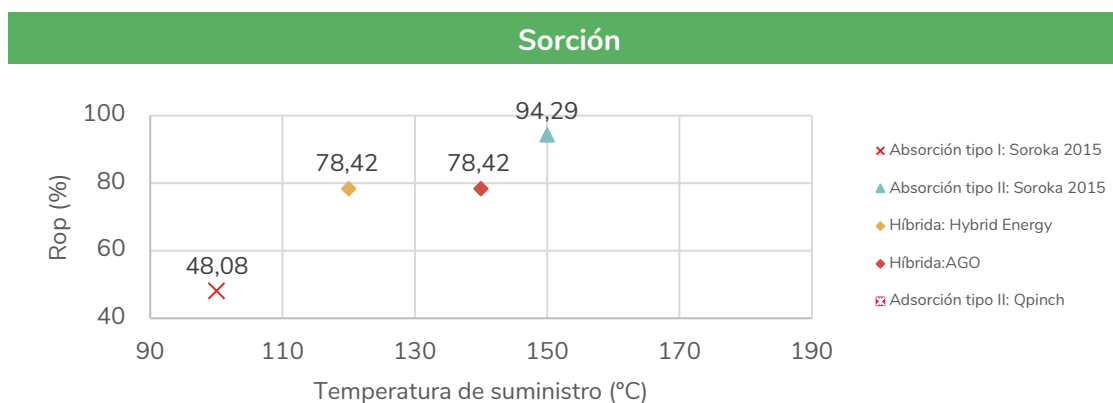


Figura 57: Rentabilidad operacional de los modelos de sorción e híbridos en función de la temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 66 que los modelos de sorción tipo II y los híbridos absorción/compresión permiten alcanzar elevadas reducciones en los costes de operación comparadas con otras tecnologías ya que el consumo de electricidad es menor. Los modelos híbridos se caracterizan por un mayor coste operacional debido al mayor consumo de electricidad con respecto a los modelos de sorción tipo II. No obstante, su rentabilidad operacional sigue siendo sustancialmente mayor que los modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado. Las BCAT de sorción tipo I poseen una rentabilidad notablemente menor, 48,08 %, en comparativa con los modelos de sorción tipo II e híbridos debido a la necesidad de emplear gas natural contemplada en este estudio.

Con el fin de establecer cuál es el COP mínimo de las BCAT en función del precio de la electricidad, se ha igualado a 0 la ecuación 6 y despejado el COP. Este será el valor mínimo del COP necesario para que los costes operativos del uso de una BCAT sean menores que el uso de una caldera de gas natural. Como valor del capital inicial para el cálculo de coste de mantenimiento se ha establecido un valor de 600 €/kW. Se han planteado tres escenarios distintos de precio de gas natural, pero con un rendimiento común de la caldera del 90 %. En la siguiente figura se ha representado el análisis de la variación del COP crítico con respecto al precio de la electricidad.

Análisis COP crítico en función del precio del gas natural

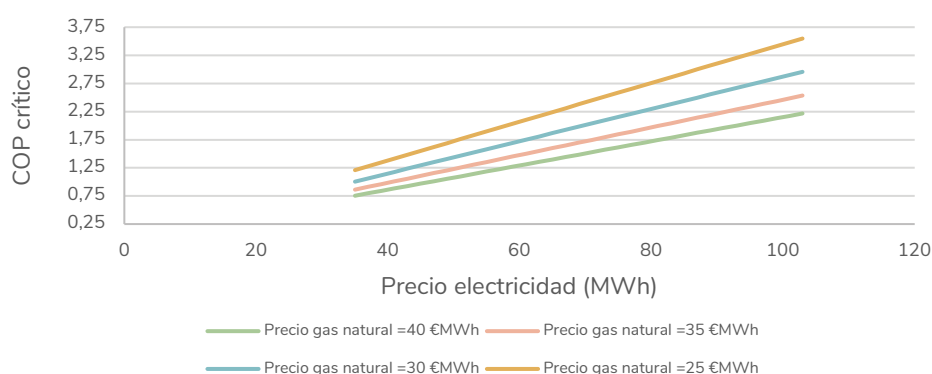


Figura 58: COP crítico de las BCAT en función del precio de la electricidad y del gas natural. Elaboración propia.

9.3 Periodo de recuperación de la inversión

Este apartado se enfoca en el examen detallado de los periodos de recuperación de la inversión de diversos modelos, un factor determinante en la evaluación de la rentabilidad y eficiencia de estos sistemas. El periodo de recuperación de la inversión refleja el lapso necesario para que los ahorros generados compensen el desembolso inicial, y constituye un barómetro de la atractividad económica de la inversión en estas tecnologías emergentes. Es preciso destacar que, el análisis presentado aquí, no abarca variables como fluctuaciones en el precio de los equipos ni las fluctuaciones en el coste de la electricidad y del combustible fósil. Estas omisiones no disminuyen la relevancia del estudio, sino que delimitan su alcance, enfocándose en un conjunto de factores controlados que permiten una comparación estandarizada entre los distintos sistemas. Por consiguiente, la interpretación de los datos abordados en este documento se hace bajo la premisa de condiciones de coste estáticas, proporcionando así un marco estable para la valoración de los periodos de recuperación de la inversión. Dicho análisis económico podría ser mejorado considerando la evolución futura de los costos de capital y operativos.

En la siguiente ecuación aparece reflejado el método de cálculo para la obtención del periodo de recuperación de la inversión de sustituir una caldera de gas natural por una BCAT, donde PBP es el periodo de amortización, I la inversión y R_{op} la rentabilidad operacional anual:

$$PRI = \frac{I \left(\frac{\text{€}}{\text{kWth}} \right)}{R_{op} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWth año}} \right)} \quad (9)$$

La siguiente figura presenta un análisis comparativo de los periodos medios de recuperación de la inversión para tres tecnologías distintas de bombas de calor: MVR, compresión mecánica y sorción, incluyéndose en este último los modelos híbridos de absorción/compresión.

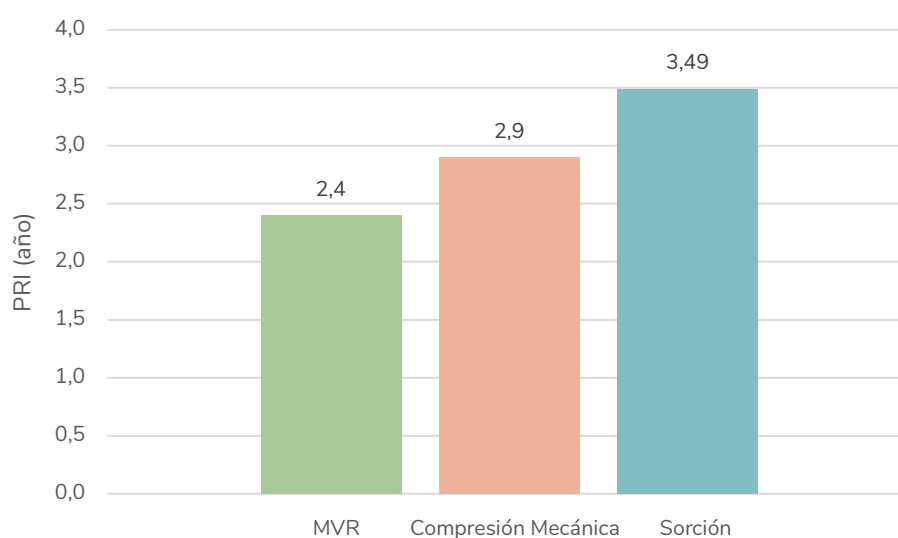


Figura 59: Periodo de recuperación de la inversión (PRI) de las distintas tecnologías de BCAT. Elaboración propia.

En la evaluación del retorno de inversión representada en la Figura 68 y en las siguientes a esta, se han tenido en cuenta no solo el coste inicial de adquisición sino también los costes operativos y de mantenimiento a lo largo de la vida útil de las tecnologías. Los datos obtenidos de periodo medio de recuperación de la inversión indican que la tecnología MVR presenta el menor periodo medio de recuperación de la inversión, seguido de cerca por la compresión mecánica, esto se debe a los bajos costes operativos y de inversión inicial de los modelos MVR. Por el contrario, los sistemas de sorción, si bien permiten reducir notablemente los costes operativos en el caso de los modelos de sorción tipo II e híbridos, su alta inversión debido al transformador de calor, conlleva un periodo de retorno del capital menor.

A continuación, se va a realizar un análisis detallado del periodo de recuperación de la inversión de los distintos modelos de cada una de las tecnologías existentes, en función del salto de temperatura y la temperatura de salida de la fuente sumidero para la que se obtuvo el valor del COP.

La siguiente figura ilustra el periodo de recuperación de la inversión de diferentes BCAT identificadas como MVR en relación con el salto de temperatura que pueden alcanzar.

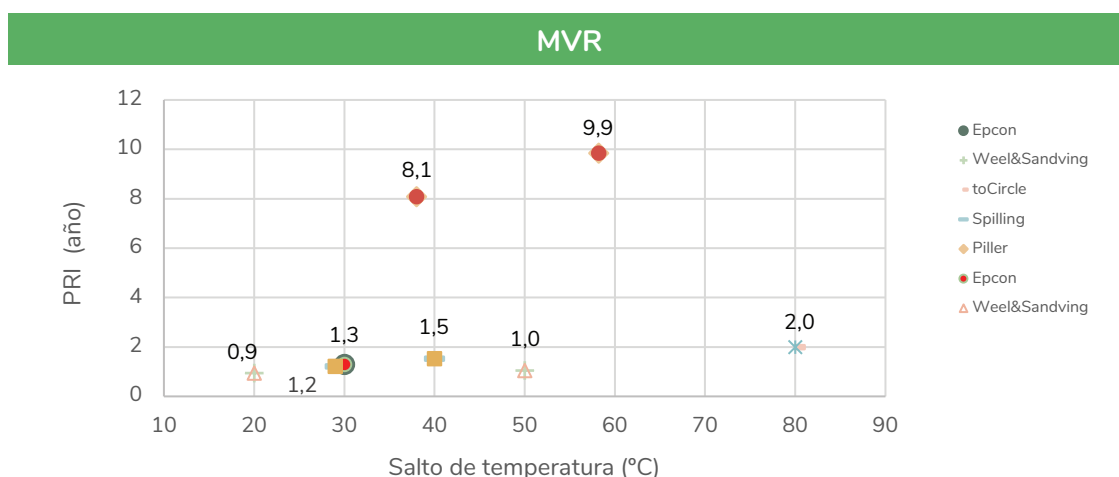


Figura 60: Periodo de recuperación del capital inicial de los distintos modelos MVR en función del salto de temperatura. Elaboración propia.

Los datos expuestos sugieren que, para esta categoría de bombas de calor, los periodos de recuperación del capital inicial son relativamente cortos, todos por debajo o igual a dos años, a excepción del modelo Piller, lo que indica una rápida recuperación de la inversión. Los modelos representados por Weel&Sandving, Epcon y Spilling muestran los periodos de recuperación de la inversión más breves, entre 1-1,5 años. La unidad representada por toCircle exhibe el segundo periodo de recuperación del capital inicial más extenso, aun así, bajo (2 años). Esto, junto con su capacidad para manejar un salto de temperatura sustancial, sugiere que estas bombas de calor pueden ser adecuadas para aplicaciones industriales intensivas que requieren temperaturas más elevadas. Por otro lado, el modelo de Piller es el que mayor periodo de recuperación de la inversión posee, con un valor de 8,1 a 9,9 años debido a la alta inversión inicial requerida con respecto al resto de modelos. La homogeneidad en los periodos de recuperación del capital inicial, en comparación con otras categorías de bombas de calor, resalta la eficacia de las tecnologías MVR en términos de recuperación de la inversión. Este análisis sugiere que las bombas de calor MVR podrían ser una opción económicamente viable para una amplia gama de aplicaciones industriales, especialmente en operaciones donde se valora una recuperación de inversión rápida y existan corrientes de vapor como calor residual.

En la siguiente figura aparecen los periodos de recuperación de la inversión de los distintos modelos MVR en función de la temperatura del corriente sumidero.

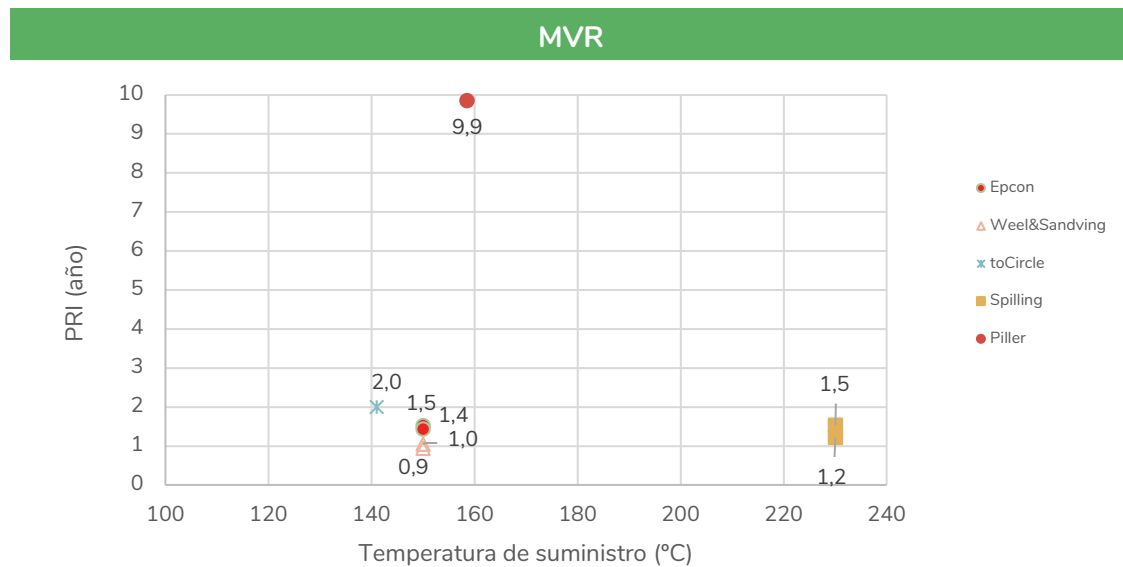


Figura 61: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos MVR en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el vapor del COP. Elaboración propia.

La Figura 70 muestra un análisis del periodo de recuperación del capital inicial para bombas de calor MVR. Para un rango de temperatura de suministro entre 140 y 160 °C, sobresale el modelo de Weel&Sandving con un periodo de recuperación de la inversión de 0,9 años, seguido de la BCAT de Epcon con tan solo 1,4 años. Por el contrario, Piller posee un periodo de recuperación de la inversión de casi siete veces más el resto de los modelos en dicho rango de temperatura de suministro. Con respecto a temperaturas de más de 220 °C, solo existe el modelo de Spilling, el cual puede suministrar dichas temperaturas y, además, con un periodo de recuperación del capital inicial similar al de otros modelos MVR que alcanzan menores temperaturas de suministro.

En la figura plasmada a continuación, se han representado los periodos de recuperación de la inversión de los distintos modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado, en función del salto de temperatura máximo al que se ha podido obtener su valor del COP.

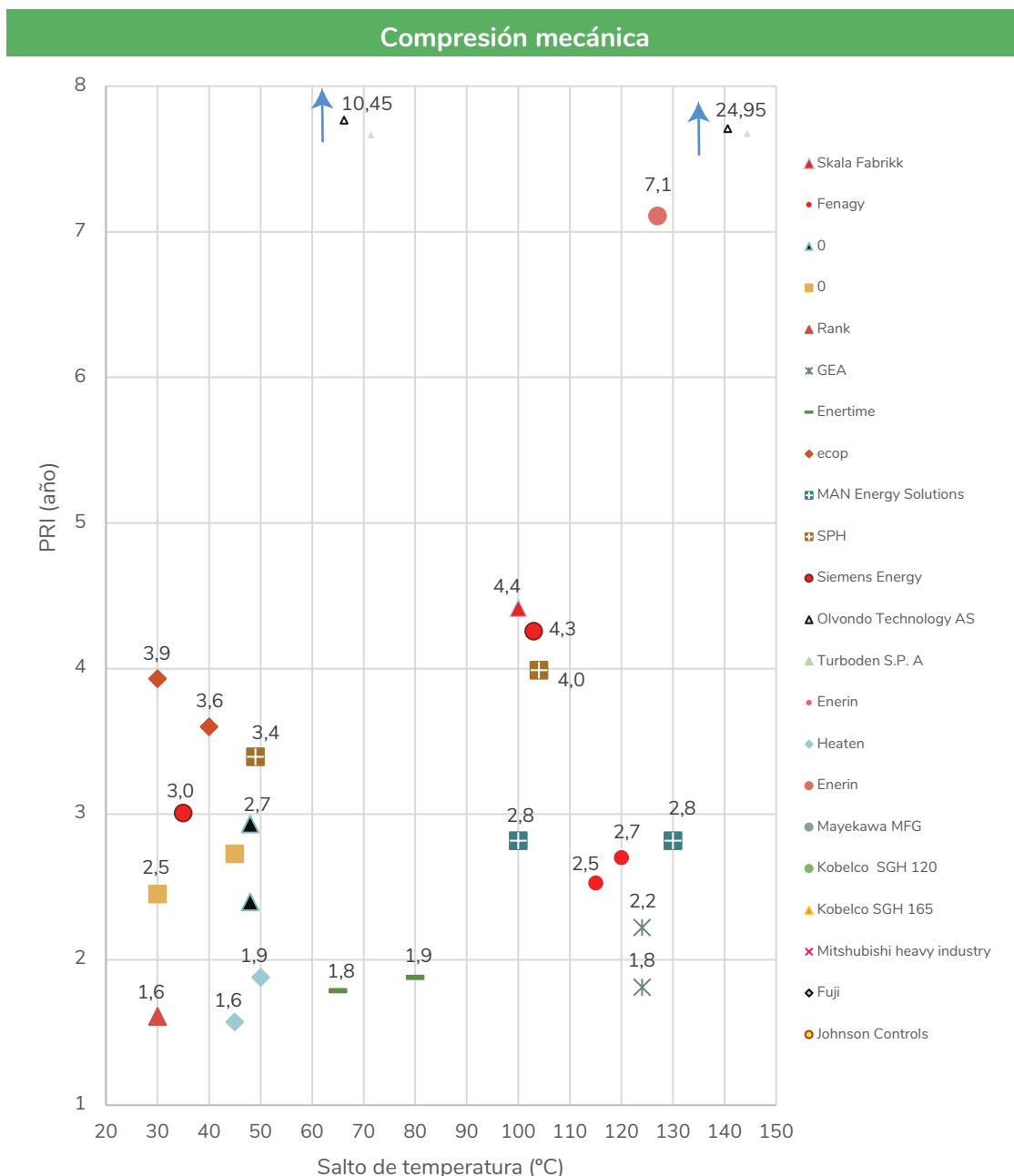


Figura 62: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el valor del COP. Elaboración propia.

La representación de datos de la Figura 71 muestra una considerable dispersión, lo que indica que para un rango de saltos de temperatura de aproximadamente 30 a 150 °C, los periodos de recuperación del capital inicial oscilan entre poco más de un año hasta superar los 24 años. Es destacable que la bomba de calor con el mayor periodo de recuperación del capital inicial, representada por Olvondo Technology con 24,95 años, supera la vida útil típica de 20 años. Se debe tener en cuenta, no obstante, que dicho modelo presenta un salto de temperatura muy por encima a los demás modelos, por lo

que su periodo de recuperación del capital inicial podría ser parecido al de otros fabricantes si se trabajase a menores saltos de temperatura. Por otro lado, varios modelos con saltos de temperatura en el rango de 30 a 50 °C presentan periodos de recuperación del capital inicial agrupados entre 2 y 3,9 años. Esto podría sugerir que, para este segmento de temperatura, existe una convergencia en términos de eficiencia de costes y estrategias de retorno de inversión. Por otro lado, despierta interés los bajos periodos de recuperación de la inversión que podrían conseguirse aun trabajando a alto saltos de temperatura si se empleasen los modelos de GEA, Fenagy y Man Energy, todos ellos inferiores a 3 años. Por último, La BCAT de Enerin posee el segundo periodo de recuperación de la inversión mayor, si bien es cierto que también permite alcanzar altos saltos de temperatura y temperaturas de suministro manteniendo el periodo de recuperación de la inversión por debajo de los 8 años. De la figura puede deducirse que la diversidad en los periodos de recuperación del capital inicial para saltos de temperatura similares puede ser resultado de la mayor importancia de la configuración del ciclo y componentes en esta tecnología, ya que puede ser un factor fundamental para reducir costes operativos y la inversión inicial.

En la siguiente figura se ha representado el periodo de recuperación de la inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de la temperatura de salida de sumidero obtenida.

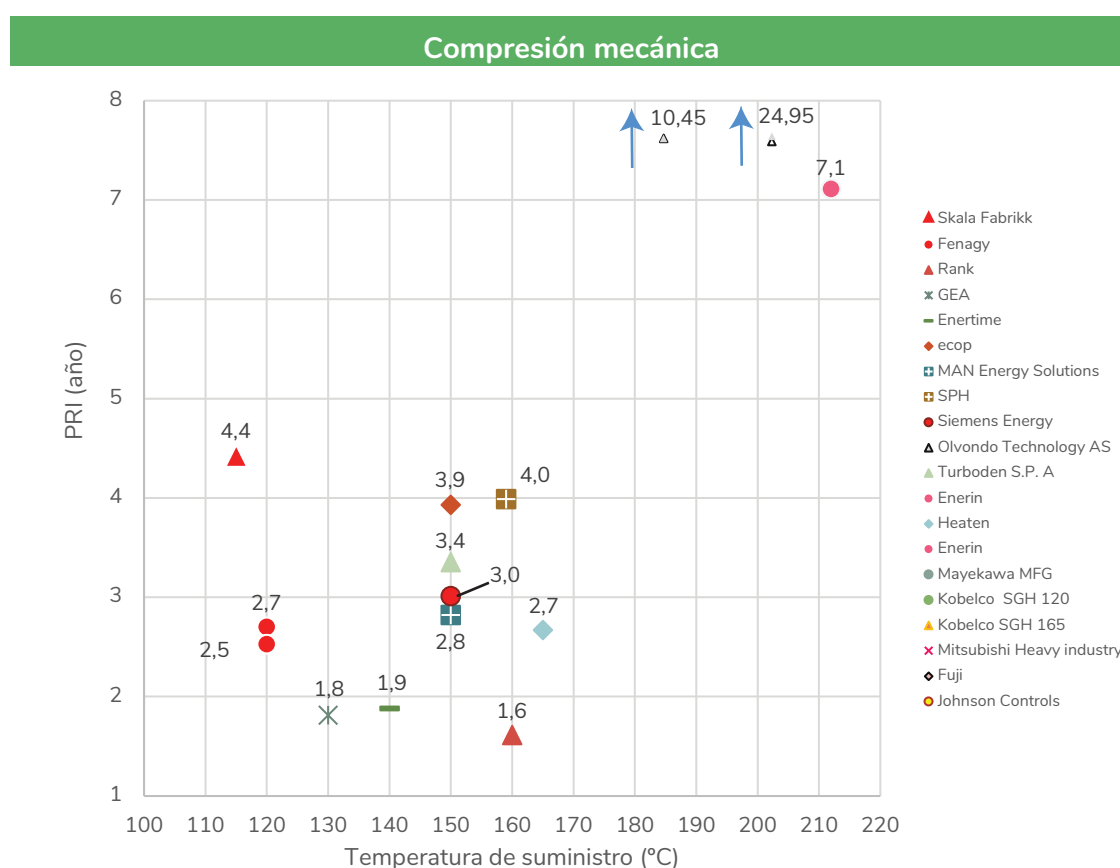


Figura 63: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos de compresión mecánica en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el valor del COP.

Como puede observarse en la Figura 72, los periodos de recuperación de la inversión varían desde aproximadamente 1,6 años hasta los 24,95 años y estos aumentan con la temperatura, lo que sugiere que los costes operativos a mayor temperatura pueden no compensar la inversión tan rápidamente como a temperaturas más bajas. Para un rango de temperaturas entre 110 y 120 °C COMBITHERM presenta el menor periodo de recuperación del capital inicial en dicho rango, 1,9 años, seguido del modelo de Mayekawa Europe con un periodo de recuperación de la inversión de 2,4 años. No obstante; este último modelo, puede presentar un periodo de recuperación del capital inicial mayor, de 3 años dependiendo del salto de temperatura. Acerca del rango de 130 y 140 °C, los únicos dos modelos en ese intervalo se caracterizan por periodos de recuperación de la inversión similares y considerablemente bajos, inferiores a 2 años. En el intervalo de 150 a 165 °C todos los modelos a excepción de la BCAT de Rank con un periodo de recuperación de la inversión menor, permiten periodos de recuperación de la inversión entre los 2 y los 4 años. Por último, sólo existen dos modelos que puedan aportar temperaturas superiores a 180 °C donde es necesario recalcar la BCAT de Enerin con un periodo de recuperación del capital inicial de 7,1 años.

En la siguiente figura se analizan las características económicas de los modelos de sorción y modelos híbridos de absorción/compresión, comparando el periodo de recuperación de la inversión en años con la temperatura máxima de suministro.

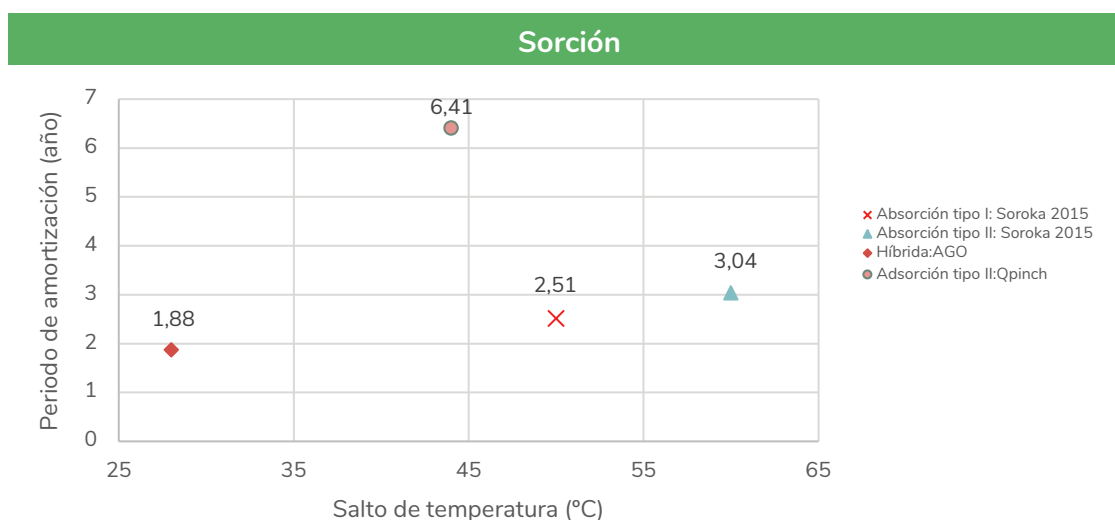


Figura 64: Periodo de recuperación de la inversión de los distintos modelos de sorción en función de la temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.

Los modelos de absorción tipo I, aunque presentan una rentabilidad operacional significativamente menor que otros modelos de sorción, tienen un periodo de recuperación de la inversión corto debido a su baja inversión inicial, siendo solo superado por el modelo del fabricante AGO. Este último modelo destaca por permitir recuperar la inversión inicial en tan solo 1,88 años, gracias a su alta rentabilidad operacional y su inversión relativamente baja. Por otro lado, el modelo Qpinch, aunque ofrece ahorros de costes operativos superiores a los del modelo AGO e Hybrid Energy, tiene un periodo de recuperación del capital inicial más largo, extendiéndose hasta 6,41 años debido a su elevada inversión inicial. Por último, el periodo de recuperación de la inversión las bombas de calor de absorción tipo II bibliográficas presentan un periodo de recuperación del capital inicial relativamente bajo, 3,04, aunque superior a los modelos híbridos y a las BCAT bibliográficas de absorción tipo I debido a la gran inversión necesaria.

10. Evaluación de impactos medioambientales y sociales

Las BCAT permiten reducir el impacto medioambiental de procesos industriales o sistemas de calefacción gracias a su eficiencia energética. Sin embargo, la reducción de gases de efecto invernadero depende en primer lugar, del COP de la BCAT, del mix energético del país y de la fuente de energía empleada.

En la siguiente figura se muestra el mix energético para la producción de electricidad de Europa.

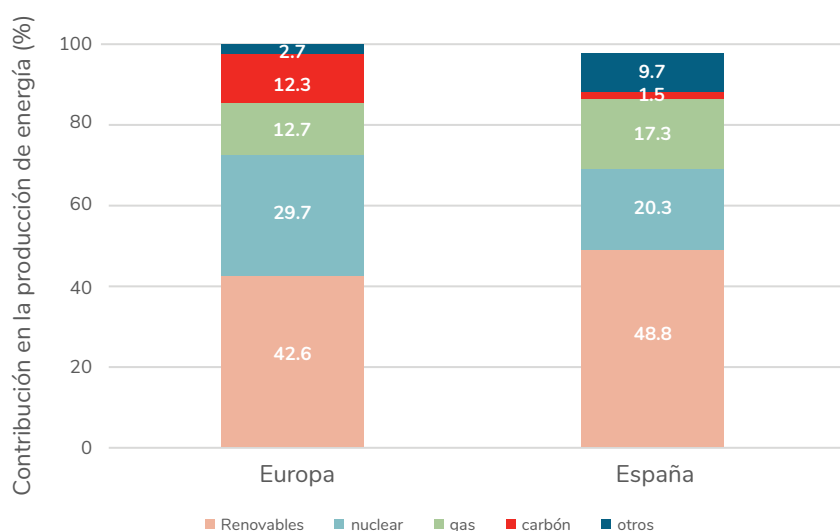


Figura 65: Mix energético de la generación eléctrica en España y Europa. Elaboración propia [102],[103].

Gracias a la alta contribución de fuentes renovables y el uso muy limitado del carbón en la producción de electricidad en la producción de electricidad, el impacto medioambiental de la electricidad usada por las BCAT será bajo.

Cabe destacar que, si bien es cierto que es cada vez menos frecuente el uso de energía térmica primaria como fuente motriz de compresores o como fuente de calor en modelos de sorción tipo I, pueden darse modelos que puedan emplear combustibles fósiles aumentando con ello el impacto medioambiental. En la Figura 76 se ha realizado la evaluación del ciclo de vida de una BCAT, una caldera de gas natural y una caldera de gasóleo en función de las categorías de impacto. Se debe tener en cuenta que, en función de la tecnología empleada, de la fuente de energía motriz del sistema, así como la evaluación del ciclo de vida, pueden variar considerablemente los valores de impactos medioambientales. Como puede observarse en dicha gráfica, las BCAT no sólo requieren de una menor exigencia exergética, sino que también se reducen las pérdidas exergéticas.

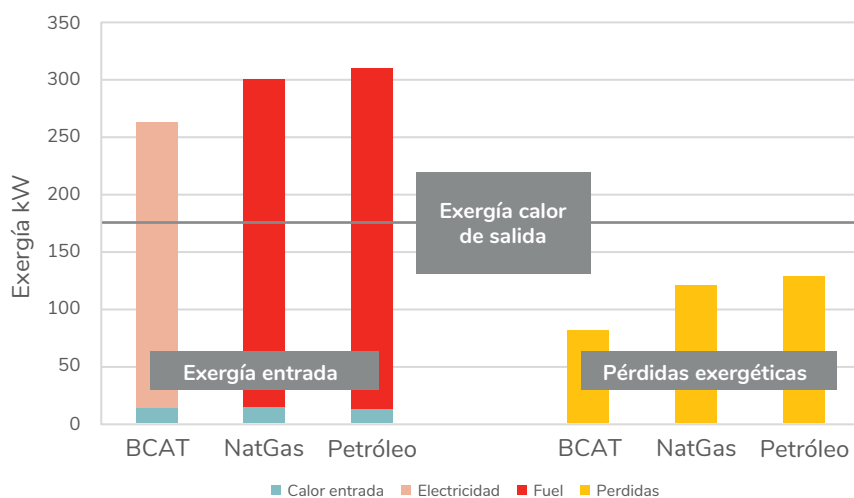


Figura 66: Comparativa del requerimiento exergéticos y entre las pérdidas exergéticas de las BCAT, una caldera de gas natural y una caldera de gasolina para una temperatura de 180 °C y potencia de 250 kW [104].

Otro factor fundamental para el estudio del impacto medioambiental de las BCAT es la categorización de los impactos de una BCAT a lo largo de su ciclo de vida. En especial, se consigue debido a los siguientes hechos:

- Permite reducir el cambio climático al producir menor CO₂ que las calderas convencionales.
- La acidificación del territorio se ve limitada gracias a la pequeña producción de SO₂.
- Disminuye la radiación ionizante y la ecotoxicidad acuática.
- Se produce menor cantidad de C₂H₃Cl contribuyendo a disminuir el efecto carcinógeno.

En la siguiente tabla aparecen recogidas los impactos medioambientales de las BCAT y las calderas convenciones de gas natural y derivados del petróleo:

Categoría de impacto	Unidad	Gas natural	Derivados del petróleo	BCAT
No carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3,44x10 ³	3,94x10 ³	9,44x10 ²
Carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	5,41x10 ³	6,24x10 ³	3,60x10 ³
Inorgánicos respiratorios	kg PM2.5 eq	8,79x10 ¹	1,09x10 ²	3,75x10 ¹
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	1,0x10 ⁶	1,10x10 ⁶	2,27x10 ⁵
Destrucción capa de ozono	kg CFC-11 eq	2,49x10 ³	2,70x10 ³	2,72x10 ³
Orgánicos respiratorios	kg C ₂ H ₄ eq	1,68x10 ¹	2,09x10 ¹	8,28x10 ¹
Ecotoxicidad acuática	kg TEG agua	1.20x10 ⁷	1.41x10 ⁷	9,06x10 ⁶
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG suelo	4,86x10 ⁶	6,51x10 ⁶	3,17x10 ⁶

Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	1,00x10 ³	1,17x10 ³	5,17x10 ²
Ocupación del suelo	m ² arable	6,21x10 ²	9,97x10 ²	4,20x10 ²
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq	3,44 10 ²	3,94x10 ²	2,591x10 ²
Eutrofización del agua dulce	kg PO ₄ P-lim	8,95x10 ¹	1,03x10 ²	6,85x10 ¹
Cambio climático	kg CO ₂ eq	4,78x10 ⁴	5,24x10 ⁴	7,79x10 ³
Energía no renovable	MJ primaria	9,40x10 ⁵	8,44x10 ⁵	7,56x10 ⁵
Extracción mineral	MJ superávit	8.17x10 ⁴	1.03x10 ⁵	6.881x10 ⁴

Tabla 28: Evaluación y caracterización de daños de las BCAT y las calderas de combustible fósil [104].

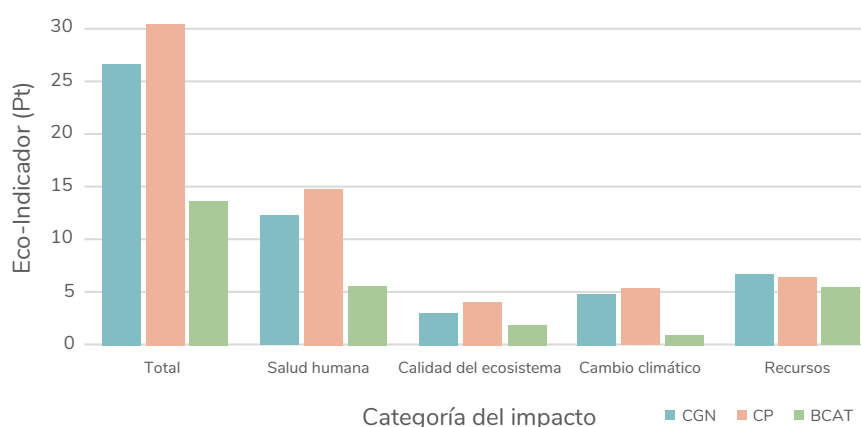


Figura 67: Evaluación del ciclo de vida de una BCAT, una caldera de gas natural y una caldera de gasóleo en función de las categorías de impacto [104].

El análisis de la Figura 76 revela que las BCAT son significativamente menos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana en comparación con las Calderas de Gas Natural (CGN) y las Calderas de Derivados del Petróleo (CP). Las BCAT destacan particularmente en la reducción del impacto total, debido a la mejora de la salud humana, la preservación de la calidad del ecosistema y la mitigación del cambio climático.

Con relación al impacto social, una de las implementaciones más habituales de las BCAT, además de su uso en procesos industriales, es en sistemas de calefacción urbana, lo que permite reducir el consumo de combustible fósil. El valor de la reducción del consumo de gas satisface a la sociedad al contribuir a un bien público (por ejemplo, contribuir al objetivo nacional de eliminar el consumo de gas natural), más allá del impacto de su contribución en el bien público en cuestión, lo que en la literatura económica se conoce como *warm-glow giving* [105]. El uso de BCAT para sistemas de calefacción, en función del ratio precio electricidad/combustible fósil y del COP del equipo, puede permitir periodos de recuperación de la inversión relativamente bajos, 2,18 años [106].

Las BCAT tienen el potencial de mitigar significativamente el impacto social asociado con la industria, principalmente a través de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Al utilizar electricidad para generar calor, en lugar de la combustión de combustibles fósiles, las BCAT disminuyen notablemente la liberación de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos. Esta reducción en emisiones contribuye a mejorar la calidad del aire, lo cual tiene un impacto positivo directo en la salud pública, disminuyendo la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en comunidades cercanas a instalaciones industriales. Igualmente, la integración de BCAT en procesos industriales favorece la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, promoviendo así una industria más verde y responsable. Esta transición no solo reduce la huella de carbono de las empresas, sino que también las prepara para cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas, mejorando su aceptación social y contribuyendo al desarrollo sostenible.

El uso de BCAT también puede incentivar la innovación tecnológica y la modernización de la infraestructura industrial, creando oportunidades para empleos verdes y mejorando la competitividad económica. En conjunto, estas bombas de calor no solo disminuyen los impactos negativos de la industria en el medio ambiente, sino que también fomentan un desarrollo económico y social más sostenible y equitativo.

11. Conclusiones

Existencia de un marco legal favorable para el despliegue masivo de las BCAT.

El marco legal es crucial para garantizar el despliegue seguro y eficiente de las BCAT, asegurando su conformidad con las normativas vigentes. Las autoridades han implementado regulaciones específicas para abordar la eficiencia energética, la calidad y seguridad de los equipos, las emisiones de gases refrigerantes y los estándares tanto de instalación como de mantenimiento. Estas normativas buscan asegurar que las BCAT contribuyan efectivamente a los objetivos de sostenibilidad energética y ambiental. A nivel europeo, destacan normativas como la Directiva (UE) 2023/1791, enfocada en la eficiencia energética y la neutralidad climática para 2050, y el Reglamento (UE) 2024/573, que impone una reducción gradual de hidrofluorocarbonos (HFCs). Otras regulaciones importantes incluyen la Directiva (UE) 2023/2413 para la promoción de energía renovable y el Reglamento sobre la Industria de Cero Emisiones Netas, que facilita inversiones en tecnologías ecológicas. En el ámbito nacional, el Real Decreto 36/2023 establece un sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAE), mientras que el Real Decreto 712/2022 regula el Impuesto sobre los Gases Fluorados de Efecto Invernadero. Además, el Real Decreto 1055/2022 promueve el incremento gradual de envases reutilizables, con implicaciones significativas en el transporte y la logística.

Las temperaturas de entrega de calor son suficientemente elevadas para satisfacer una parte muy importante de la demanda de calor en la industria:

- Los sistemas de ciclo abierto pueden generar entre 80 y 350 °C.
- Los sistemas de ciclo cerrado pueden alcanzar los 200°C (compresión mecánica) y hasta 250°C (sorción).
- Los sistemas híbridos (integran sorción y compresión mecánica) pueden alcanzar hasta 150°C.

Con respecto a las tecnologías existentes, se pueden clasificar las BCAT en sistemas de ciclo cerrado y de ciclo abierto. Las bombas de calor de ciclo abierto renuevan

constantemente el fluido de trabajo. Estas últimas, incluyen tecnologías como la recompresión térmica del vapor (TVR) y la recompresión mecánica del vapor (MVR), alcanzando temperaturas hasta los 350 °C y 280 °C respectivamente. La tecnología TVR utiliza un eyector accionado por vapor de alta presión. Estos sistemas son económicos, de mantenimiento sencillo y mayor vida útil, aunque presentan baja eficiencia mecánica y flexibilidad. Por otro lado, la recompresión mecánica del vapor (MVR) recupera energía al comprimir vapor de baja presión, alcanzando temperaturas entre 80 °C y 280 °C. Esta tecnología es eficiente en columnas de destilación, pero requiere un compresor adecuado.

Con respecto a los sistemas de ciclo cerrado, en ellos podemos encontrar BCAT de sorción y compresión mecánica. Las BCAT de sorción utilizan energía térmica para alcanzar temperaturas entre 90 °C y 250 °C y pueden ser de absorción o adsorción. En la absorción, se mezcla refrigerante y absorbente, logrando mayores temperaturas y COP en ciclos de simple, doble o triple efecto, utilizando comúnmente mezclas como LiBr/H₂O y NH₃/H₂O. En la adsorción, se utilizan materiales como zeolitas y carbones activados para adsorber refrigerantes, siendo más costosos y con menor COP, pero adecuados para aplicaciones intermitentes.

Las BCAT de compresión mecánica pueden clasificarse en compresión de gas o de vapor. Las BCAT de compresión mecánica de vapor, alcanzan temperaturas de hasta los 200 °C. Estas bombas, ampliamente empleadas por su simplicidad y rendimiento estable, utilizan energía eléctrica para generar calor a altas temperaturas. Según el número de etapas de compresión y configuración, se clasifican en mono etapa, doble etapa y compresión en cascada, siendo las de multietapas, junto con los sistemas en cascada, las que mayores temperaturas de suministro aportan. Pueden operar en ciclos subcríticos, donde el refrigerante se condensa, o en ciclos transcíticos, donde se rechaza el calor por encima de la presión crítica del refrigerante sin cambio de fase. Las etapas básicas de este tipo de bombas incluyen la evaporación, compresión, condensación/enfriamiento y expansión. Por otro lado, las BCAT de compresión de gas se clasifican a su vez en ciclos Stirling o ciclo Rankine inverso. El ciclo Stirling inverso utiliza un proceso de compresión y expansión de gas a temperatura constante. Se caracte-

riza por ser eficiente para altos saltos de temperatura y compatible con fuentes de energía renovable. Por último, el ciclo Brayton inverso, que emplea una turbina como medio expansor sin cambio de estado del fluido de trabajo, está en desarrollo y tiene gran potencial para altas temperaturas.

Los sistemas híbridos de ciclo cerrado combinan absorción y compresión mecánica, ofreciendo mayor flexibilidad y eficiencia energética, alcanzando temperaturas de hasta 150 °C.

Las BCAT pueden utilizar diversas fuentes de energía. Los sistemas MVR pueden usar como fuente impulsora motores eléctricos, de combustión interna o una turbina de vapor, mientras que los TVR solo utilizan vapor. Las bombas de absorción y adsorción tipo I pueden utilizar la combustión, vapor, energía solar o geotérmica, mientras que las BCAT de absorción o adsorción tipo II aprovechan el calor residual. Los modelos de compresión mecánica emplean como fuente impulsora un motor eléctrico o de gas, siendo el primero el más común.

En el análisis de los componentes de las BCAT, existen varios elementos esenciales. Los dispositivos principales para elevar la presión de gases incluyen soplantes, ventiladores y compresores. Los compresores, fundamentales para aumentar la presión y la energía térmica de un fluido compresible, pueden ser abiertos, semiabiertos y herméticos, y se dividen en compresores de desplazamiento positivo (alternativos y rotativos) y dinámicos (centrífugos y axiales). Los soplantes y ventiladores, utilizados principalmente en ciclos MVR, incrementan en menor medida que los compresores la presión del refrigerante. El evaporador es otro elemento fundamental de las BCAT. Es el encargado de transformar un fluido líquido en gaseoso, pudiendo ser de expansión seca o inundado. Por otro lado, el condensador convierte el fluido de trabajo de gas a líquido y es utilizado en sistemas de ciclo cerrado. Los elementos de expansión, como tubos capilares y válvulas de expansión, regulan el flujo y la presión del fluido hacia el evaporador en los ciclos de compresión mecánica. En cuanto a las bombas de calor de absorción, los absorbentes maximizan la interfaz entre vapor y absorbente mediante sistemas de película descendente y adiabáticos. Por otro lado, en las bombas de calor de adsorción, el diseño del lecho del adsorbente es crucial, mejorando la transferencia de calor y masa y aumentando el COP del sistema.

En el mercado se pueden encontrar BCAT de muy alta potencia (hasta 70 MW térmicos) y presión de generación de vapor (40 bar), dependiendo de la tecnología y foco de calor.

Existe una gran variedad de modelos industriales de BCAT. Entre los modelos MVR, destacan los de los fabricantes Epcon, Weel&Sandving, Kobelco, Piller y Spilling. La empresa Epcon ofrece modelos que alcanzan una temperatura de descarga de 150 °C y un COP entre 5,5 y 13, con potencias de 0,5 MW_{th} a 100 MW_{th}, sin necesidad de lubricación adicional. Weel&Sandving fabrica una BCAT versátil que puede operar en lazo abierto o cerrado, utilizando un turbocompresor y agua (R718) como refrigerante. Puede alcanzar temperaturas de 145 a 160 °C, con potencias de 1 a 5 MW_{th} y un COP de 13 para una etapa simple y 5 para doble etapa. Kobelco ofrece una BCAT con compresor de tornillo, capaz de comprimir vapor de 110-120 °C a 145-175 °C, con inyectores de agua, con el fin de limitar el impacto de las altas temperaturas y separadores de drenaje. Piller proporciona turbosoplantes radiales y compresores que alcanzan temperaturas de descarga de 230 °C y 21 bar, con un máximo incremento de temperatura por etapa de 20 °C y caudales superiores a 57 t/h. La potencia varía entre 1 y 70 MW_{th}. Por otro lado, Spilling ofrece un compresor modular de pistón, con una relación de compresión máxima de 3 por etapa e incrementos de hasta 100 °C en total, alcanzando temperaturas de descarga de 280 °C y potencias de 1 a 15 MW_{th}, sin utilizar aceite y asegurando altas eficiencias para un factor de carga desde el 30 % al 100 %.

En el campo de la tecnología TVR, Baelz y Gig Karasek destacan por sus modelos capaces de alcanzar incrementos de temperatura de 10-20 °C por etapa. Baelz utiliza termocompresores para compresión del vapor con presiones superiores a 40 bares, alcanzando temperaturas de hasta 240 °C, que pueden incrementarse a 350 °C con un enfriador adicional. Gig Karasek ofrece BCAT para vapores con presiones de 80 mbar a 6 bar y temperaturas de 200 °C, con caudales de vapor entre 5 y 150 t/h.

En la categoría de sorción, Johnson Controls y Ebara Refrigeration Equipment & System Co. fabrican BCAT de absorción tipo II que suelen usar LiBr/H₂O como refrigerante. Además, Qpinch ha desarrollado una BCAT de adsorción tipo II que alcanza temperaturas de hasta

250 °C, utilizando ácido fosfórico como fluido de trabajo. Por último, en el ámbito de la compresión mecánica, existen gran número de BCAT de compresión de vapor de fabricantes como Johnson Controls, Fuji Electric, Mayekawa mfg, Siemens Energy y Kobelco entre otros. Estos fabricantes ofrecen modelos que varían en capacidades y temperaturas máximas, utilizando diferentes refrigerantes y configuraciones de compresores para optimizar el rendimiento y la eficiencia energética. En la actualidad, ya existen modelos que trabajan con un ciclo Stirling, como es el caso del Fabricante Enerin y Olvondo Technology, permitiendo alcanzar grandes saltos de temperatura y temperaturas de suministro de hasta 200 y 250 °C respectivamente en sistemas cerrados.

Los nuevos refrigerantes empleados combinan bajos ODP y GWP, y se alcanzan unos COP de 3 a 13 dependiendo de la tecnología de la BCAT y la aplicación concreta.

La selección de refrigerantes para BCAT se basa en criterios de sostenibilidad ambiental, eficiencia, seguridad, coste y disponibilidad. Los refrigerantes más sostenibles tienen un bajo potencial de destrucción de ozono (ODP) y un bajo potencial de impacto invernadero (GWP). La adecuación térmica es crucial, con una diferencia de 10-15 °C entre la temperatura crítica del refrigerante y la temperatura de condensación deseada. La eficiencia del proceso depende de altos COP y bajos requerimientos de sobrecalentamiento. La seguridad es también un factor clave, prefiriendo refrigerantes con baja toxicidad e inflamabilidad. Los refrigerantes naturales e hidrocarburos, como el agua (R718), el isobutano (R600a) el amoníaco (R717) y el CO₂ (R744), son cada vez más utilizados por su baja huella ambiental. Otros refrigerantes incluyen HFCs, HFOs, y HCFOs, cada uno con características específicas de temperatura crítica, presión crítica, y GWP. Las propiedades termodinámicas, como la presión de vapor, viscosidad y densidad también afectan la selección del refrigerante, aunque uno de los criterios fundamentales para la selección del refrigerante es el salto de temperatura.

El coeficiente de rendimiento (COP) de una bomba de calor se define como la relación entre la potencia calorífica y la potencia útil absorbida por el equipo. Un COP más alto indica una mayor eficiencia en la conversión de energía en calor útil, lo que es crucial para optimizar la eficiencia energética, reducir costes operativos y el impacto ambiental. Existen numerosas configuraciones de

ciclo que persiguen mejorar el funcionamiento de las BCAT como son el uso de eyectores, de economizadores, subenfriadores externos y tanques flash, así como configuraciones de compresión multietapa o paralela, ciclos en cascada y el uso de múltiples condensadores.

La integración de BCAT en la industria requiere conocimientos especializados que son difíciles de encontrar, y los usuarios finales a menudo desconocen sus necesidades de calefacción, lo que complica la identificación de oportunidades para su implementación. Además, los largos periodos de recuperación de la inversión desincentivan a los usuarios, y las limitaciones en la temperatura máxima de suministro impiden en cierto grado su integración industrial. No obstante, se están desarrollando actualmente en Europa una gran cantidad de proyectos de I+D que buscan hacer más atractivas a las BCAT para su uso industrial y para redes de calefacción urbana.

Sectores como papel, textil y alimentación podrían cubrir toda su demanda de calor con BCAT. El sector químico lo podría hacer en un 25% y el de los metales, entre un 10 y un 20%.

Actualmente, las BCAT son viables para sectores industriales que trabajan en un rango de temperatura entre 80-250 °C, como el papel, textil, alimentación y tabaco. En sectores como el hierro, acero y metales no ferrosos, las BCAT pueden cubrir un 10-20 % de la demanda térmica, mientras que, en el sector químico, alrededor del 25 % de la demanda de calor puede conseguirse mediante BCAT. La integración de BCAT requiere fuentes de calor adecuadas, como calor residual de procesos industriales, sistemas de refrigeración, agua de refrigeración, aire con alto contenido de humedad y fuentes de energía renovables. En Europa, los sectores con mayor potencial de uso de BCAT son el del papel, la alimentación y el químico, debido a sus corrientes de calor residual y las temperaturas demandadas. Las BCAT también tienen aplicaciones potenciales en almacenamiento energético. Estos sistemas pueden almacenar electricidad en forma de calor y convertirlo nuevamente en electricidad cuando sea necesario. En cuanto a la implementación industrial, existen varias plantas que ya operan con tecnologías BCAT, como MVR, compresión mecánica y sorción.

Si bien las inversiones son elevadas (en el entorno de 1.200 €/kW térmico), el ahorro en costes operativos respecto al uso de gas natural puede ser de entre el 54% (BCAT de compresión mecánica) y el 74% (BCAT

de sorción). Ello arroja unos periodos de retorno simple de entre 2 y 10 años, dependiendo del grado de utilización.

Desde un punto de vista económico, la inversión inicial en BCAT puede ser significativa, de hasta 1200 €/kWh, pero se compensa con la reducción de costes operativos. Las tecnologías MVR son las más económicas en términos de inversión, mientras que las de sorción tipo II son las más costosas debido al transformador de calor. La rentabilidad operacional de las BCAT varía según el modelo y la tecnología, con ahorros de costos operativos significativos en comparación con el uso de gas natural que pueden variar desde un 54 % para el caso de sistemas de compresión mecánica, hasta un 78 % si se emplea modelos de sorción. También existen diferencias en el periodo de recuperación de la inversión en función de la tecnología empleada. Las BCAT MVR suelen poseer menor periodo de recuperación del capital inicial debido a su rentabilidad operacional y bajo coste de inversión. Los modelos de compresión mecánica presentan gran variabilidad en el periodo de recuperación de la inversión, en función del salto de temperatura en el que trabajan y la configuración del ciclo afectando en su COP, y por ello en su rentabilidad operacional. Los modelos de sorción se caracterizan por periodos de recuperación de la inversión entre 2 y 7 años.

La reducción de emisiones equivalentes de CO₂ por el uso de BCAT respecto al uso de combustibles fósiles es casi total, sobre todo en países como España, donde el mix eléctrico es muy renovable.

Las BCAT permiten reducir el impacto medioambiental de los procesos industriales y sistemas de calefacción gracias a su alta eficiencia energética. Sin embargo, la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) depende del COP de la BCAT y del mix energético del país. En España, la alta contribución de fuentes renovables y el uso limitado de carbón en la producción de electricidad hacen que el impacto medioambiental de las BCAT sea bajo. Aunque algunas BCAT pueden usar energía térmica primaria o combustibles fósiles, lo cual incrementaría su impacto medioambiental. Las BCAT requieren menores necesidades exergéticas y reducen las pérdidas exergéticas en comparación con las calderas de gas natural o de derivados del petróleo. Esto se traduce en una menor producción de CO₂, SO₂, y otros contaminantes. En su ciclo de vida, las BCAT tienen un menor impacto en la acidificación terrestre y acuática, radiación ionizante, y ecotoxicidad acuática y terrestre, en comparación con las calderas convencionales. Los impactos medioambientales de las BCAT, evaluados en diferentes categorías, muestran que producen menos carcinógenos, y respirables inorgánicos y orgánicos que las calderas de gas natural y derivados de petróleo.

En términos sociales, las BCAT pueden reducir el consumo de combustibles fósiles, mejorando la calidad del aire y disminuyendo las enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Esto, junto con la promoción de energías limpias, contribuye a una industria más verde y responsable. La implementación de BCAT en sistemas de calefacción urbana o industrial permite recuperar la inversión en periodos relativamente cortos, impulsando la modernización de infraestructuras industriales y creando empleos verdes.

Bibliografía

- **[1]** Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativa a la eficiencia energética y por la que se modifica el Reglamento (UE) 2023/955 (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE). (2024,23 abril) (España).BOE, (81239). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-81299>
- **[2]** Reglamento Delegado (UE) 2023/807 de la Comisión de 15 de diciembre de 2022 relativo a la revisión del coeficiente de energía primaria para la electricidad en aplicación de la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. (2024,23 abril) (España).BOE, (81239). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-80525>
- **[3]** Directiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de octubre de 2023 por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de fuentes renovables y se deroga la Directiva (UE) 2015/652 del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/dc3cfd8-778e-11ee-99ba-01aa75ed71a1/language-es>
- **[4]** Reglamento (UE) 2023/956 del Parlamento Europeo y del Consejo de 10 de mayo de 2023 por el que se establece un Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono. (2024,23 abril) (España). BOE, (80661). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-80661>
- **[5]** Reglamento (UE) 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2024, sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937, y se deroga el Reglamento (UE) nº 517/2014. (2024,23 abril) (España).BOE,(80661)
- **[6]** Ley sobre la industria de cero emisiones netas. (s. f.). Comisión Europea. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_es
- **[7]** Normas de diseño ecológico para garantizar los productos sostenibles en la UE | Temas | Parlamento Europeo. (2023, 7 mayo). Temas | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230629STO01708/normas-de-diseno-ecologico-para-garantizar-los-productos-sostenibles-en-la-ue>
- **[8]** Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, por el que se establece un sistema de Certificados de Ahorro Energético. (2024,23 abril) (España). BOE,(10349). BOE-A-2023-2027 Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, por el que se establece un sistema de Certificados de Ahorro Energético.
- **[9]** Orden TED/815/2023, de 18 de julio, por la que se desarrolla parcialmente el Real Decreto 36/2023, de 24 de enero, por el que se establece un Sistema de Certificados de Ahorro Energético. (2024,23 abril) (España). BOE, (104836). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-16734
- **[10]** Orden TED/296/2023, de 27 de marzo, por la que se establecen las obligaciones de aportación al Fondo Nacional de Eficiencia Energética en el año 2023. (2024,23 abril) (España). BOE, (46083). <https://www.boe.es/eli/es/o/2023/03/27/ted296>
- **[11]** Orden TEC/544/2019, de 25 de abril, por la que se constituye y regula el registro unificado sobre certificados y centros de formación de gases fluorados. (2024,23 abril) (España). BOE, (51659). <https://www.boe.es/eli/es/o/2019/04/25/tec544>
- **[12]** Real Decreto 712/2022, de 30 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre los Gases Fluorados de Efecto Invernadero. (2024,23 abril) (España). BOE, (14274). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/08/30/712/con>
- **[13]** Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases. (2024,23 abril) (España). BOE, (22690). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/27/1055/con>
- **[14]** Klute, S., Budt, M., Van Beek, M., & Doetsch, C. (2024b). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. Energy Conversion and Management, 299, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>
- **[15]** Coronas, A.(2018,17-octubre). Bombas de calor de alta temperatura para aplicaciones industriales. Conferencia sobre las bombas de calor de alta temperatura. Elche, Alicante, España. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=bzYMup4RDPU>
- **[16]** El-Dessouky, H., & Ettouney, H. (2002c). Single effect evaporation – vapor compression. En Elsevier eBooks

- (pp. 49-146). <https://doi.org/10.1016/b978-044450810-2/50005-1>
- [17] Kiss, A. A., Landaeta, S. J. F., & Ferreira, C. I. (2012b). Towards energy efficient distillation technologies Making the right choice. *Energy*, 47(1), 531-542. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.038>
 - [18] Al-Juwayhel, F., El-Dessouky, H., & Ettouney, H. (1997b). Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps. *Desalination*, 114(3), 253-275. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(98\)00017-4](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(98)00017-4)
 - [19] Chew, J. M., Reddy, C., & Rangaiah, G. P. (2014b). Improving energy efficiency of dividing-wall columns using heat pumps, Organic Rankine Cycle and Kalina Cycle. *Chemical Engineering and Processing -Process Intensification*, 76, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.11.011>
 - [20] Rodríguez, Y. (2022, 8 septiembre). Compresión Mecánica de Vapor (MVC) (MVR), sistema eficiente en la evaporación de agua | ESingeniería.pro. ESingeniería.pro. <https://esingenieria.pro/compresion-mecanica-de-vapor-mvc-sistema-eficiente-en-la-evaporacion-de-agua/>
 - [21] Cabeza, L. F., Solé, A., & Barreneche, C. (2017). Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 110, 3-39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.059>
 - [22] Johnson Controls. (2016). YORK® YHAP-C Absorption Heat Pumps. Recuperado de: YORK Double-Effect Steam Fired absorption chiller. Disponible en: https://www.johnsoncontrols.com/en_sg/-/media/jci/be/china/hvac-systems/files/water-cooled-chillers-and-heat-pumps/jcib4600_05hp_broch_d15g.pdf
 - [23] Álvarez, R., Andrés, M., Bujedo, L. A., Morentin, F., Samaniego, J., Castellanos, A., Gaos, R., Cuadrado, S., Antón Sutil, M., Vega Pachó, M. Á., Martínez Urrutia, A., Corrales Ciganda, J. L., & Escoba, G. J. (2021). Transformador de calor por absorción (AHT). Disponible en: <https://static.ptee.org/media/files/documentacion/itp-02-2021-transformador-de-calor-por-absorcion-aht-TT4.pdf>
 - [24] Sun, J., Wang, Y., Qin, Y., Wang, G., Liu, R., & Yang, Y. (2023b). A Review of Super-High-Temperature Heat Pumps over 100 °C. *Energies*, 16(12), 4591. <https://doi.org/10.3390/en16124591>
 - [25] Adamson, K., Walmsley, T. G., Carson, J. K., Chen, Q., Schlosser, F., Kong, L., & Cleland, D. J. (2022). High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 167, 112798. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112798>
 - [26] Luo, B., & Zou, P. (2019). Performance analysis of different single stage advanced vapor compression cycles and refrigerants for high temperature heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 104, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.05.024>
 - [27] López, A., Esnoz, A., & Artés, F. (2002,4-6 abril). Avances en Ciencias y Técnicas del Frío-1. CYTEF 2002, Cartagena, Cataluña, España. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/18438/Cartagena%20congress.pdf>
 - [28] Wu, W., You, T., Wang, J., Wang, B., Shi, W., & Li, X. (2018). A novel internally hybrid absorption-compression heat pump for performance improvement. *Energy Conversion and Management*, 168, 237-251. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.007>
 - [29] Ji, Q., Han, Z., Zhang, X., Sun, X., Gui, L., Li, X., & Yang, L. (2021). Study on the heating performance of absorption-compression hybrid heat pump in severe cold regions. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116419. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116419>
 - [30] Arpagaus, C., et al. (2023). High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies. Task Report. IEA Heat Pump Centre. Disponible en: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/high-temperature-heat-pumps-task-1-technologies-task-report>
 - [31] Kabat, N., Jende, E., Nicke, E., & Stathopoulos, P. "Investigation on Process Architectures for High-Temperature Heat Pumps Based on a Reversed Brayton Cycle." *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 5: Cycle Innovations*. Boston, Massachusetts, USA. June 26–30, 2023. V005T06A015. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2023-102497>
 - [32] Greene, R. W. (1987). *Compresores, selección, uso y mantenimiento*. (1a. ed.). McGraw-Hill.
 - [33] CRYO systems. (2023, 10 octubre). La diferencia entre el compresor de tornillo y el compresor alternativo. Cold room, condensing unit, refrigeration unit - Cryo Systems. <https://cryo-systems.com/es/la-diferencia-entre-el-compresor-de-tornillo-y-el-compresor-alternativo/>
 - [34] Rey Martínez, J., & Velasco Gómez, E. (2005). Bombas de calor y energías renovables en edificios. Para-

ninfo. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=HqlwQzDKsIC&oi=fnd&pg=PP1&dq=bombas+de+calor+de+compresi%C3%B3n&ots=bdNW0AHpkZ&sig=a6DQFcIdfWeP1YsaM0K3OmOh8Ag#v=onepage&q&f=false>

- [35] Grassi, W. (2018). Heat pumps: Fundamentals and Applications. Springer.
- [36] Ibarra-Bahena, J., & Romero, R. (2014). Performance of Different Experimental Absorber Designs in Absorption Heat Pump Cycle Technologies: A Review. *Energies*, 7(2), 751-766. <https://doi.org/10.3390/en7020751>
- [37] Demir, H., Mobedi, M., & Ülkü, S. (2008). A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2381-2403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.005>
- [38] IEA Annex 58, "Weel & Sandvig - WS. Turbo Steam," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/weel-and-sandvig-wsturbosteam.pdf>
- [39] IEA Annex 58, "KOBELCO Compressors Corporation - Micro Steam Recovery Compressor / MSRC160L," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologykobelcomsrc160l-1.pdf>
- [40] IEA Annex 58, "Piller - Compressors and blowers for open loop MVR cycle and steam heat pumps Piller Blowers and Compressors," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58pillartechology.pdf>
- [41] IEA Annex 58. "Spilling Technologies GmbH - Spilling Steam Compressor." 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58suppliertechologyspilling.pdf>
- [42] Meunier, F. (2013). Adsorption heat powered heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 830-836. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.050>
- [43] IEA Annex 58, "Qpinch Heat Transformer - Qpinch BV," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/qpinchheattransformer.pdf>
- [44] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 152, 985-1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>
- [45] IEA Annex 58, "Fuji Electric - Steam Generation Heat Pump," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologyfuji-electricsteam120.pdf>
- [46] IEA Annex 58, "Mayekawa Mfg. - CO2 Air Heater Heat Pump / Eco Sirocco," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologymayekawaecosi-rocco-1.pdf>
- [47] IEA Annex 58, "KOBELCO Compressors Corporation - Steam Grow Heat Pump / SGH120," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologykobelcosgh120-1.pdf>
- [48] IEA Annex 58, "KOBELCO Compressors Corporation - Steam Grow Heat Pump / SGH165," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologykobelcosgh165.pdf>
- [49] IEA Annex 58. (2023). KOBELCO Compressors Corporation - Steam Grow Heat Pump / SGH165. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologykobelcosgh165.pdf>
- [50] Caloryfrio, A. R. (2023, 11 septiembre). Carrier anuncia una nueva serie de bombas de calor de alta temperatura. [caloryfrio.com](https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/carrier-presenta-serie-bombas-calor-alta-temperatura.html). Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/carrier-presenta-serie-bombas-calor-alta-temperatura.html>
- [51] IEA Annex 58, "Johnson Controls - Cascade Heat Pump System for District Heating," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/johnsonhthpannex58.pdf>
- [52] IEA Annex 58, "Hybrid Energy - High Temperature Heat Pump," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/annex58-hybrid-energy-aug-2022rev4.pdf>
- [53] IEA Annex 58, "Mitsubishi Heavy Industries Thermal Systems - 130°C Hot Water Supply Heat Pump / ETW-

- S," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/technologymhietw-s.pdf>
- [54] IEA Annex 58, "GEA Heating and Refrigeration Technologies - GEA CO2 Heat Pump -," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58supliertechnologygea.pdf>
 - [55] AGO GmbH. "AGO Calora: Industrie-, Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen." Disponible en: <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-calora-industriewaermepumpe/>
 - [56] VIEWSION.net. AGO Congelo HT absorption heat pump. Disponible en: <https://www.ago-energie.de/en/ago-thermal-technology/ago-congelo-ht-absorption-heat-pump/>
 - [57] IEA Annex 58, "Enertime - High Temperature Heat Pump," 2022. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58enertimetechlogyv2.pdf>
 - [58] IEA Annex 58, "MAN Energy Solutions - ETES CO2 Heat pump," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/man-es-etes-co2-hthp-system.pdf>
 - [59] IEA Annex 58, "SPH Sustainable Process Heat GmbH - ThermBooster," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/sph-thermbooster.pdf>
 - [60] IEA Annex 58, "Olvondo Technology AS - Reversed Stirling Cycle," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/olvondo-highlift.pdf>
 - [61] IEA Annex 58, "Heaten AS - HeatBooster," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/heaten-heatbooster.pdf>
 - [62] IEA Annex 58, "Turboden S.p.A Turboden Large Heat Pumps," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/turbodentechnology.pdf>
 - [63] HoegTemp. (s. f.). Enerin. Disponible en: <https://www.enerin.no/hoegtemp>
 - [64] Høeg, A, Løver, K, Asphjell, T.A., Performance of a new ultra-high temperature industrial heat pump, 14th IEA Heat Pump Conference, Chicago, USA, 2023
 - [65] IEA Annex 58. (2023). Enerin AS - HoegTemp UHT heat pump. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/enerin-hoegtemp.pdf>
 - [66] Arpagaus, C., et al. (2023). Industrial Heat Pumps: Technology readiness, economic conditions, and sustainable refrigerants. Industrial Heat Pump Workshop at ACEEE Industrial Summer Study, Detroit, USA. Disponible en: https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/IHP_Workshops_2023/Cordin_Arpagaus_-_OST.pdf
 - [67] Prapainop, R., & Suen, K. O. (2012). Effects of refrigerant properties on refrigerant performance comparison: A review. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2(4), 486-493.
 - [68] Jesper, M., Schlosser, F., Pag, F., Walmsley, T. G., Schmitt, B., & Vajen, K. (2021). Large-scale heat pumps: Uptake and performance modelling of market-available devices. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 137, 110646. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110646>
 - [69] BOE.Reglamento (UE) 2024/573 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2024, sobre los gases fluorados de efecto invernadero, por el que se modifica la Directiva (UE) 2019/1937, y se deroga el Reglamento (UE) no 517/2014. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-80236>
 - [70] Arpagaus, C., Bertsch, S.S., 2020. Experimental comparison of HCFO R1233zd(E) and R1224yd(Z) in high temperature heat pump up to 150 °C. Refrig. Sci. Technol. 140-148. <https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1129>, 2020-July.
 - [71] Wu, D., Hu, B., Wang, R., Hai-Bin, F., & Wang, R. (2020b). The performance comparison of high temperature heat pump among R718 and other refrigerants. Renewable Energy, 154, 715-722. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.034>
 - [72] Zhu, C., Gluesenkamp, K., Yang, Z., & Blackman, C. (2019). Unified thermodynamic model to calculate COP of diverse sorption heat pump cycles: Adsorption, absorption, resorption, and multistep crystalline reactions. International Journal of Refrigeration, 99, 382- <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.021>
 - [73] Jiang, J., Hu, B., Wang, R., Deng, N., Cao, F., & Wang, C. (2022). A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 161, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>
 - [74] Deng, N., Zhou, M., Zhang, Y., Zhang, Z., Yan, Z., Wang, H., & Li, X. (2017). Experimental Research of a New

Steam Heat Pump System for Recovering Industrial Waste Heat. Journal Of Energy Engineering-asce, 143(5).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000458](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000458)

- [75] de Boer, R., Marina, A., Zühlsdorf, B., Arpagaus, C., Bantle, M., Wilk, V., Elmegaard, B., Corberán, J., & Benson, J. (2020). Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat. Disponible en: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/strengthening-industrial-heat-pump-innovation-decarbonizing-indus>
- [76] Hamid, K., Sajjad, U., Ahrens, M. U., Ren, S., Ganesan, P., Tolstorebrov, I., Arshad, A., Said, Z., Hafner, A., Wang, C., Wang, R., & Eikevik, T. M. (2023). Potential evaluation of integrated high temperature heat pumps: A review of recent advances. Applied Thermal Engineering, 230, 120720.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120720>
- [77] Ahrens, M. U., Loth, M., Tolstorebrov, I., Hafner, A., Kabelac, S., Wang, R., & Eikevik, T. M. (2021). Identification of Existing Challenges and Future Trends for the Utilization of Ammonia-Water Absorption-Compression Heat Pumps at High Temperature Operation. Applied Sciences, 11(10), 4635.
<https://doi.org/10.3390/app11104635>
- [78] Gaur, A., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. Energy Research & Social Science, 71, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- [79] SuPrHeat – Sustainable process heating with high-temperature heat pumps using natural refrigerants. (2024, 2 marzo). Danish Technological Institute. Disponible en: <https://www.dti.dk/suprheat/42516>
- [80] SPIRIT - Implementation of sustainable heat upgrade technologies for industry. (2024, 8 enero). Danish Technological Institute. Disponible en: <https://www.dti.dk/spirit/44405>
- [81] A smart and flexible energy management system | Tecnia. (s. f.). Tecnia. Disponible en: <https://www.tecnia.com/en/press-room/smart-flexible-energy-management-system>
- [82] Savatinova, P. (2020, 22 diciembre). Final prototypes built and ready to start the experimental phase of CHEST technology » CHESTER Project. CHESTER Project. Disponible en: <https://www.chester-project.eu/news/a-high-temperature-heat-pump-prototype-developed-by-tecnia/>
- [83] Making industry more sustainable | TNO. (s. f.). tno.nl/en. Disponible en: <https://www.tno.nl/en/sustainable/co2-neutral-industry/sustainable-industrial-heat-system/making-industry-more-sustainable/>
- [84] Methods for developing integrated industrial heat pump systems considering existing and novel components - Basic data. (s. f.). ARAMIS. Disponible en: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=38624>
- [85] DeCarbCH – Decarbonisation of Cooling and Heating in Switzerland - Basic data. (s. f.). ARAMIS. Disponible en: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48859>
- [86] IntSGHP – Integration of steam-generating heat pumps in industrial sites (retrofit) - Basic data. (s. f.). ARAMIS. Disponible en: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=49319>
- [87] High-efficiency high-temperature heat pumps with temperature glide. (s. f.). Swiss National Science Foundation. Disponible en <https://data.snf.ch/grants/grant/203645>
- [88] DeCarb-PUI – Decarbonization of industrial processes through redesign of the process-utility interface - Basic data. (s. f.). ARAMIS. Disponible en: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=49367>
- [89] IEA Annex 58. (2023). Mayekawa Europe NV - Hydrocarbon Heat Pump / FCcompressor. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58fc-compressor.pdf>
- [90] electronic library - The DLR High Temperature Heat Pump Pilot Plants. (s. f.). <https://elib.dlr.de/145429/>
- [91] IEA Annex 58, "ToCircle Industries - TC-C920," 2023. [Online]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/tocircle-tc-c920-rotary-vane-compressor.pdf>
- [92] IEA Annex 58. "Skala Fabrikk AS - SkaleUP." 2022. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/annex-58-technology-overview-skala-fabrikk-skaleupv01.pdf>
- [93] Kosmadakis, G. (2019). Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. Applied Thermal Engineering, 156, 287-298. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>
- [94] Arpagaus, C., et al. (2023). Industrial Heat Pumps: Technology readiness, economic conditions, and sustain-

nable refrigerants. Industrial Heat Pump Workshop at ACEEE Industrial Summer Study, Detroit, USA. Disponible en: https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/IHP_Workshops_2023/Cordin_Arpagaus_-_OST.pdf

- [95] owett, P. (2024, 11 enero). Fonterra reveals high-temperature industrial heat pump. Pv Magazine International. <https://www.pv-magazine.com/2024/01/11/fonterra-reveals-high-temperature-industrial-heat-pump/>
- [96] Redacción. (2024, 2 marzo). La industria electrointensiva estima que el precio medio de la electricidad en 2024 será de 55 euros/MWh, un 36% menor. El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/aeg-estima-precio-medio-electricidad-2024-sera-55-euros-mwh-36-menor/>
- [97] Ojea, L. (2023, 13 noviembre). Biometano, hidrógeno y gas natural para la industria: no solo el precio importa, ser sostenible tiene un sobrecoste. El Español. https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20231113/biometano-hidrogeno-gas-natural-industria-no-solo-precio-importa-sostenible-sobrecoste/808169619_0.html
- [98] Schlosser, F., Jesper, M., Vogelsang, J., Walmsley, T. G., Arpagaus, C., & Hesselbach, J. (2020). Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 133, 110219. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219>
- [99] Scheihing, P. (2021, February 3). High Temperature (Industrial) Heat Pumps: An Untapped US Industrial Process Energy Efficiency Opportunity. 50001 Strategies. ACEEE. Presented at the Low Temperature Industrial Processes Workshop.
- [100] Ducheyne, W. (2017). Breakthrough energy efficiency: QPinch industrial chemical heat transformer. Presentado en el 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/archive/hpc2017/wp-content/uploads/2017/06/o392.pdf>
- [101] Sun, J., Wang, Y., Wu, K., Ge, Z., & Yang, Y. (2022). Analysis of a New Super High Temperature Hybrid Absorption-Compression Heat Pump Cycle. Energies, 15(20), 7515. <https://doi.org/10.3390/en15207515>
- [102] International Energy Agency. (2020, April 30). Electricity mix in the European Union, Q1 2020. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-mix-in-the-european-union-q1-2020>
- [103] Producción eléctrica en España por tipo en 2023 | Statista. (2024, 22 marzo). Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/>
- [104] Environmental impact of high temperature industrial heat pumps – from a global warming potential (GWP) perspective. (2020). Eceee. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2020/4-technology-products-and-systems/environmental-impact-of-high-temperature-industrial-heat-pumps-from-a-global-warming-potential-gwp-perspective/
- [105] Mulder, M., & Hulshof, D. (2021). Social Costs and Benefits of District Heating Systems: Method and application to neighbourhood in the Dutch city of Groningen. Centre for Energy Economics Research (CEER), CEER Policy Papers No. 10. University of Groningen, The Netherlands. Disponible en: <https://www.rug.nl/cen-ber/blog/ceer-policy-paper-10-final.pdf>
- [106] Alarnaout, G. A., Navarro-Esbri, J., & Mota-Babiloni, A. (2024). Operational, economic, and carbon footprint feasibility of a moderately-high-temperature heat pump as an alternative to conventional boilers in various scenarios. Energy Conversion And Management, 309, 118424. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118424>
- [107] Espeita, J. A. (2020, 26 febrero). Qué son los ODS y por qué debes conocerlos - EKOMODO. EKOMODO. <https://www.ekomodo.eus/blog/empresas-por-un-mundo-mejor/que-son-los-ods-y-por-que-son-tan-importantes/>
- [108] Admin-Vaeron. (2024b, febrero 28). El impacto medioambiental de las bombas de calor - Vaeron. Vaeron. <https://vaeron.es/el-impacto-medioambiental-de-las-bombas-de-calor/>
- [109] Communications. (2024b, enero 25). ¿Qué es un 'district heating'? Cuando la calefacción es urbana y se comparte. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-un-district-heating-cuando-la-calefaccion-es-urbana-y-se-comparte/>

Anexo I

Proyectos de I+D

Proyecto SuPrHeat

El Instituto Tecnológico danés (DTI) junto con la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) y otros participantes, comenzó un proyecto en 2020 que se prevé que finalice en agosto de 2024 sobre el desarrollo e implementación de tres plantas pilotos de 500 kW_{th}. Dichas plantas operarán con BCAT capaces de suministrar temperaturas de hasta 200 °C usando vapor, hidrocarburos y CO₂ como fluidos de trabajo [78].

Proyecto InterHeat

El DTI, junto con otros colaboradores y con la financiación del Programa de Desarrollo y Demostración de Energía Tecnológica (EUDP), está desarrollando un proyecto para la integración de las BCAT en la recuperación de calor y en los sistemas de calefacción urbana. En la siguiente figura se muestra un esquema de la planta piloto.

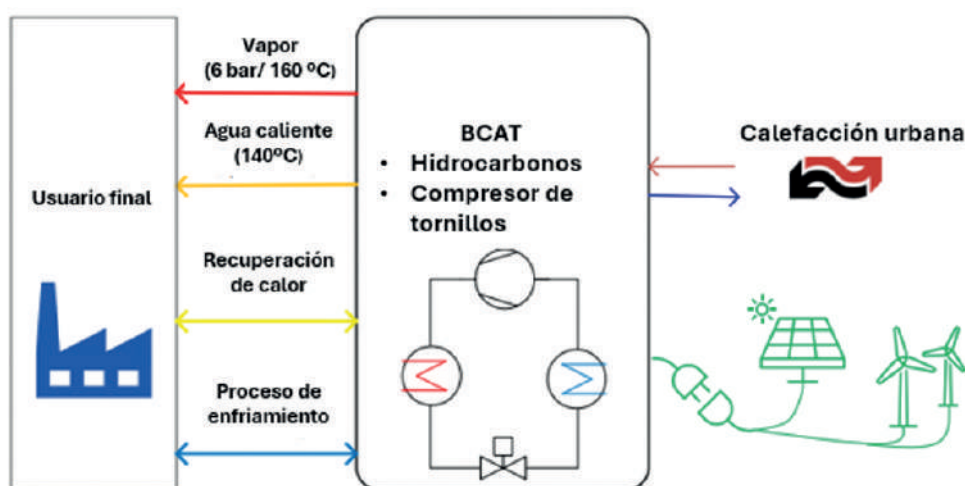


Figura 68: Esquema planta piloto del proyecto del DTI [30].

A nivel de proceso, se observa una estrecha relación entre el proceso en sí y el sistema de bomba de calor, lo que conlleva la necesidad de equilibrar la carga y garantizar un funcionamiento dinámico adecuado de estos sistemas. En el ámbito de la red o sector, la eficiente recuperación del calor excedente y la provisión de enfriamiento, son aspectos críticos para asegurar un rendimiento óptimo. El desarrollo de soluciones técnicas se enfoca en la integración de sistemas de calefacción urbana, lo que habilitará nuevos modelos de negocio para una integración sectorial más eficaz. El primer sistema se integrará en un proceso de secado de proteína en polvo. La BCAT será un ciclo en cascada de 500 kW_{th} que empleará compresores de tornillo Frascold y como refrigerante el R600a en la parte de baja temperatura (120 °C) y R601 a en la zona de alta temperatura (160 °C). El segundo sistema se presentará como una solución para mejorar la calefacción urbana, proporcionando temperaturas de hasta 160 °C. Esta segunda tecnología se trata de una bomba de compresión mecánica y un sistema de generación de vapor basada en la tecnología MVR. En la parte inferior del ciclo se trabajará con el refri-

gerante R600 obteniéndose temperaturas de 120 °C y en la parte superior del ciclo se empleará agua (R718) como fluido de trabajo produciendo una potencia térmica de 1 MW_{th}. Los sistemas se someterán a demostraciones durante varios meses para resaltar los beneficios de los diferentes enfoques y los desarrollos tecnológicos se pondrán a prueba en condiciones de funcionamiento a largo plazo.

Proyecto SPIRIT

El proyecto SPIRIT liderado por el Danish Technological Institute (DTI), que comenzó en septiembre de 2022 y acabará en 2026, se enfoca en el diseño y demostración de BCAT para la industria procesadora. Estas bombas de calor utilizarán tecnología avanzada para mejorar la eficiencia y ampliar el rango de operación gracias al suministro de altas temperaturas y potencias térmicas. Se demostrarán tres de estas bombas de calor en instalaciones operativas en Bélgica, Noruega y la República Checa, utilizando calor residual para generar temperaturas de hasta 157 °C. Concretamente, se construirán tres modelos que ofrecerán temperaturas de suministro de 139 °C, 144 °C y 157 °C respectivamente. La BCAT de 139 °C se implementará en una industria de producción de azúcar donde se sustituirá calderas de gas natural por una BCAT diseñada por GEA con un compresor de tornillo. La BCAT de 144 °C de Mayekawa de 1,2 MW_{th} sustituirá la producción de vapor a partir de gas natural y biogás en una fábrica de comida por una BCAT. Por último, en una fábrica del sector del papel se reemplazará la producción de vapor a través de una caldera de gas natural y biogás por una BCAT de 0,7 MW_{th} de Spilling. Dicha BCAT generará a través de un compresor pistón vapor a 6 bares. Se busca mejorar el rendimiento técnico de las BCAT mediante la reducción de pérdidas de eficiencia, la ampliación del rango de funcionamiento de los compresores y la optimización del enfriamiento del aceite. Además, se busca reducir los costos operativos utilizando componentes estándar y diseños de compresores que requieran menos mantenimiento [79].

Proyecto CHESTER

Desde el 2020 hasta el 2023, el proyecto CHESTER ha estado desarrollando un sistema innovador de gestión energética llamado almacenamiento de energía térmica comprimida (CHEST), que combina tres tecnologías: BCAT, almacenamiento térmico de alta temperatura y ciclo de Rankine orgánico. El sistema CHEST convierte el exceso de electricidad en calor, almacenándolo para luego convertirlo de nuevo en electricidad según sea necesario. Esto permite integrar eficientemente fuentes de energía renovable y proporcionar tanto electricidad como calor, lo que lo hace ideal para entornos industriales. TECNALIA ha desarrollado una BCAT que convierte el exceso de electricidad en calor hasta 150 °C. Las pruebas iniciales muestran que los prototipos son completamente funcionales. El sistema de almacenamiento flexible permite adaptarse a diferentes condiciones operativas. Aunque el proyecto CHESTER demuestra la viabilidad del sistema CHEST, se necesita más investigación para llevar la tecnología a una escala real [80],[81].

Proyecto LowCapex

La organización Holandesa de Investigación Científica (TNO) desarrolló, en el proyecto LowCapex finalizado en 2021, una BCAT a gran escala de compresión mecánica de 2 MW. Esta tecnología produce vapor a 2 bares a partir de una fuente de calor de 50 a 80 °C con un coste de 200 euros por kW_{th}. Este

modelo redujo entre un 20 % y un 35 % las emisiones de CO₂ con respecto al escenario actual en dicho momento [82]. Esta investigación fue la base para el Proyecto FUSE desarrollado entre 2019 y 2023, en el que colaboraba de nuevo el TNO. El objetivo principal del proyecto FUSE fue desarrollar una bomba de calor industrial a escala completa (1-2 MW) que produjese vapor entre 2 y 5 bares y aprovecharse fuentes de calor residual en el rango de 60-90 °C, con un coste de inversión específico de 200 €/kW (excluyendo integración). Otras actividades del proyecto se dedicaban a desarrollar diseños estandarizados y modulares para bombas de calor industriales. Mayekawa Europe fue la que suministro la BCAT. Aunque el objetivo de costes para esta unidad de demostración no fue alcanzable, sí se pudieron lograr los objetivos técnicos del proyecto. La BCAT de Mayekawa funcionaba con pentano y pudo alcanzar temperaturas de sumidero de hasta 150 °C. La bomba de calor se probó bajo condiciones estables y dinámicas representativas de las que podrían encontrarse en procesos industriales [30].

Proyecto UPheat-INES 2.0

El proyecto UPheat-INES 2.0 que está siendo llevado a cabo por la empresa Catalisti, finalizará en julio de 2025. Su objetivo es la descarbonización industrial gracias a una nueva bomba de compresión mecánica de vapor que opere a temperaturas de 160-200 °C usando una mezcla zeotrópica de refrigerantes naturales. Se espera obtener una eficiencia del 40-60 % y un COP mínimo de 2,4. Uno de los prototipos construidos utiliza como fluido de trabajo una mezcla zeotrópica de agua-amoniaco. También se estudiará el uso de un ciclo transcrito. Se pretende realizar el diseño, control y prueba del sistema con múltiples temperaturas de la fuente [30].

Proyectos de I+D de Emerson

La empresa Emerson ha desarrollado una BCAT de compresión mecánica en cascada clasificada con un grado de madurez tecnológica (TRL) de 6. Dicha BCAT será capaz de generar una corriente de aire de 120 °C usando como fuente de calor agua a 10-30 °C. El sistema utiliza los refrigerantes R410A y R245fa en el lado de baja y alta temperatura respectivamente. El prototipo actual aporta una potencia térmica de 30 kWth y pretende ser comercializado en el 2025 [14]. Por otro lado, Emerson está colaborando con el centro de investigación Hydro-Quebec de Canadá y la Universidad de Sherbrook, para desarrollar una BCAT que pueda suministrar temperaturas de 150 °C usando R718 y a partir de una fuente de calor de 90 °C.

Proyecto NEXTHEPS

El proyecto NEXTHEPS investiga en Finlandia métodos de diseño y nuevas soluciones tecnológicas que pueden ser adoptadas en sistemas de BCAT a gran escala. Las investigaciones se centran en sistemas de bombas de calor con capacidad de calefacción de unos pocos MW, en los mercados de aplicación de BCAT, así como en los componentes principales de ciertos sistemas de bombas de calor. El proyecto se puede dividir en cuatro temas principales de investigación: 1) colectores de calor y procesos de entrega de calor, 2) tecnología de compresores de alta velocidad, 3) integración de bombas de calor de gran escala en sistemas energéticos, y 4) entorno del mercado y oportunidades comerciales. La duración del proyecto de investigación es de septiembre de 2022 a agosto de 2024 [32]. Tiene como obje-

tivos desarrollar métodos de análisis y diseño precisos, así como nuevas soluciones tecnológicas para BCAT a gran escala, con el fin de sustituir los combustibles fósiles en la industria y la calefacción urbana. De esta manera se fortalecerá la competitividad de la industria finlandesa en los mercados globales de bombas de calor. En cuanto a los compresores centrífugos, se enfoca en el diseño aerodinámico para maximizar la eficiencia y minimizar las pérdidas, así como en el diseño del motor eléctrico de alta velocidad, los cojinetes magnéticos para reducir la fricción y el desgaste, y análisis dinámicos del rotor para garantizar una operación estable y duradera. Además, se investiga el diseño avanzado y las pérdidas en los ciclos de bombas de calor, así como el desarrollo de correlaciones de transferencia de calor para los intercambiadores de calor, especialmente para el condensador y el evaporador. El proyecto también analiza las características de integración y operación de las BCAT en sistemas energéticos más amplios, como redes de calefacción urbana o producción de vapor de proceso. Se explorarán oportunidades comerciales y de expansión internacional.

Proyecto NEXTHEPS Qwark3

Se creó en Alemania con el objetivo de conseguir la descarbonización. Como subproyecto, comenzó en agosto de 2020 la construcción a gran escala de una BCAT para la calefacción urbana de Berlín con la colaboración de Siemens Energy. El presupuesto es de 3,3 millones de euros y finalizará en agosto del 2025. Los resultados clave del proyecto incluyen una disminución significativa en la emisión de calor al medio ambiente de 37 GWh, una reducción en el consumo de agua en torres de enfriamiento de 120.000 m³, y un suministro anual de calor de aproximadamente 55 GWh. Además, se espera una reducción en las emisiones de CO₂ de alrededor de 6.500 toneladas por año. El proyecto tiene como objetivo proporcionar agua caliente a 30.000 apartamentos en verano y a 3.000 apartamentos con calefacción en invierno. Estos logros contribuyen a realizar evaluaciones confiables de los potenciales técnicos y económicos de las BCAT proporcionando una base para la planificación a medio y largo plazo de la infraestructura de suministro de calor. Específicamente, la bomba de calor desarrollada tiene como objetivo aliviar el circuito de recalentamiento en las plantas de refrigeración y elevar la temperatura del agua a niveles entre 85 °C y 120 °C según sea necesario, lo que permite su integración en la red de calefacción urbana de Berlín. La flexibilidad y adaptabilidad de la producción de calor de la bomba de calor al origen de calor residual son cruciales, con una producción de calor esperada entre 4.8 y 8 MW_{th}.

Proyecto FernWP

El proyecto FernWP, tiene como objetivo reducir las barreras técnicas y económicas existentes para la integración de BCAT en los sistemas de calefacción urbana. Comenzó en enero de 2021 y acabará en octubre de 2025. Su presupuesto es de 4,5 millones de euros y colaboran el Fraunhofer IEG, el Fraunhofer ISE y Johnson Controls entre otros. Los objetivos clave son proporcionar los fundamentos de los procesos cíclicos teóricamente posibles, así como la especificación de los refrigerantes preseleccionados. También se investigarán las eficiencias de los ciclos termodinámicos identificados y las posibles interconexiones y componentes correspondientes. Además, se llevará a cabo la primera implementación de diferentes optimizaciones del COP a escala de banco en Fraunhofer ISE, seguido de la escalabilidad de la planta de laboratorio en colaboración con los socios industriales. Se desarrollará una planta piloto y se llevarán a cabo investigaciones sobre la integración en el mercado desde una perspectiva sistémica. Como resultado, se construirá, operará y supervisará una bomba de calor de absorción-compresión a gran escala, y se probarán diferentes componentes de hardware. Los datos

de medición obtenidos durante los ciclos de prueba de esta planta experimental serán valiosos para retroalimentar al equipo de desarrollo y contribuir a una mejor comprensión del comportamiento dinámico en la operación real, así como para verificar los parámetros de diseño. Además de la bomba de calor a gran escala, se prestará especial atención al desarrollo de una bomba de calor industrial de alta temperatura para la provisión de calor de proceso, que se desarrollará en paralelo sobre la base de la bomba de calor a gran escala. Se llevará a cabo la elaboración y desarrollo técnico de los componentes requeridos.

Proyecto de desarrollo de un compresor de tornillos para ciclo cerrado por Fraunhofer IEG

Fraunhofer IEG, junto con la Universidad Técnica de Dortmund entre otros socios, comenzó en enero del 2023 el desarrollo de una BCAT con un compresor de tornillos para la generación de vapor y producción de calor. El proyecto se centra en mejorar el rendimiento del compresor, así como en desarrollar materiales, rodamientos y sellos adecuados, y en optimizar los parámetros de inyección. Para lograrlo, se llevarán a cabo experimentos iniciales utilizando aire y vapor para evaluar el rendimiento del compresor. Posteriormente, se realizarán pruebas en Fraunhofer IEG utilizando un circuito cerrado de bomba de calor con una capacidad de alrededor de 400 kW. Se espera que en el futuro se pueda escalar la bomba de calor a niveles industriales. Los datos experimentales obtenidos se compararán con simulaciones para evaluar la eficiencia, idoneidad y tamaño de la bomba de calor para su integración en procesos industriales. El proyecto se prevé que finalice en junio del 2026.

Proyecto HeatShift

El proyecto HeatShift elaborado en Alemania con la colaboración de la Universidad de Kempten, tiene como propósito la investigación de opciones de integración eficientes para una BCAT en una planta de calefacción urbana que opera con temperaturas de 120 °C. Este proyecto se puso en marcha en marzo del 2023 y finalizará en febrero de 2026. Se pretende obtener resultados de un modelo realista de simulación de BCAT y plantas de cogeneración creados a partir de los datos proporcionados por los colaboradores. A partir de los resultados de la simulación, se elaborará un plan de integración y optimización para una planta de calefacción urbana [30].

Proyecto KickStar

El proyecto KickStar financiado por el RVO, en el que colaboran como coordinador la empresa IBK Groep B.V, junto con el TNO y la Universidad de Twente, comenzó en 2022 y finalizará en el 2025. Su objetivo principal es acelerar la implementación de estas bombas de calor mediante el desarrollo de soluciones tecnológicas viables desde el punto de vista comercial. Se pretende reemplazar a los sistemas de calefacción convencionales basados en combustibles fósiles, particularmente para la demanda de calor industrial por debajo de los 200 °C. Además, busca identificar y superar las barreras no técnicas que dificultan su adopción en el mercado. La viabilidad comercial implica que la tecnología

debe cumplir con los requisitos técnicos de manera rentable, con un tiempo de retorno de la inversión de menos de 5 años, y que los proveedores sean capaces de producir y suministrar esta tecnología a precios competitivos. El logro de estos objetivos permitirá una implementación a gran escala de la tecnología de bombas de calor antes de 2030, lo que contribuirá significativamente a satisfacer una parte importante de la demanda de calor industrial y avanzar hacia una industria neutra en CO₂ para 2050. Las actividades del proyecto incluyen el desarrollo y prueba de bombas de calor a escala completa para aplicaciones específicas, la creación de un "Gemelo Digital" para facilitar su integración futura, y la realización de análisis detallados de operaciones unitarias comunes en la industria con una demanda de calor por debajo de los 200 °C. Para ello, se estudiarán BCAT de ciclos convencionales y sus posibles mejoras de su funcionamiento e integración. Estas actividades se complementan con el estudio de barreras no técnicas y la elaboración de recomendaciones para su superación [30].

Proyecto BCAT MVR de TNO

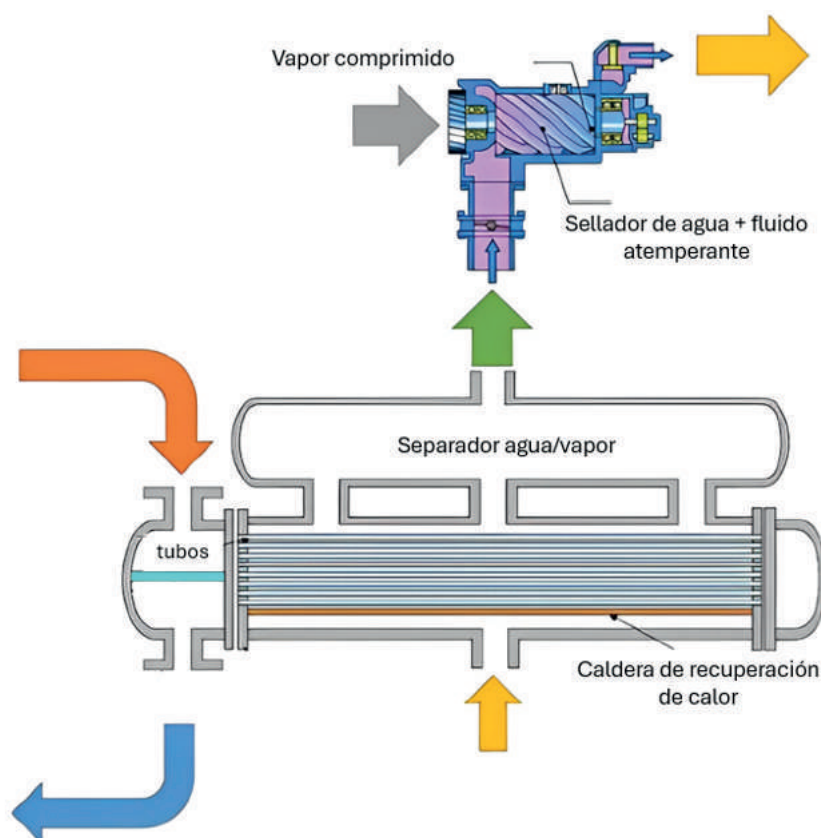


Figura 69: Esquema BCCV proyecto [30].

Dicho proyecto, con una duración de 2021 a 2023, fue una colaboración entre TNO (coordinador), Standard Fasel y Smurfit Kappa. El objetivo principal fue investigar la viabilidad técnica y económica de este tipo de BCAT. En términos técnicos, se buscaba desarrollar, construir y probar un prototipo con una capacidad de calefacción de aproximadamente 250 kW. Este prototipo se pretendía que sirviese como base para el desarrollo de una planta piloto a escala industrial en un proyecto futuro. La

viabilidad económica se determinó evaluando el rendimiento técnico en relación con los beneficios económicos y la inversión requerida. La BCAT MVR se basaba en la generación de vapor en condiciones de vacío (<1 bar, <100 °C) y su compresión subsiguiente para producir vapor de baja a media presión (1-5 bar). Este concepto permite aprovechar corrientes significativas de calor residual disponibles en la industria, con temperaturas de 60-80 °C. Utilizaba agua como fluido de trabajo y para la lubricación y sellado de los rotores del compresor, lo que presenta ventajas sobre los sistemas de bomba de calor de compresión de vapor de ciclo cerrado. El proyecto cuenta con un consorcio formado por Standard Fasel, que desarrolló la caldera de vacío y los compresores de vapor, y TNO, quien elaboró la interfaz entre el banco de pruebas y la bomba de calor, así como de la conexión del prototipo. Smurfit Kappa proporcionó información sobre las condiciones del proceso en la industria papelera y evaluó la viabilidad de la MVR en ese sector. Los resultados incluyen el diseño de dos versiones de la MVR, una para el prototipo a escala de banco y otra para un sistema a escala completa. Además, se estudió el rendimiento del prototipo bajo condiciones industriales simuladas. Con esta información, se determinó la viabilidad técnica y económica de un sistema a escala completa. Este proyecto amplió el conocimiento sobre compresores de vapor de desplazamiento constante en relación con la tecnología de bomba de calor y el comportamiento de los sistemas de compresión de dos etapas semiabiertos [30].

Proyecto SCCER EIP

En 2020 empezó dicho proyecto en el que colaboraban la Escuela Superior Suiza (OST) y la escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) con el objetivo del desarrollo de una BCAT de dos etapas de 100 kW_{th}. Dicha BCAT utilizaba un turbocompresor de ciclo abierto en la parte superior del ciclo. El objetivo era generar vapor a partir de una bomba de calor que utilizaba refrigerantes de hidrocarburos y posteriormente este vapor se sometía a un proceso MVR para conseguir temperaturas de suministro de hasta 150 °C [84].

Proyecto IntSGHP

El proyecto suizo IntSGHP, dedicado a la integración de bombas de calor generadoras de vapor en sectores industriales, investigó desde el 2021 hasta los 2023 tres casos de estudio específicos y analizó la posible integración del sistema de bombas de calor de ciclo abierto y cerrado. La meta era cerrar la brecha entre el análisis de integración del proceso y su implementación. Los hallazgos, incluyendo el enfoque de control, almacenamiento, costos de equipos e integración, pretendían que derivasen en pautas aplicables a numerosos sitios industriales en Suiza y Europa. Contaba con presupuesto total de 120 mil francos suizos y participaba el OST junto con otros socios industriales. Los resultados clave incluían la elaboración de una guía con recomendaciones para la modernización e integración de las bombas de calor generadoras de vapor, una comparación tecnológico-económica con los sistemas actuales de generación de vapor (por ejemplo, calderas de gas), y un modelo de simulación capaz de realizar un análisis temporal detallado de estos procesos, incluyendo la integración de auxiliares, almacenamiento, bombas de calor de ciclo abierto y cerrado, y sus controles. Además, se esperaba obtener experiencia en la planificación de un proyecto de demostración y en la implementación de las bombas de calor generadoras de vapor en sitios industriales [85].

Proyecto de BCAT de alta eficiencia con refrigerantes de alta temperatura de deslizamiento de Bridge Discovery

El proyecto de BCAT con temperatura de deslizamiento, el cual finaliza en 2025, tiene como objetivo investigar bombas de calor industriales de alta eficiencia con temperatura de deslizamiento. Las mezclas de refrigerantes se optimizarán para aplicaciones industriales típicas mediante un marco integrado de diseño de refrigerantes y procesos. Se desarrollará un banco de pruebas experimental de alta temperatura y un sistema prototipo de bomba de calor para validar y demostrar la tecnología. Los resultados clave incluyen la optimización de los refrigerantes para deslizamientos de temperatura y un banco de pruebas de alta temperatura (200 kW, 250 °C). Se espera obtener experiencia en el manejo de mezclas de refrigerantes para BCAT [86].

Proyecto DeCarb-PUI

El proyecto DeCarb-PUI, financiado por la Oficina Federal de Energía (SFOE) como un proyecto de Planificación y Desarrollo desde 2021 hasta 2024, busca reducir las pérdidas de exergía en BCAT, mediante la integración de herramientas gráficas y estudios de casos del sector alimenticio. Los resultados clave incluyen demostraciones de mejora de la eficiencia y reducción de costos, así como la elaboración de guías prácticas [87].

Proyecto HTHP-CH

El proyecto HTHP-CH (Integración de Bombas de Calor de Alta Temperatura en Procesos Industriales Suizos), que se extiende desde 2021 hasta 2025, tiene como objetivo principal desarrollar una guía y una herramienta de evaluación para la integración práctica de BCAT en la industria suiza, basadas en estudios de casos altamente relevantes. El enfoque se centra en procesos con una demanda energética superior a 100 °C en operaciones continuas y por lotes, como secado, evaporación y esterilización. Paralelamente, el proyecto participará en el Anexo 58 del Programa de Tecnología de Calefacción y Refrigeración de la Agencia Internacional de Energía sobre BCAT para compartir resultados y conocimientos con un grupo de expertos internacionales en el campo. Los resultados clave incluyen tecnologías de BCAT de última generación y desarrollos en curso para sistemas y componentes, definición y especificaciones para la prueba de BCAT [88].

Proyecto BCAT MVR de Svenska Rotor Maskiner

La empresa Svenska Rotor Maskiner (SRM) está desarrollando una BCAT de tecnología MVR que actualmente cuenta con un TRL de 5. La finalidad es crear un compresor de tornillos que pueda operar tanto en lazo abierto como cerrado a gran escala. El primer prototipo suministraba temperaturas de

hasta 130 °C y una potencia de 250 kW_{th}., aunque el objetivo era que para el 2023-2024 se hubiese construido un prototipo de potencia térmica de 20 MW_{th} y temperatura máxima de suministro de 165 °C [14].

Proyecto de desarrollo de una BCAT de compresión de lazo cerrado por Fenagy

El fabricante Fenagy está progresando en la creación de una BCAT de compresión de lazo cerrado para la calefacción urbana que actualmente se encuentra en un TRL entre 5 y 6. Se trata de un ciclo que emplea CO₂ como refrigerante y compresores alternativos que ofrece una temperatura máxima de 120 °C con capacidad térmica entre 300 kW_{th} y 1,8 MW_{th}. El COP es estimado varía entre 2,46 para una temperatura de la fuente de 0 °C y una temperatura de salida de sumidero de 120 °C ascendiendo a 2,91 cuando las condiciones de entrada de la fuente y salida de sumidero son 5 °C y 11 °C respectivamente [14].

Proyecto BCAT con temperatura de suministro de 145 °C de Mayekawa Europe

Mayekawa Europe ofrece una BCAT que posee un TRL de 5 para la generación de vapor a 145 °C. Se basa en un ciclo de compresión que usa el refrigerante R601. Debido a que no se alcanzan altas presiones, pueden emplearse compresores que se usarían convencionalmente en ciclos de refrigeración sin realizar modificaciones. Específicamente, se emplea un compresor de tornillos lubricado con aceite de 1000 kW de manera que la potencia térmica puede ser ajustada a través de la variación de la velocidad de giro del motor eléctrico que lo acciona. El circuito de aceite es independiente debido a la alta temperatura de descarga del compresor que lo desgasifica antes de recircularlo a los rodets del compresor. El ciclo de inyección de aceite es un ciclo convencional que recupera el aceite del gas de descarga y lo devuelve al rotor del compresor. Para alcanzar la temperatura de suministro de 145 °C y un COP de 2,6 la temperatura de entrada de la fuente de calor es de 90 °C enfriándose hasta 85 °C [88].

Proyectos de desarrollo de nuevos modelos de BCAT de Enertime

Enertime en la actualidad está desarrollando una BCAT capaz de calentar directamente una corriente de proceso cuya TRL está entre 4 y 5, aunque existe poca información sobre el funcionamiento de ella. También, ha creado una bomba de calor de generación de vapor que posee un TRL entre 5 y 6, con funcionamiento parecido a la BCAT de Kobelco SGH165. Esta bomba de calor se basa en un ciclo de compresión multietapa a partir de compresores centrífugos herméticos y con subenfriamiento del refrigerante R1336mzzz(Z), R1224yd(Z) o R1233zd(E) para transmitir calor al agua presurizada mediante una bomba que proviene de un tanque flash. El agua presurizada calentada se recircula posteriormente al tanque flash. El vapor obtenido por cabeza del tanque flash se comprime en un compresor obteniendo vapor a 4 bares y 160 °C [56].

Proyectos de I+D sobre bombas de calor del DLR

El Centro Aeroespacial de Alemania (DLR) está creando una BCAT basada en un ciclo Rankine inverso que utiliza vapor como fluido de trabajo. En dicha instalación se investiga el uso de un ciclo cerrado con dos etapas de compresión y un intercambiador de calor intermedio o una BCAT de doble etapa de compresión con un eyector y un separador flash. En ambos casos el ratio de compresión es de 2,8. Con este proyecto se pretende analizar la viabilidad del uso de eyectores para recuperar energía perdida en la expansión isoentálpica, así como mejorar su diseño. Otro objetivo es mejorar el COP y aumentar la temperatura de suministro de las BCAT a través del enfriamiento entre compresores alcanzando temperaturas de sumidero de 300 °C y un COP de 4 [30],[89].

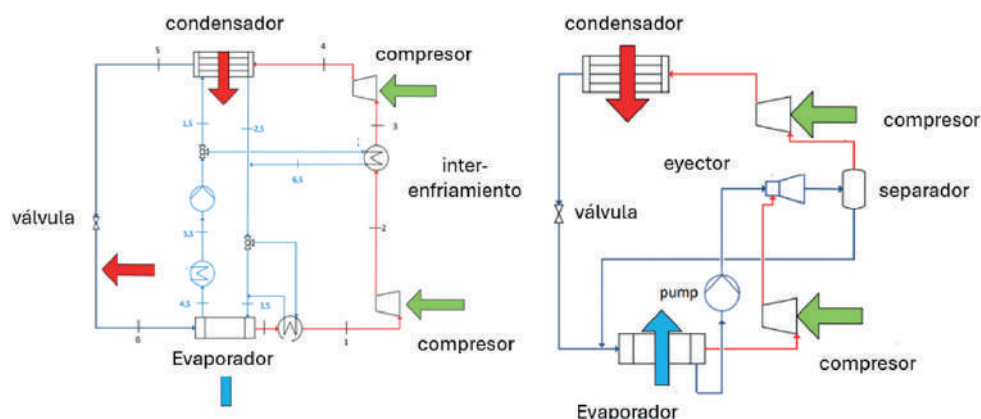


Figura 70: A la izquierda ciclo cerrado de doble etapa con subenfriamiento y a la derecha ciclo cerrado con compresión doble etapa y eyector [89].

Proyecto de desarrollo de una BCAT de temperatura de suministro 180 °C de Mayekawa mfg. Mayekawa mfg comercializará en el 2025 una BCAT que ofrecerá temperaturas de hasta 180 °C con un COP mínimo de 3,5 para una temperatura de fuente de calor de 80 °C. Se pretende conseguir una potencia térmica de 500 kW. La BCAT se basa en un ciclo cerrado con 4 etapas de compresión con un intercambiador de calor intermedio. Como refrigerante se utilizará el refrigerante R600 o un refrigerante de la categoría HFO.

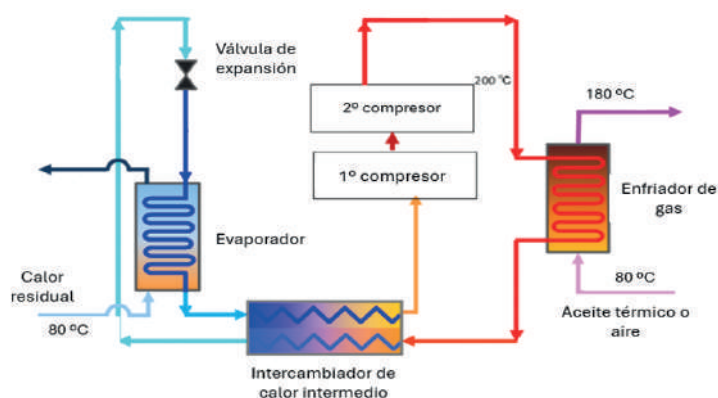


Figura 71: Esquema prototipo BCAT Mayekawa mfg [30].

Proyecto BCAT de temperatura de suministro de 160 °C de Mitsubishi Heavy Industries (MHI)

La compañía MHI está desarrollando una BCAT con un COP superior a 4 y temperaturas de suministro de 160 °C. La BCAT proporcionará una potencia de 600 kW_{th} y un incremento de temperatura de la corriente de sumidero de 90 °C, a partir de una corriente de 80 °C. Consta de dos turbocompresores con una extracción intermedia, tres condensadores y un economizador. Como refrigerante utiliza el R1336mzz(Z). En la figura mostrada a continuación, se detalla el esquema de dicha bomba de calor.

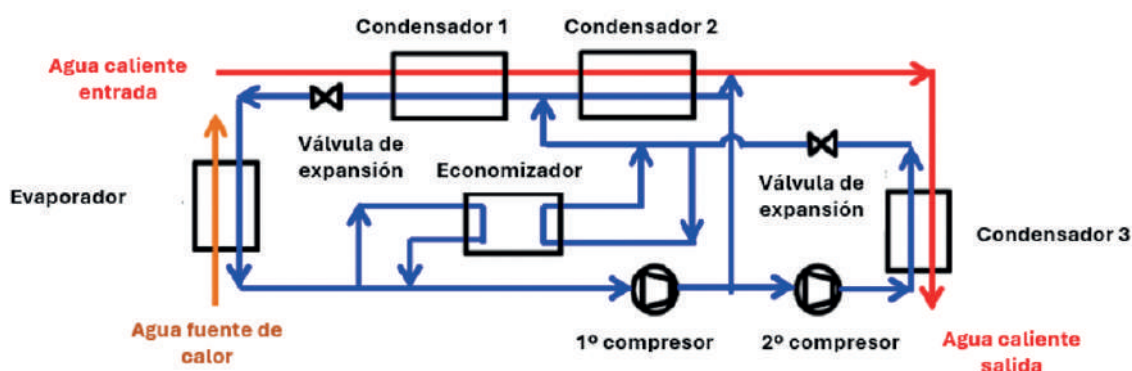


Figura 72: Diagrama prototipo BCAT MHI [30].

Proyecto compresor de paletas “toCircle”

La empresa toCircle ha desarrollado un compresor de paletas que puede operar tanto en ciclo cerrado como en ciclo abierto y utiliza inyección de líquido para su lubricación. Produce vapor saturado a 188 °C y ajustarse la capacidad térmica de 1 a 5 MW_{th}. Como fluido de trabajo puede emplear tanto amoníaco (R717) como agua (R718). El prototipo actual se encuentra en periodo de prueba en la planta de del grupo Dunyie. En la siguiente foto se exhibe un esquema de dicha planta.

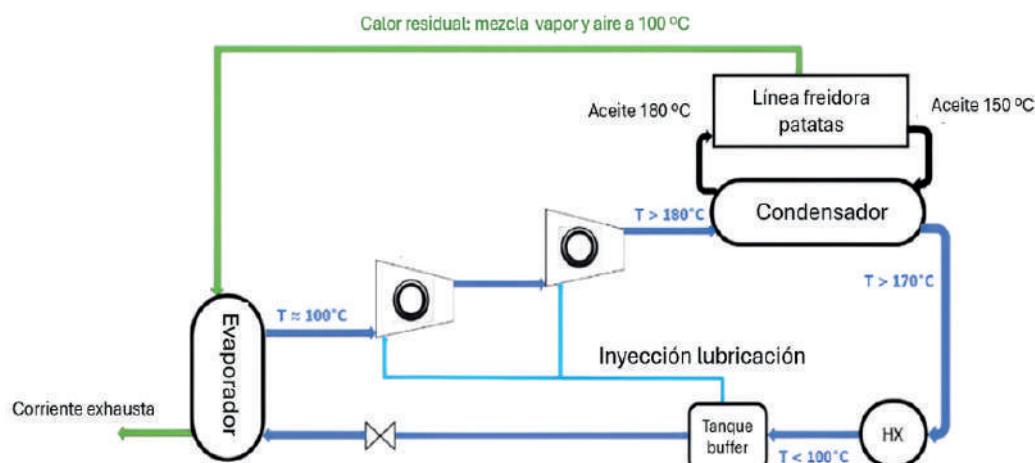


Figura 73: Esquema planta de Dunyie en la que se está probando el compresor prototipo de toCircle en ciclo cerrado [90].

Proyecto BCAT de producción de hielo y calor de forma simultánea de Skala Fabrikk

Skala Fabrikk se encuentra actualmente probando en una planta piloto un prototipo de BCAT capaz de proporcionar temperaturas de hasta 115 °C y producir hielo de forma simultánea o utilizar el calor residual de los enfriadores. Se trata de un modelo de ciclo en cascada que utiliza el refrigerante R600 para la parte de alta temperatura y el refrigerante R290 para la parte de baja temperatura. Consta de compresores pistón semiherméticos, de forma que se consiguen saltos de temperatura de 70 a 135 °C. Actualmente el prototipo puede producir una potencia térmica de calentamiento de 0,3 MW_{th} a 115 °C y una potencia de enfriamiento de 0,15 MW_{th} generando una corriente a 0 °C. Podría generarse hielo a -20 °C, pero en ese caso la potencia sería más reducida. Su COP específico de calentamiento varía de 2 a 2,7 para las temperaturas de entrada de la fuente de calor de -15 y 25 °C respectivamente. No obstante; si se evalúa el ciclo combinado de frío y calor su COP asciende a 4,1.

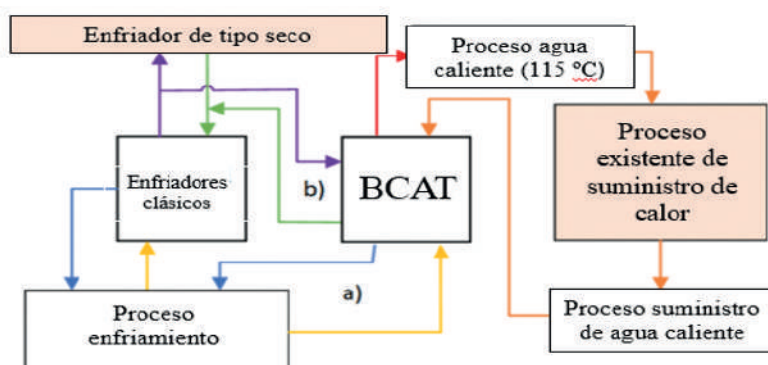


Figura 74: Diagrama simplificado de la planta piloto de la BCAT de Skala Fabrikk. Conexión producción de hielo, b) recuperación de calor residual del proceso de los enfriadores [91].

Anexo II

Presultados y referencias bibliográficas del análisis económico

Modelo	TRL	COP inferior	COP superior	Consumo electricidad COP inferior	Consumo electricidad COP superior	Beneficio COP inferior	Beneficio COP superior	Rentabilidad inferior	Rentabilidad superior	Capital inicial	Recuperación de la inversión inferior	Recuperación de la inversión superior	Temperatura suministro COP inferior	Temperatura suministro COP superior	Salto de temperatura COP inferior	Salto de temperatura COP superior	Ref
Epcon	9	5,5	13	0,18	0,077	205	240	77,5	90,5	300	1,5	1,3	150	150	30	5	[14]
Wiro&Sandvling toCircle	9	5	10	0,20	0,100	199	232	75,3	87,6	200	1,0	0,9	150	120	50	20	[38]
Spilling	6-7	-	5,41	-	0,185	265	204	100,0	77,1	340	-	1,7	-	141	80	80	[91]
Piller	9	3,5	9,5	0,29	0,105	171	230	64,6	87,0	250	1,5	1,1	230	125	40	29	[41]
Stala Fabrikh	9	3,5	4,38	0,29	0,228	171	190	64,6	71,7	850	5,0	4,5	130	158,5	58,2	38	[40]
Stala Fabrikh	7	2,8	-	0,36	-	136	-	51,3	-	600	4,4	-	-	115	-	100	[92]
Fenagry	5-6	2,46	2,63	0,41	0,380	125	134	47,1	50,4	337,5	2,7	2,5	120	120	120	115	[14]
Mayekawa Europe	8	3,2	4,8	0,31	0,208	154	188	58,1	70,8	450	2,9	2,4	120	120	48	48	[89]
COMBITHERM	9	2,2	2,4	0,45	0,417	110	122	41,5	46,2	300	2,7	2,5	-	-	45	39	[44]
Rank	8	-	4,5	-	0,222	-	188	-	70,2	300	-	1,6	-	-	-	30	-
GEA	8	2,46	3,13	0,41	0,319	126	155	47,5	58,3	280	2,2	1,8	120	130	114	124	[53]
Enerstime	4-6	3,3	3,6	0,30	0,278	160	108	60,2	63,4	300	1,9	1,8	140	120	80	65	[96]
ecop	6-7	4,5	5,8	0,22	0,172	178	194	67,2	73,4	700	3,9	3,6	150	130	30	40	[14]
MAN Energy Solutions	7-8	2,85	3,06	0,35	0,327	142	150	53,6	56,5	400	2,8	2,7	150	110	130	100	[57]
Siemens Energy	5-9	2,5	4,1	0,40	0,244	123	174	46,5	65,9	525	4,3	3,0	105	150	103	35	[36]
SPH	6-8	3	3,9	0,33	0,296	144	189	54,4	63,9	575	4,0	3,4	159	140	104	49	[30]
Onondo Technology AS	9	1,7	2,6	0,59	0,385	48	115	18,1	43,3	1200	25,0	10,4	183	144	147	59	[99]
Turboden S.P.A	7-9	2,75	3,1	0,36	0,323	136	149	-	56,3	500	-	3,4	90	150	75	55	[61]
Enerni	8	-	2,16	-	0,465	-	98	-	37,2	700	-	7,1	-	212	-	127	[65]
Mayekawa Europe	9	3,1	3,7	0,32	0,270	159	176	60,1	66,6	-	-	-	120	100	90	70	[88]
Kobeeco SGH 120	9	2,4	3,5	0,42	0,286	128	171	48,4	64,6	-	-	-	120	120	85	55	[47]
Kobeeco SGH 165	9	1,9	3	0,53	0,333	92	156	34,9	58,8	-	-	-	165	135	115	65	[48]
Mitsubishi heavy industry	9	-	3	-	0,333	-	148	-	55,7	-	-	-	-	130	-	75	[52]
Heatten	7-9	3,3	4,8	0,30	0,208	160	191	60,2	72,0	300	1,9	1,6	90	165	50	45	[61]
Fuji	9	2,5	3,5	0,40	0,288	126	163	47,5	61,6	-	-	-	120	120	80	40	[45]
Johnson Controls	7-9	-	4,3	-	0,233	-	181	-	68,2	-	-	-	-	120	-	70	[51]
Opinchi	9	-	0,45	-	0,003	-	234	-	88,3	1500	-	6,4	-	-	-	44	[43]
AGO	8-9	6,4	0,5	-	0,150	-	208	-	78,5	390	-	1,9	-	-	-	28	[55]
Hybrid Energy	9	-	5,6	-	0,150	-	208	-	78,4	400,0	-	1,9	-	120	-	30	[52]
Soroka Absorción tipo I	-	-	2,5	-	0,400	127	127	-	48,1	320	-	2,5	-	-	-	50	[14]
Soroka Absorción tipo II	-	-	0,5	-	0,006	247,9	247,9	-	93,6	753,3	-	3,0	-	-	-	60	[14]

Tabla I: Resultados y referencias bibliográficas del análisis económico.

Ilustraciones

- Figura 1: ODS [107].
- Figura 1: Clasificación BCAT [15]. Elaboración propia.
- Figura 3: Diagrama de un eyector para las BCAT de recompresión térmica del vapor [16].
- Figura 4: Columna de destilación con TVR [17].
- Figura 5: Ejemplo columna de separación con MVR de Inter-etapa y depósito de separación [19].
- Figura 6: Esquema funcionamiento bomba de absorción tipo II [22].
- Figura 7: Esquema funcionamiento bomba de absorción tipo I [22].
- Figura 8: Diagrama presión temperatura de una BCAT de absorción tipo II [23].
- Figura 9: Diagrama P-T y esquema de proceso de una bomba de calor de compresión mecánica de ciclo subcrítico [27].
- Figura 10: BCAT de Ciclo de absorción con compresión asistida [29].
- Figura 11: Diagrama T-S ciclo Stirling [30].
- Figura 12: Esquema BCAT ciclo Stirling [30]. Ciclo Brayton inverso.
- Figura 13: Configuraciones BCAT de ciclo Brayton inverso [31].
- Figura 14: Configuraciones bombas de calor de generación de vapor [14].
- Figura 15: Parámetros operacionales de las distintas SGHP. El (*) hace referencia a bombas de calor de compresión de gas o de absorción tipo II [14].
- Figura 16: Representación de la temperatura de suministro de potencia térmica de distintos procesos con BCAT que emplean compresores [14].
- Figura 17: Clasificación del tipo de elemento de compresión necesario, en función del caudal y el incremento de temperatura necesario para un ciclo abierto MVR [32].
- Figura 18: Válvula de expansión a presión constante [34].
- Figura 19: Ciclo bomba Mitsubishi [52].
- Figura 20: Enertime para producir agua caliente [56].
- Figura 21: Esquema de funcionamiento de la BCAT de Enerin [64].
- Figura 22: COP y ciclos de modelos comerciales de BCAT [44].
- Figura 23: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 120 y 140 °C en función del salto de temperatura, Elaboración propia.
- Figura 24: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 150 y 165 °C en función del salto de temperatura. Elaboración propia.
- Figura 25: Representación de los distintos COP de los modelos de BCAT de temperaturas máximas entre 200 y 280 °C en función del salto de temperatura. Elaboración propia.
- Figura 26: Representación de las temperaturas máximas de suministro y potencias térmicas de distintas BCAT [65].
- Figura 27: Sedes principales fabricantes de BCAT [30].
- Figura 28: Temperaturas y rango de aplicación para distintos refrigerantes de BCAT [30].
- Figura 29: Diagramas P-T, P-h y T-s de los refrigerantes de las BCAT [44].
- Figura 30: Representación de la temperatura de suministro y potencia térmica de diferentes BCAT en función del refrigerante empleado [14].
- Figura 31: Representación de la variación del COP con la temperatura de salida para distintos saltos de temperatura y refrigerantes. Elaboración propia [44],[69],[70]. Elaboración propia.

Ilustraciones

- Figura 32: Siendo el COP de Carnot (izquierda) y el COP de Lorenz (derecha) — función de las temperaturas de la fuente de calor y el sumidero de calor. Los valores marcados corresponden al mismo aumento de temperatura de 70 K y 30 K, ilustrando un aumento casi lineal en el COP con la temperatura de la fuente de calor. El cálculo del COP de Lorenz asume un deslizamiento de temperatura de 30 K en los lados de la fuente de calor y el sumidero de calor [44].
- Figura 32: Diagrama T-s ciclo de Carnot ideal [27].
- Figura 34: Diagrama P-H real [27].
- Figura 35: ciclo subcrítico con eyección y separador flash [72].
- Figura 36: Ciclo cerrado con subenfriador [25].
- Figura 37: Ciclo cerrado con intercambiador de calor intermedio [57].
- Figura 38: Demanda térmica de los distintos sectores industriales en tanto por ciento y por rango de temperatura en UE [92]. Elaboración propia.
- Figura 39: Calor residual por sectores en UE [75].
- Figura 40: Consumo de energía en la industria de los países de UE por temperatura [92]. Elaboración propia.
- Figura 41: Potencial de suministro de calor en UE por sector industrial y país [92]. Elaboración propia
- Figura 42: Potencial de suministro de calor en UE por sector industrial y país [93]. Elaboración propia.
- Figura 43: Inversión en función de la potencia térmica de las tecnologías existentes. Elaboración propia.
- Figura 44: Coste de inversión promedio por tecnología y temperatura de suministro máxima. Elaboración propia.
- Figura 45: Coste de inversión en función de la capacidad térmica de los distintos modelos MVR. Elaboración propia.
- Figura 46: Costes de Inversión de los distintos modelos de MVR por su temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.
- Figura 47: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de su potencia térmica. Elaboración propia.
- Figura 48: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica en función de su potencia térmica. Elaboración propia.
- Figura 49: Coste de inversión de los distintos modelos de compresión mecánica — en función de la temperatura de suministro máxima. Elaboración propia.
- Figura 50: Coste de inversión de los distintos modelos de sorción en función de la potencia térmica. Elaboración propia.
- Figura 51: Coste de inversión de los distintos modelos de sorción en función de la temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.
- Figura 52: Rentabilidad operacional en tanto por ciento de las tecnologías existentes. Elaboración propia.
- Figura 53: Rentabilidad operacional en función del salto de temperatura de los distintos modelos MVR. Elaboración propia.
- Figura 54: Rentabilidad operacional de los distintos modelos MVR en función de la temperatura máxima de suministro a partir de la cual se ha podido obtener su valor de COP. Elaboración propia.
- Figura 55: Rentabilidad operacional de los distintos modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado en función del salto de temperatura. Elaboración propia.

Ilustraciones

- Figura 56: Rentabilidad operacional de los distintos modelos de compresión mecánica en función de la temperatura de operación para la que se ha obtenido el COP. Elaboración propia.
- Figura 57: Rentabilidad operacional de los modelos de sorción e híbridos en función de la temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.
- Figura 58: COP crítico de las BCAT en función del precio de la electricidad y del gas natural. Elaboración propia.
- Figura 59: Periodo de recuperación de la inversión (PRI) de las distintas tecnologías de BCAT. Elaboración propia.
- Figura 60: Periodo de recuperación del capital inicial de los distintos modelos MVR en función del salto de temperatura. Elaboración propia.
- Figura 61: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos MVR en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el vapor del COP. Elaboración propia.
- Figura 62: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos de compresión mecánica de ciclo cerrado en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el valor del COP. Elaboración propia.
- Figura 63: Periodo de recuperación de la inversión de los modelos de compresión mecánica en función de la máxima temperatura de suministro a la cual se ha podido obtener el valor del COP.
- Figura 64: Periodo de recuperación de la inversión de los distintos modelos de sorción en función de la temperatura máxima de suministro. Elaboración propia.
- Figura 65: Mix energético de la generación eléctrica en España y Europa. Elaboración propia [102],[103].
- Figura 66: Comparativa del requerimiento exergéticas y entre las pérdidas exergéticas de las BCAT, una caldera de gas natural y una caldera de gasolina para una temperatura de 180 °C y potencia de 250 kW [104].
- Figura 67: Evaluación del ciclo de vida de una BCAT, una caldera de gas natural y una caldera de gasóleo en función de las categorías de impacto [104].
- Figura 68: Esquema planta piloto del proyecto del DTI [30].
- Figura 69: Esquema BCCV proyecto [30].
- Figura 70: A la izquierda ciclo cerrado de doble etapa con subenfriamiento y a la derecha ciclo cerrado con compresión doble etapa y eyector [89].
- Figura 71: Esquema prototipo BCAT Mayekawa mfg [30].
- Figura 72: Diagrama prototipo BCAT MHI [30].
- Figura 73: Esquema planta de Dunyie en la que se está probando el compresor prototipo de toCircle en ciclo cerrado [90].
- Figura 74: Diagrama simplificado de la planta piloto de la BCAT de Skala Fabrikk. Conexión.

Tablas

Tabla 1:Comparativa absorbentes para las bombas de calor de absorción [21].	—
Tabla 2: Comparativa de las tecnologías de BCAT. Elaboración propia.	—
Tabla 3: Características compresores BCAT [30].	—
Tabla 4: Ventajas y desventajas de los dos evaporadores secos y húmedos [35].	—
Tabla 5: Fabricantes BCAT MVR. Elaboración propia.	—
Tabla 6: Fabricantes BCAT TVR. Elaboración propia.	—
Tabla 7: Fabricantes BCAT compresión mecánica. Elaboración propia.	—
Tabla 8: Fabricantes BCAT absorción tipo I. Elaboración propia.	—
Tabla 9: Fabricantes BCAT absorción tipo II. Elaboración propia.	—
Tabla 10: Fabricantes BCAT adsorción. Elaboración propia.	—
Tabla 11: Fabricantes BCAT y su información sobre sedes y mercados principales. Elaboración propia.	—
Tabla 12: Tabla clasificación de los refrigerantes según el grado de seguridad. Elaboración propia.	—
Tabla 13: Criterios de selección refrigerantes [44],[67].	—
Tabla 14: Características de los refrigerantes [44]. Elaboración propia.	—
Tabla 15: Ecuaciones para el cálculo del COP de las distintas BCAT [14],[71].	—
Tabla 16: Ciclos cerrados BCAT con intercambiador de calor intermedio y o economizador [25].	—
Tabla 17: Ciclos compresión mecánica cerrados con compresión paralela [25].	—
Tabla 18: Ciclos cerrados BCAT en cascada [25].	—
Tabla 19: Ciclos compresión mecánica cerrados multitemperatura [25].	—
Tabla 20: Distintas configuraciones transcriticals y sus especificaciones [25].	—
Tabla 21: Principales retos de las BCAT en función del sistema empleado [76], [77].	—
Tabla 24: Temperaturas de operación superiores a 80 °C donde pueden emplearse BCAT [75],[14]. Elaboración propia.	—
Tabla 25: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología MVR. [30].	—
Tabla 26: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología compresión mecánica.[30].[94]. CCHP hace referencia a BCAT de compresión mecánica	—
Tabla 27: Plantas localizadas que operan con BCAT tecnología sorción e híbrida. [30],[95].	—
Tabla 28: Evaluación y caracterización de daños de las BCAT y las calderas de combustible fósil [104].	—

Lista de acrónimos

BCAT	Bomba de calor de alta temperatura
TVR	Recompresión térmica de vapor
MVR	Recompresión mecánica de vapor
BCGV	Bomba de calor de generación de vapor
COP	Coeficiente de Rendimiento operativo
ODP	Potencial de destrucción de ozono
GWP	Potencial de calentamiento global
CCHP	Bomba de calor de compresión mecánica
UE	Unión Europea
PRI	Periodo de recuperación de la inversión

Este documento se ha desarrollado en el marco de las ayudas a la convocatoria correspondiente al año 2022 de Plataformas Tecnológicas y de Innovación del Programa Estatal para impulsar la investigación científico-técnica y su transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023).

Entidad solicitante: Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética.

Referencia proyecto: ptr2020-001270



CON EL APOYO DE

