

CON EL APOYO DE:



PTR 2018-001043



Plataforma
tecnológica española de
eficiencia energética

Desarrollo y mejora de las tecnologías para utilizar la energía residual industrial incluyendo su conversión en otros vectores que puedan ser comercializados en el sistema energético

ITP 2020

Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética

Autores



AEInnova
Alternative
Energy Innovations

Teresa Márquez



CARTIF

Manuel Andrés Chicote



energylab

Eduardo Rodríguez, Lucía Poceiro,
Yarima Torreiro



circe

Nelson Rene García, Patricia Royo,
Andrea Hernández



tecnalía
Inspiring
Business

Mercedes Gómez de Arteche, Asier
Martínez, Asier Maiztegi



TECNICAS REUNIDAS

Marta Antón Sutil, Miguel Ángel Vega

Fecha de edición: 16 de diciembre de 2020

Colaborador



Plataforma
tecnológica española de
eficiencia energética

Guillermo J. Escobar

Contenido

1.	EXCELENCIA DE LA PROPUESTA	5
1.1.	Evaluación de la demanda de frío y calor en España	6
2.	HORIZONTES TEMPORALES	9
3.	TECNOLOGÍAS DISPONIBLES	11
3.1.	Bombas de calor	11
3.1.1.	Descripción de la tecnología	11
3.1.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	11
3.1.3.	Tipos de bombas de calor	13
3.1.4.	Impactos asociados.....	14
3.1.5.	Análisis DAFO	15
3.2.	Transformadores de calor por absorción.....	16
3.2.1.	Descripción de la tecnología	16
3.2.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	17
3.2.3.	Impactos asociados.....	18
3.2.4.	Análisis DAFO	18
3.3.	Calefacción de distrito	19
3.3.1.	Descripción de la tecnología	19
3.3.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	20
3.3.3.	Impactos asociados.....	21
3.3.4.	Análisis DAFO	21
3.4.	Recuperación de frío de la vaporización de gas natural licuado	22
3.4.1.	Descripción de la tecnología	22
3.4.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	23
3.4.3.	Impactos asociados.....	23
3.4.4.	Análisis DAFO	23
3.5.	Ciclo de Rankine Orgánico	24
3.5.1.	Descripción de la tecnología	24
3.5.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	25
3.5.3.	Impactos asociados.....	27
3.5.4.	Análisis DAFO	28
3.6.	Tecnologías termoeléctricas	30
3.6.1.	Descripción de la tecnología	30
3.6.2.	Tipos de dispositivos termoeléctricos.....	31
3.6.3.	Aplicaciones: industria y mercados.....	32
3.6.4.	Impactos asociados.....	32

3.6.5.	Análisis DAFO.....	32
3.7.	Sistemas de almacenamiento de energía térmica.....	33
3.7.1.	Descripción de la tecnología.....	33
3.7.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	34
3.7.3.	Impactos asociados.....	36
3.7.4.	Análisis DAFO.....	36
3.8.	Conversión de la energía a gases renovables.....	37
3.8.1.	Descripción de la tecnología.....	37
3.8.2.	Aplicaciones: industria y mercados.....	38
3.8.3.	Impactos asociados.....	39
3.8.4.	Análisis DAFO.....	40
4.	RECURSOS NECESARIOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN: ANÁLISIS PESTEL.....	42
4.1.	Recursos políticos.....	42
4.2.	Recursos económicos.....	43
4.3.	Recursos sociales.....	44
4.4.	Recursos tecnológicos.....	44
4.5.	Recursos ecológicos.....	44
4.6.	Recursos legales.....	45
5.	ANÁLISIS DAFO.....	46
6.	CONCLUSIONES.....	47
	Referencias.....	48

1. EXCELENCIA DE LA PROPUESTA

La Unión Europea (UE) se enfrenta en los próximos años a diversos desafíos en el ámbito de la energía, como el cambio climático, la dependencia energética de mercados exteriores (sobre todo de combustibles fósiles), o el envejecimiento de las infraestructuras [1].

Para responder a estos desafíos, los Estados miembro de la UE han acordado una serie de normas y objetivos comunes en el marco de la estrategia «Unión de la Energía» para garantizar el suministro de energía asequible, limpia y sostenible [1]. La Unión por la Energía aspira a alcanzar un mercado energético integrado a escala continental con una creciente interconexión energética que promueva la competencia y el uso eficiente de los recursos, incluyendo medidas de estímulo en el uso de fuentes de energía renovables que contribuyan a descarbonizar el sistema energético en el marco de los acuerdos internacionales de cambio climático [2].

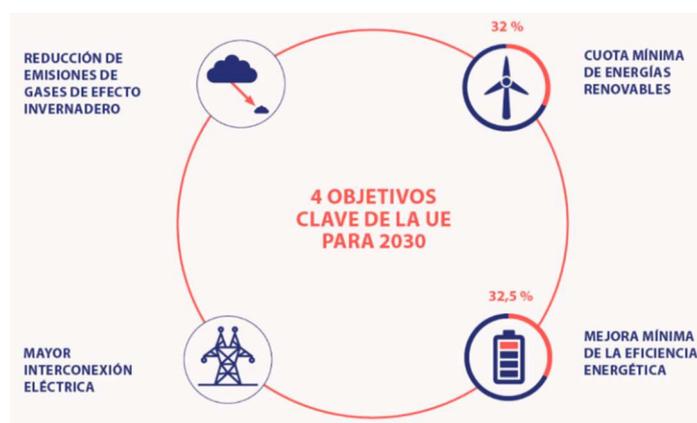


Figura 1. Principales objetivos de la Unión de la Energía
(Fuente: Consejo de la Unión Europea [1])

Los Estados miembros de la UE deben informar sobre su contribución a la Unión de la Energía a través de planes nacionales de energía y clima, que abarcan un período de diez años y deben actualizarse periódicamente [1].

En España, la concreción de los objetivos prioritarios de investigación e innovación en energía y clima se han definido en el «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030» (PNIEC) y se enmarcan en cuatro áreas [2]:

- El desarrollo de fuentes de energía limpias (eólica terrestre y marina, solar fotovoltaica y solar termoeléctrica, bioenergía, energías oceánicas, biomasa, geotermia) y la eficiencia energética, así como de vectores energéticos como el biogás o el hidrógeno.
- La competitividad para mejorar la eficacia de la red española y europea a través del desarrollo de un sistema y mercado interior de la energía altamente digitalizado.
- La seguridad del abastecimiento, para coordinar mejor la oferta y la demanda energéticas nacionales en un contexto internacional.
- El impulso social y tecnológico hacia patrones de menor consumo energético.

El sector industrial nacional representa un cuarto de la energía final total consumida¹, de la cual una parte sustancial se convierte finalmente en calor residual, bien en forma de gases calientes generados en un proceso industrial, o bien en forma de vapor obtenido en procesos de generación eléctrica. El excedente de calor de ciertos procesos puede ser un recurso valioso para otros procesos de la industria e incluso para otras industrias o usuarios, directamente o después de atravesar pasos de transformación intermedios.

Puesto que la cantidad de energía que se pierde en forma de calor es muy relevante, la Unión Europea está invirtiendo en investigación y desarrollo (I+D) en el ámbito de la recuperación de calor residual industrial a través del programa Horizonte 2020. En este marco, se han desarrollado y demostrado métodos, soluciones, tecnologías y prácticas operativas de carácter innovador para mejorar la eficiencia energética en la industria, centrados en la recuperación y valorización del calor residual derivado de los procesos industriales. Los proyectos de I+D incluyen la recuperación y el almacenamiento del calor residual, como en el proyecto VULKANO², el aumento de su temperatura, proyecto INDUS3ES³, o la conversión de dicho calor en electricidad, como en el proyecto i-THERM⁴ [3].

No obstante, el potencial de recuperación del calor residual industrial sigue desaprovechándose debido a una serie de obstáculos tanto técnicos como no técnicos, entre ellos, la necesidad de disponer de tecnologías eficaces y rentables para recuperar el calor que se pierde y poder reutilizarlo, aumentar su temperatura o transformarlo con vistas a su valorización [3].

Por lo tanto, el objetivo de este informe es analizar el potencial de aprovechamiento de la energía residual industrial en España, describir las tecnologías más relevantes en el contexto nacional para su recuperación, utilización y conversión a otros vectores energéticos, como electricidad o gases renovables, y destacar su relevancia en la reducción del impacto medioambiental de los procesos industriales y, por lo tanto, en la transición hacia una economía neutra en carbono.

1.1. Evaluación de la demanda de frío y calor en España

En 2013, la Secretaría de Estado de Energía del MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) llevó a cabo una caracterización de la demanda y de la oferta térmica en el territorio español, y las agrupó en “sistemas de centros consumidores” con características similares, de modo que la demanda pudiera quedar total o parcialmente abastecida [4].

Por un lado, se identificaron como centros de demanda térmica los recogidos en la Tabla 1. Por otro lado, se consideraron las siguientes soluciones con potencial de suministro (oferta térmica):

- Combustibles residuales (biomasa y biogás)
- Calor residual procedente de centrales térmicas, de plantas industriales y de valorización de residuos sólidos urbanos (RSU)
- Cogeneración

¹ De acuerdo con el Consumo de Energía Final por sectores publicado por el IDAE para el año 2018 [37]

² Proyecto VULKANO: <https://cordis.europa.eu/project/id/723803/es>

³ Proyecto INDUS3ES: <https://www.indus3es.eu/>

⁴ Proyecto I-THERM: <https://cordis.europa.eu/project/id/680599/es>

- Energía solar térmica
- Energía geotérmica

Tabla 1. Tipos de demanda térmica
(Fuente: MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) [4])

Categoría difusa	Categoría puntual
<ul style="list-style-type: none"> • Demanda <ul style="list-style-type: none"> - Sector residencial - Sector terciario difuso <ul style="list-style-type: none"> ○ Oficinas ○ Comercios ○ Sanidad ○ Deportivo ○ Espectáculos ○ Ocio y hostelería ○ Cultural - Sector industrial difuso 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda <ul style="list-style-type: none"> - Sector terciario <ul style="list-style-type: none"> ○ Hospitales ○ Centros penitenciarios ○ Edificios institucionales ○ Aeropuertos ○ Centros comerciales - Sector industrial

Como resultado, se localizaron un total de 3.565 sistemas de centros consumidores con potencial técnico para abastecer su demanda térmica mediante soluciones eficientes. La Figura 2 muestra la distribución de sistemas en el territorio nacional.

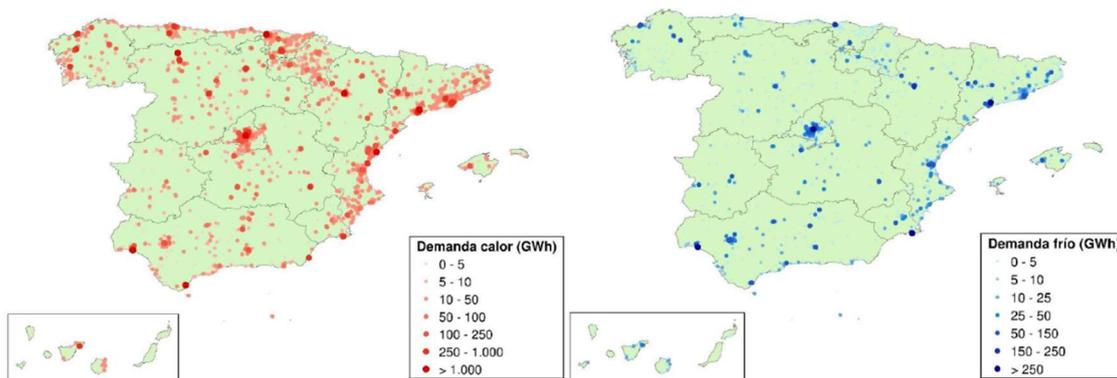


Figura 2. Distribución de la demanda de calor (izquierda) y frío (derecha) en España
(Fuente: MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) [4])

La Tabla 2 recoge la demanda térmica de calor y frío de los sistemas analizados.

Tabla 2. Comparación del potencial técnico identificado y la demanda térmica del año base (2013)
(Fuente: MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) [4])

Uso	Demanda sistemas analizados (GWh)	Demanda nacional año base (GWh)
<i>Calefacción y ACS</i>	135.728	408.019
<i>Refrigeración</i>	24.609	51.818

A continuación, se estudió el potencial económico de cada sistema en función de su valor actualizado neto (VAN), considerando favorables aquellas soluciones con un VAN positivo comparado con el caso base. Finalmente, este parámetro se utilizó para identificar las mejores soluciones para abastecer cada sistema en función del potencial coste eficiente, es decir, optimizando la ratio VAN/MWh y priorizando aquellas soluciones que tenían las mejores ratios hasta completar la demanda del sistema. La Figura 3 muestra la cantidad de energía que potencialmente puede suministrar cada una de las soluciones analizadas para cubrir la demanda térmica nacional. La implementación del potencial coste eficiente generaría 55,6 TWh de calor y 7,0 TWh de frío, lo que supondría en torno al 13,5 % de la demanda de calor y frío del año base, con una inversión total asociada de 32.242 M€.

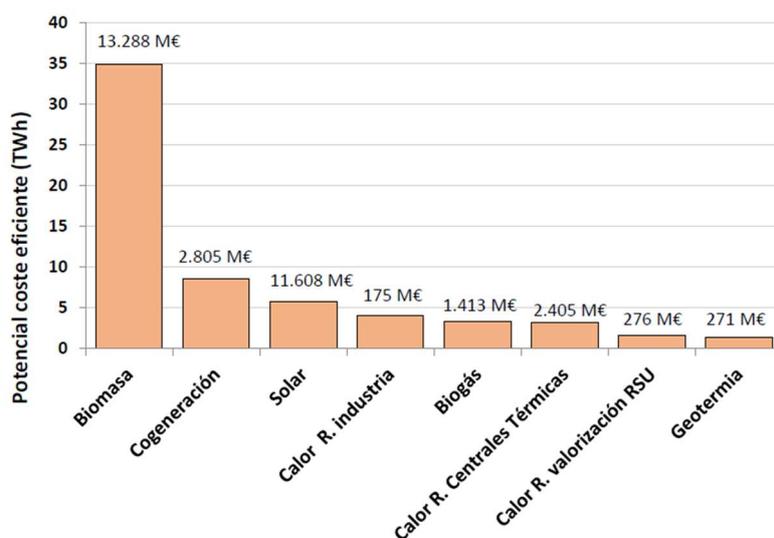


Figura 3. Potencial coste eficiente e inversión de las soluciones técnicas estudiadas
(Fuente: MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) [4])

Después de la biomasa, se estima que el calor residual (como suma de las tres fuentes indicadas en la figura) es el recurso que puede satisfacer un mayor porcentaje de la demanda (15,2 %), pudiendo suministrar un total de 8,4 TWh de calor y 0,4 TWh de frío con una inversión total de 2.856 M€. En tercer lugar, la cogeneración sería la siguiente solución capaz de satisfacer más demanda (14,4%), pudiendo aportar 8,0 TWh de calor y 0,5 TWh de frío. La inversión asociada para el aprovechamiento de este potencial se estima en 2.805 M€.

Aunque los resultados del estudio presentado son muy sensibles a las hipótesis consideradas en su cálculo, debido tanto a la amplitud del horizonte temporal considerado 2015-2050 como al elevado número de variables económicas y energéticas que intervienen en cada una de las alternativas consideradas, el potencial estimado evolucionará en función de las variables mencionadas, pero también conforme a la adopción de políticas adecuadas para su implementación.

2. HORIZONTES TEMPORALES

La Unión Europea se ha fijado unos objetivos para reducir progresivamente las emisiones de gases de efecto invernadero en torno a 85-90 % para el año 2050 con respecto a los niveles alcanzados en 1990 con el fin de avanzar hacia una economía climáticamente neutra [5].

El marco de actuación en materia de clima y energía hasta el año 2030, adoptado por el Consejo Europeo en 2014 y posteriormente revisado en 2018, contempla los siguientes objetivos clave [5]:

- al menos un 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (con respecto a 1990)
- al menos un 32% de cuota de energías renovables
- al menos un 32,5% de mejora de la eficiencia energética
- 15% interconexión eléctrica de los Estados miembros

Asimismo, se propusieron modificaciones al Régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea (RCDE UE) y medidas para los sectores no sujetos a dicho régimen.

La visión estratégica de la Comisión Europea a largo plazo se basa en medidas como la inversión en soluciones tecnológicas realistas, la capacitación de los ciudadanos y la armonización de la acción en ámbitos clave como la política industrial, la financiación o la investigación, garantizando al mismo tiempo la justicia social para una transición justa. Esta visión está en consonancia con el objetivo del Acuerdo de París de mantener el aumento de la temperatura global muy por debajo de 2 °C y de proseguir los esfuerzos para mantenerlo en 1,5 °C [5].

A nivel nacional, el objetivo de España a largo plazo es convertirse en un país neutro en carbono en el año 2050, para lo que se ha fijado el objetivo de lograr al menos una mitigación del 90 % de las emisiones totales con respecto a los niveles de 1990. En esta dirección, en la década de 2021 a 2030, y como resultado de la aplicación de las medidas del PNIEC, las emisiones totales brutas pasarían de los 319,3 MtCO₂-eq previstos para el año 2020, a los 221,8 MtCO₂-eq en 2030. Los sectores de la economía que, en cifras absolutas, reducirán más sus emisiones en ese periodo son los siguientes [2]:

- Generación eléctrica: 36 MtCO₂-eq
- Movilidad y transporte: 27 MtCO₂-eq
- Residencial, comercial e institucional: 10 MtCO₂-eq
- Sector de la industria (combustión): 7 MtCO₂-eq

De esta forma, el PNIEC hace suyo el objetivo de mejora de la eficiencia energética del 32,5% en 2030 aprobado por la Unión Europea. No obstante, con las medidas puestas en marcha y de acuerdo con el ejercicio de modelización realizado, se espera alcanzar un 39,5% de mejora para 2030, lo que se traducirá en un consumo de energía primaria (sin incluir los usos no energéticos) de 98,5 Mtep en ese año [2].

La evolución del consumo de energía primaria a nivel nacional estimada hasta el año 2030 se puede ver en la Figura 4.

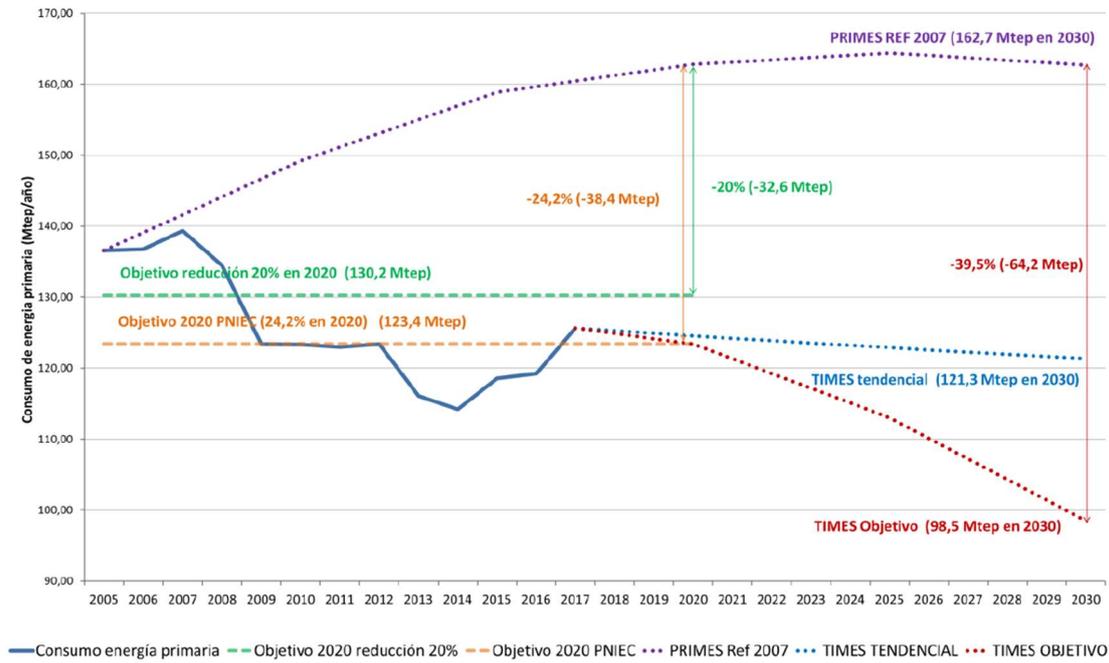


Figura 4. Objetivo de reducción del consumo de energía primaria en España - excluidos usos no energéticos (Mtep/a) (Fuente: PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030) [2])

3. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

3.1. Bombas de calor

3.1.1. Descripción de la tecnología

Una bomba de calor es una máquina térmica que opera de acuerdo a un ciclo inverso respecto a un motor térmico, siendo capaz de absorber un flujo de calor de un foco a baja temperatura (fuente) y suministrar un flujo de calor mayor a otro foco a alta temperatura (sumidero) a través del consumo de una energía motriz (normalmente eléctrica o térmica), como se puede ver en la Figura 5.

Dependiendo de las características específicas del ciclo termodinámico y de la energía motriz utilizada, se pueden considerar distintas aplicaciones, como compresión, absorción, ciclo híbrido, re-compresión de vapor, etc. Actualmente, la tecnología predominante por los valores de eficiencia alcanzables está basada en máquinas de ciclo cerrado de compresión de vapor con accionamiento eléctrico, como se muestra en la Figura 6.

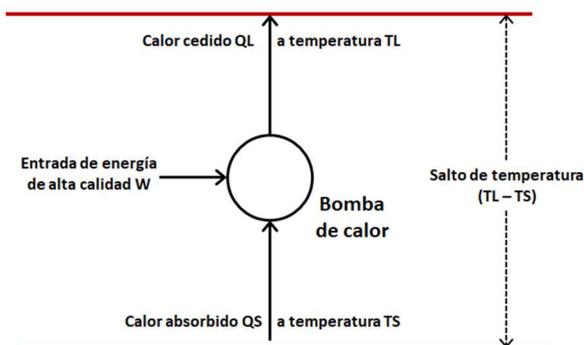


Figura 5. Principio de operación de una bomba de calor (Fuente: IEA [6])

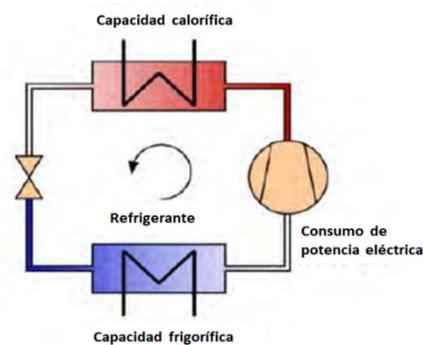


Figura 6. Ciclo cerrado de compresión de vapor (Fuente: IEA [6])

3.1.2. Aplicaciones: industria y mercados

Las bombas de calor están ampliamente establecidas para aplicaciones terciarias y residenciales de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, abarcando un mercado que en los últimos años viene creciendo a un ritmo constante.

Por el contrario, la penetración de las bombas de calor en el sector industrial ha sido mucho menor. Una de las principales barreras es el rango de aplicaciones térmicas, siendo todavía inaccesible por encima de los 150 °C, mientras que la mayor parte de la demanda energética del sector industrial requiere temperaturas superiores a 100 °C. No obstante, el potencial técnico por debajo de esas temperaturas es enorme (estimado en 174 TWh/a en la Unión Europea) [7] en sectores como el alimentario, el químico o la industria papelera. Dentro de estos sectores, procesos de secado, pasteurización, esterilizado, evaporación y destilación destacan como los más interesantes para la aplicación de esta tecnología.

Además, el calor residual recuperado de entornos industriales puede utilizarse también para cubrir demandas fuera de la industria como pueden ser las necesidades de calefacción y/o agua caliente sanitaria en edificios residenciales y terciarios, con especial mención a su utilización a través de distribución en redes de calor. En este sentido, la Figura 7 muestra un resumen de los procesos industriales susceptibles para la integración de tecnología de bomba de calor destacando los niveles típicos de temperatura de uso y el nivel de madurez de la tecnología requerida en cada caso.

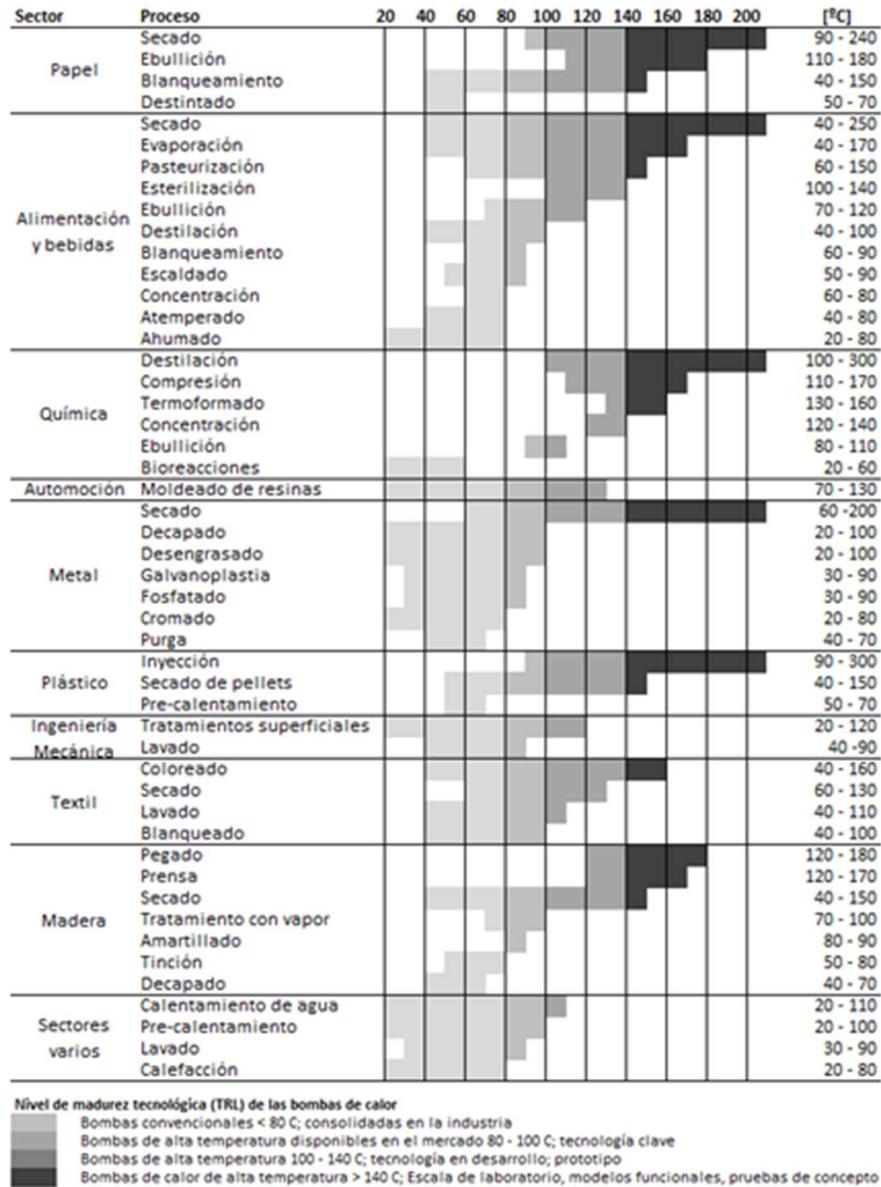


Figura 7. Listado de industrias y procesos para la recuperación de calor residual mediante bomba de calor (Fuente: Arpagaus et al. [8])

Para estimular la implementación de bombas de calor en recuperación de calor residual de la industria, se apuntan los siguientes recursos y acciones:

- Fomento de acciones de formación y eventos que apoyen adicionalmente la propagación de conocimiento de la tecnología de bomba de calor para recuperación de energía residual en entornos industriales, estando orientadas a los distintos actores de la cadena de valor (consultores, inversores, diseñadores y operadores de plantas, instaladores, etc.)
- Financiación de actividades de I+D+i tanto en avances de investigación básica (nuevos refrigerantes, nuevas configuraciones de ciclos para aplicaciones de alta temperatura) como en proyectos piloto de demostración que constituyan una base sólida para motivar un despegue del mercado y empresas proveedoras de tecnología que apuesten por las bombas de calor en estos segmentos de temperaturas y capacidades.
- Revisión (y actualización en su caso) del marco normativo local de manera que se garanticen unas condiciones mínimas de certidumbre que favorezcan la implementación de proyectos de recuperación de calor industrial con bomba de calor. En particular, la adecuada articulación de esquemas de tasas a las emisiones de gases de efecto invernadero puede tener efectos positivos para motivar la implementación de tecnología de bomba de calor.

3.1.3. Tipos de bombas de calor

Pese a que no existe un consenso absoluto en la terminología y clasificación de distintos tipos de bombas de calor industriales, es posible diferenciar entre dos segmentos de operación principales separados por la barrera de los 100 °C:

- **Bombas de calor convencionales:** con temperaturas de producción de calor útil por debajo de los 100 °C, se encuentra establecidas en la industria o disponibles en el mercado.
La introducción de bombas de calor con temperatura de funcionamiento por debajo de 100 °C se considera en muchos casos relativamente sencilla y en los últimos años el número de casos de éxito y ejemplos operativos en la industria vienen incrementándose notablemente. En países como Japón y Corea del Sur, y en menor medida en Europa, estas aplicaciones están bien establecidas.
La Asociación Europea de fabricantes de bomba de calor (EHPA, del inglés, European Heat Pump Association) ha recogido ya dos volúmenes [7], [9] de algunos de los proyectos de referencia en este sentido, los cuales están vinculados a la tecnología de los principales fabricantes de bombas de calor industriales que se detallarán más adelante. En la Tabla 3 se incluye una lista con los más representativos:
- **Bombas de calor de alta temperatura** (HTHP, del inglés, high-temperature heat pumps): con temperaturas del sumidero de calor entre 100 °C y 150 °C, que se encuentran en fase de desarrollo con distintos niveles de madurez.
La aplicación de bombas de calor a temperaturas por encima de los 100 °C aún requiere actividades adicionales de I+D, la integración de estas en procesos industriales y el desarrollo de refrigerantes ecológicos de alta temperatura. El estado del arte de las bombas de calor de alta temperatura está determinado por su desarrollo principal en proyectos de investigación y niveles de eficiencia con valores del coeficiente de rendimiento (COP, del inglés, coefficient of performance) entre 2,2 a 6,5 (con elevaciones de temperatura de 70 °C y 30 °C, respectivamente).
El fluido de trabajo seleccionado para las bombas de calor determina el rendimiento máximo obtenido a determinadas temperaturas del disipador de calor. Mientras que a

temperaturas más bajas, los refrigerantes tradicionales como R134a, R32 y R290 se vienen utilizando en las aplicaciones industriales existentes de forma satisfactoria, para aplicaciones de alta temperatura es necesario considerar otros fluidos (y mezclas de fluidos) con propiedades adaptadas a los niveles térmicos requeridos. Además, para temperaturas más altas del disipador de calor y aumentos del salto de temperatura a cubrir, el COP se puede mejorar utilizando configuraciones avanzadas.

Por lo tanto, las actividades de I+D actual en HTHP tienen como objetivo cubrir las temperaturas más altas del disipador de calor con fluidos de trabajo adecuados y configuraciones de eficiencia energética mejorada [10].

En el ámbito nacional español destacan varios agentes con capacidades de investigación y desarrollo de bombas de calor, entre los que cabe remarcar: Grupo de Investigación ISTENER de la Universidad Jaume I de Castellón⁵, Área Térmica del Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia⁶, RANK⁷, TECNALIA⁸, ARANER⁹, KEYTER¹⁰, entre otros.

Tabla 3. Listado de casos representativos de integración de bombas de calor industriales en Europa
(Fuente: EHPA (European Heat Pumps Association) [9])

SECTOR	APLICACIÓN	PAÍS	FABRICANTE	CAPACIDAD	COP	T (°C)	FLUIDO
Alimentario	General	BE	MAYEKAWA	1000 kW	4,5	78	NH ₃
Alimentario	Calor de proceso	NL	GEA	1400 kW	5,9	63	NH ₃
Alimentario	DH	DK	MAYEKAWA	4-7 MW	10	85	NH ₃
Biomasa	Calor de proceso	AL	GEA	9020 kW	4,7	83	NH ₃
Maquinaria	Calefacción	AL	VISSMAN	107 kW	4,7	70	R134a
Metales	Calefacción	AL	VISSMAN	600 kW	4,3	65	R134a
Plástico	General	FI	CALEFA	600 kW	4,3	65	R134a
Químico	Calefacción y ACS	FI	CALEFA	650 kW	3,2-4,5	55-75	R134a

3.1.4. Impactos asociados

El uso de bombas de calor supone un ahorro de energía directo determinado por el coeficiente de rendimiento. A modo comparativo, las bombas de calor que aumentan la temperatura hasta en 50 °C son capaces de generar calor a un coste asociado en torno a 10 USD/GJ (asumiendo unos

⁵ Grupo de investigación ISTENER de la Universidad Jaume I de Castellón: <http://www.istener.uji.es/>

⁶ Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia: <http://www.iie.upv.es/inicio>

⁷ RANK: <https://www.rank-orc.com/es/>

⁸ TECNALIA: <https://www.tecnalia.com/es/thermal-systems-lab.htm>

⁹ ARANER: <https://www.araner.com/solutions/industrial-heat-pump/>

¹⁰ KEYTER: <https://www.keyter.com/es/>

costes iniciales de 160 USD/MW de potencia), mientras que una caldera típica y un sistema de vapor que usa gas natural (asumiendo un precio del gas natural de 12 USD/GJ) pueden entregar calor al proceso a un coste de 15 USD/GJ. Por lo tanto, las bombas de calor constituyen una alternativa eficiente para calderas y sistemas de vapor [11].

En aplicaciones industriales, las bombas de calor aumentarían el rendimiento global de la planta y permitirían un mejor control del uso del calor, que conduce a mejoras en la calidad del producto y una mayor confiabilidad que con los sistemas de vapor. Además, las bombas de calor permiten recuperar el calor sensible y, en algunos casos, también latente que, de otro modo, se desperdiciaría.

Las decisiones de inversión en tecnología de bomba de calor industrial para recuperación de calor deben estar motivadas por un balance entre los costes iniciales de adquisición e instalación y la reducción de los costes de operación derivados que conlleven un retorno de esa inversión. Las bombas de calor tienen periodos de amortización estimados de seis años (con una tasa interna de rendimiento superior al 15 % anual) basándose únicamente en los beneficios energéticos directos. No obstante, cuando estas instalaciones permiten la retirada de calderas y sistemas de vapor, o cuando las bombas de calor cumplen una función de refrigeración y calefacción simultáneamente, los sistemas podrían amortizarse en menos de 3 años. Dadas estas tasas de rendimiento, existe la posibilidad de que mecanismos de financiación bien diseñados proporcionen paquetes financieros de bajo costo inicial y flujo de efectivo positivo para esta tecnología.

Por otro lado, las bombas de calor industriales tienen potencial para cubrir cerca de 222 TWh/a en suministro de calor de proceso hasta 100 °C en la industria europea, lo cual podría conducir a reducciones de emisiones de CO₂ del orden de 51 MtCO₂/a. A su vez, el desarrollo y consolidación de las HTHPs para demandas por encima de los 100 °C contribuirían a cubrir unos 508 TWh/a adicionales, suponiendo una reducción de emisiones de 95 MtCO₂/a [12].

Finalmente, cabe destacar que el sector europeo de bombas de calor emplea mano de obra cualificada en perfiles de I+D, fabricantes de componentes, así como instaladores y operarios de servicio y mantenimiento. De acuerdo con un reciente informe de EHPA [13], la industria se identifica como fuerza económica y proveedora de mano de obra local. La expansión del sector de las bombas de calor hacia el establecimiento de productos y soluciones para la recuperación de calor industrial residual impulsaría aún más las innovaciones, estimularía la creación de numerosos puestos de trabajo y contribuiría de manera significativa al crecimiento económico. Bajo el supuesto de que se pueda establecer un despliegue en el mercado de bombas de calor industriales dentro de Europa en torno al 5% total potencial por año (37 TWh/a), la facturación total de toda la cadena de valor en el continente se estima en el orden de 2.300 M€/a, lo que implicaría a su vez, la creación de 14.500 nuevos puestos de trabajo. La exportación de tecnología además facilitaría la creación de más ingresos y trabajos.

3.1.5. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presentan las bombas de calor y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 4. Análisis DAFO de las bombas de calor

FORTALEZAS	DEBILIDADES
1. Posibilidad de generar aprovechamiento conjunto de la producción de frío y calor 2. Adaptación a un rango amplio de temperatura del calor residual, así como a un número muy elevado de aplicaciones tanto en la industria como fuera de ella (ACS, climatización de edificios, etc.)	1. Costes iniciales elevados 2. Bajo nivel de madurez en ciertos rangos de temperatura relevantes (> 100 °C) 3. Escasez de proveedores tecnológicos 4. Escasez de proyectos piloto de referencia 5. Falta de refrigerantes en el rango de la alta temperatura 6. Falta de conocimiento experto y concienciación de los beneficios de la tecnología dentro de la industria
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Reducción de costes de la producción eléctrica (fuerza motriz de las bombas de calor) con fuentes de energía renovable (ej.: solar fotovoltaica)	1. Regulación cada vez más restrictiva en materia de refrigerantes 2. Incertidumbre en los precios de la energía y en particular, precio competitivo del gas. Ratios de precios electricidad/gases muy variables según el contexto nacional ¹¹

3.2. Transformadores de calor por absorción

3.2.1. Descripción de la tecnología

La tecnología de transformador de calor por absorción (AHT, del inglés, Absorption Heat Transformer) de simple efecto es capaz de incrementar la temperatura de aproximadamente el 50 % (COP térmico de 0,5) de una corriente de calor residual y revalorizar su temperatura en 50 °C, dependiendo de las condiciones de contorno. Esta tecnología tiene su rango de aplicación en flujos de calor de residual con temperatura inferior a 120 °C, ampliamente disponibles en la industria energéticamente intensiva, como es el caso de la industria química (procesos de destilación, purificación), papelera (procesos de secado y laminado) y alimentaria (procesos de secado, esterilización y fermentación).

¹¹ La variabilidad de los costes de la electricidad y el gas entre países hacen que la misma implementación de una bomba de calor industrial pueda tener periodos de retorno de 1 año en Noruega y exceder los 10 años en Alemania en base a las condiciones actuales.

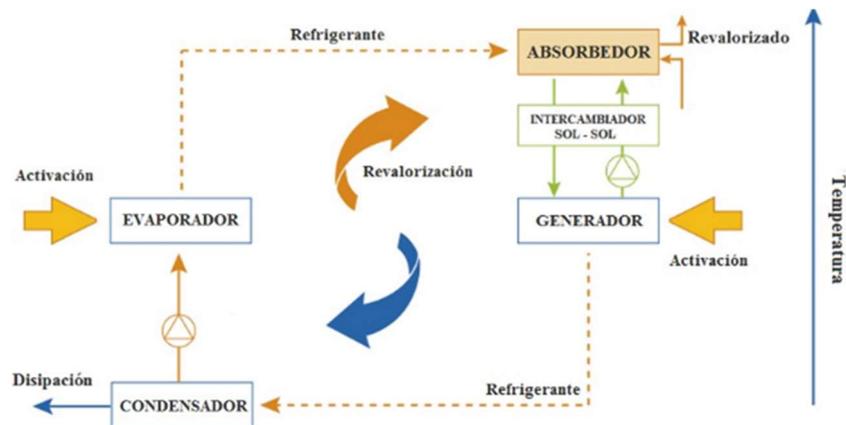


Figura 8. Ciclo del transformador de calor por absorción
(Fuente: TECNALIA)

La operación del AHT es similar a la del ciclo de refrigeración por absorción, pero trabajando a la inversa. Como se puede observar en la Figura 8, los componentes principales del AHT son: evaporador y absorbedor, trabajando a alta presión; y condensador y generador, trabajando a baja presión. En este caso, la corriente de calor residual es la encargada de separar el refrigerante (agua) del absorbente (solución de LiBr-H₂O) en el propio generador (activación). El refrigerante en estado vapor se dirige al condensador, disipando su calor latente a temperatura ambiente. A continuación, el refrigerante es bombeado hacia el evaporador (alta presión), donde, al igual que la activación del generador, es alimentado por la corriente residual. El refrigerante en estado vapor se dirige hacia el absorbedor, donde es absorbido por la disolución concentrada de LiBr, proveniente del generador. El propio proceso de absorción es un proceso exotérmico, y es donde el calor liberado, a una mayor temperatura es transferido a una corriente exterior, obteniendo así el efecto útil de revalorización del proceso.

Además del propio circuito interno descrito, el AHT consta de los circuitos externos necesarios para llevar a cabo la activación térmica resultante de la alimentación y los procesos descritos en evaporador y generador; el circuito de revalorización, al cual se transfiere el calor de absorción en el propio absorbedor, y el circuito de disipación del condensador.

El AHT es una tecnología que permite recuperar y revalorizar parte del calor residual de baja entalpía, teniendo un consumo de electricidad asociado despreciable, por lo que permite reducir las emisiones de CO₂ en procesos industriales. El AHT es una tecnología versátil y aplicable a un amplio intervalo de potencias.

3.2.2. Aplicaciones: industria y mercados

Para llevar a cabo la impulsión de esta tecnología se debería aumentar la potencia de las máquinas como mínimo hasta 1 MW de calor revalorizado e incrementar la diseminación de la tecnología en el entorno de los sectores señalados con flujos de calor residual inferior a 120 °C (papel, química, petroquímica, farmacéutica, alimentario) para concienciar la participación industrial y la implantación de prototipos a gran escala. Los sectores principales de interés y sus procesos son:

- Industria del papel: procesos de secado y laminado, 60-100 °C.
- Industria química/refinería y farmacéutica: procesos de destilación y purificación, 100-140 °C.
- Industria alimentaria: procesos de secado, esterilización, fermentación, 60-100 °C.

A nivel nacional y europeo se podría afirmar que esta tecnología se encuentra en un TRL 7, ya que no existen equipos comerciales de fabricación nacional/europea hoy en día. En Asia, empresas como Hitachi y Thermax han llegado a fabricar AHT y comercializarlos, mayoritariamente en este continente.

En el marco del proyecto europeo INDUS3ES³, liderado por TecNALIA Research & Innovation, se ha llevado a cabo un demostrador de 200 kW en una refinería localizada en Turquía, cuya operación comenzó en 2019. Se espera que, para el año 2025, se haya llegado a un TRL9 y existan equipos implantados en la industria española.

Cabe destacar la importancia de la existencia de iniciativas nacionales, como Retos o Misiones-CDTI, y europeas, como H2020, SPIRE u HORIZONTE EUROPA.

3.2.3. Impactos asociados

En lo que se refiere a los impactos medioambientales, en los 20 años de vida útil de una máquina de 1 MW de calor revalorizado, se podrían llegar a ahorrar unas 30.000 toneladas de CO₂, lo que supone unos 60 kg CO₂/€ invertido. Además, cabe destacar que no existe consumo de energía final en este equipo ya que prima el principio de activación térmica. Para la realización de este cálculo se ha considerado como referencia, las emisiones de una caldera de gas (las emisiones de una caldera de gas natural son unos 50 kg CO₂/GJ).

En lo que se refiere a la viabilidad económica, la inversión estimada para equipos a escala comercial es:

- AHT de 200 kW ~ 1.500 €/kW revalorizado.
- AHT de 600 kW ~ 650 €/kW revalorizado.
- AHT de 1200 kW ~ 500 €/kW revalorizado.

El coste aproximado del AHT representa entre el 25 % y el 50 % de la inversión total, para instalaciones de pequeña (100 kW) y gran potencia (> 1.200 kW) respectivamente.

3.2.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presenta la tecnología AHT y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 5. Análisis DAFO de los transformadores de calor por absorción

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se basa en el principio de activación térmica (no hay consumo de energía final) 2. Bajos costes de operación y mantenimiento 3. Periodos de retorno de la inversión inferior a 6 años 4. Tecnología probada desde los años 80 en Asia 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desconocimiento de la tecnología a nivel industrial 2. Falta desarrollo de esta tecnología a nivel europeo 3. Falta de testeo a nivel nacional y necesidad de demostradores
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Valorización de corrientes de baja temperatura (< 100 °C), las cuales son abundantes en la industria energéticamente intensiva 2. Posibilidad de implementación en redes de distrito existentes 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Otras tecnologías existentes poseen mayor visibilidad y desarrollos conocidos a nivel europeo

3.3. Calefacción de distrito

3.3.1. Descripción de la tecnología

Una aplicación natural del calor residual de muy baja temperatura (<100 °C) producido en la industria es su uso para sistemas de calefacción de edificios o instalaciones cercanas. El esquema sería el siguiente:

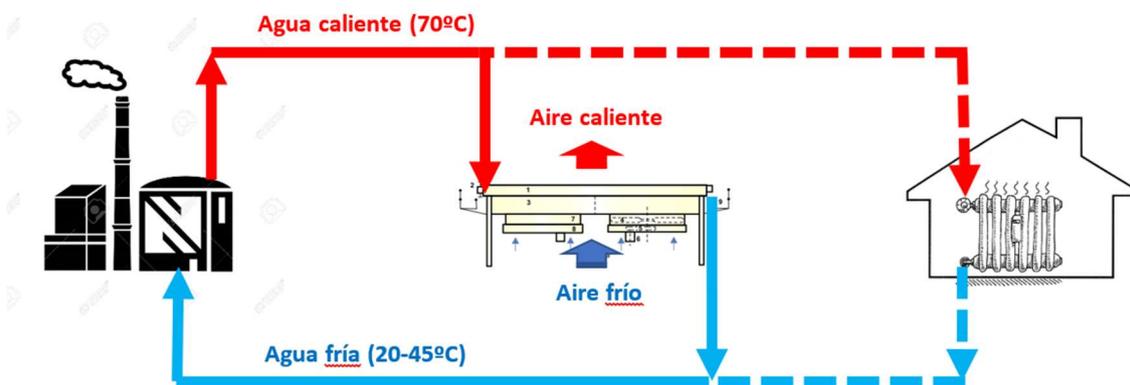


Figura 9. Esquema de la calefacción de distrito
(Fuente: Técnicas Reunidas)

La calefacción de distrito aprovecha el agua fría de retorno de la red de distribución como agua de refrigeración de la industria cercana. Este sistema funciona de la siguiente manera:

- Una instalación industrial requiere un sistema de agua de refrigeración, que entra a la misma a una temperatura entre 20 y 45 °C y lo abandona a unos 70 °C. Típicamente, estas instalaciones pueden ser sistemas de refrigeración de micro-CHPs, generadores de tamaño medio, pilas de combustible, motores, enfriadores de máquinas...
- El agua de refrigeración, que habitualmente circula en circuito cerrado, se calienta en el equipo industrial y se enfría de nuevo en un equipo de aero-refrigerantes hasta una temperatura ligeramente superior a la temperatura ambiente. El equipo industrial es el “foco caliente” y el aero-refrigerador es el “foco frío” del circuito de agua de refrigeración.
- Este calor de muy baja temperatura no se recupera, sino que se “tira” a la atmósfera.
- La recuperación propuesta consiste en utilizar como “foco frío” el sistema de calefacción residencial: parte (o todo) el agua que sale del equipo industrial se lleva a un sistema de calefacciones, donde entra a unos 70 °C y es devuelto a unos 40 °C

De este modo, se tienen las siguientes ventajas:

- Principalmente, se desplaza otras fuentes de calefacción (gas natural, electricidad o carbón) y por tanto se abaten las emisiones de CO₂ correspondientes.
- En menor medida, se reduce el consumo eléctrico de los aero-refrigeradores (o foco frío) de agua de refrigeración del sistema industrial.

Este tipo de sistemas se utiliza de forma satisfactoria en países como Suecia [14], si bien es siempre importante contar una fuente de calor de respaldo en caso de que la planta industrial no aporte el calor necesario por algún motivo.

Existen suministradores de micro CHPs basados en pila de combustible que indican la cantidad de calor de baja temperatura disponible (como Doosan Fuel Cell America [15]), para ser utilizado en calefacciones cercanas, y consideran esta recuperación en el modelo de negocio y en la huella de carbono del sistema de producción eléctrica. En estos equipos en particular, este calor es el 25% de la energía consumida en forma de combustible.

3.3.2. Aplicaciones: industria y mercados

Existen diversos sistemas y suministradores de calefacción de distrito, pues se trata de una tecnología madura. En general, se basan en generación centralizada para varias viviendas y distribución de calor a las mismas para ahorrar costes, pudiendo alcanzar mejores precios y eficiencias en las economías de escala.

La innovación necesaria consiste en alimentar estos sistemas (existentes o nuevos) con calor residual de la industria, el cual no iba a ser aprovechado, cerca de plantas industriales (bien para viviendas, o bien para oficinas cercanas). Todas las tecnologías están suficiente maduras y se trata solo de una aplicación/integración novedosa de muy bajo riesgo técnico. A corto plazo, dado que todas las tecnologías son maduras, se podrían impulsar estos pilotos, añadiendo la ventaja de la descarbonización (ayudas públicas, reducción de emisiones y tasas asociadas).

3.3.3. Impactos asociados

El potencial de recuperación de calor de baja temperatura para sistemas de calefacción tiene más sentido cuanto más frío es el clima, ya que la demanda de calefacción será mayor. En instalaciones de tamaño pequeño o medio, con poblaciones cercanas y en zonas frías, tendría sentido realizar un estudio de viabilidad. Pero es especialmente interesante en instalaciones industriales de gran tamaño con edificios de oficinas cercanos o en la propia instalación. En estas instalaciones, es muy posible que las necesidades de calefacción puedan venir del calor residual de baja temperatura. Estas industrias (metalurgia, petroquímica, refino) se verían beneficiadas por proyectos orientados a reducir la huella de carbono, mejorando su imagen y pudiendo optar a ayudas españolas (CDTI, IDAE) y europeas (Innovation Funds, Green Deal, etc.).

El uso de calor residual permite desplazar otros combustibles o energías usadas para la calefacción, es decir, permite aumentar el rendimiento térmico de un sistema de generación eléctrico o planta industrial. En un sistema de generación eléctrica, se puede llegar a un incremento del rendimiento térmico del 25 %, pasando de un rendimiento típico del 50-60 % [16] a un rendimiento del 75-85 %.

3.3.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presenta la calefacción de distrito y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 6. Análisis DAFO de la calefacción de distrito

FORTALEZAS	DEBILIDADES
1. Inversiones pequeñas 2. Bajo riesgo tecnológico 3. Reduce costes de operación	1. Mayores costes de implantación que tecnologías tradicionales de calefacción 2. Mayores plazos de ejecución, permisos, etc. que tecnologías tradicionales de calefacción.
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Ayudas públicas para promover la eficiencia energética en el sector residencial mediante la mejora de redes de distribución de frío y calor	1. Necesidad de un marco regulatorio y ayudas o impulso público 2. Bajo precio de los productos sustitutos (calderas tradicionales, calor desde electricidad, etc.)

3.4. Recuperación de frío de la vaporización de gas natural licuado

3.4.1. Descripción de la tecnología

Las plantas de regasificación reciben el gas natural licuado que llega por mar en buques metaneros para pasarlo de su estado líquido a gaseoso y desde ahí distribuirlo por la red de transporte y distribución hacia los consumidores finales.

El GNL se almacena en grandes cantidades a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, y para regasificarlo se calienta usando, normalmente, vaporizadores de aire (plantas satélites) o vaporizadores de agua de mar (plantas de regasificación). Toda esa ingente cantidad de energía frigorífica (miles de GWh) es actualmente una energía residual, una energía que se pierde o que se “regala” al aire o al agua todos los días del año y durante todas las horas del día.

La recuperación del frío excedente de la vaporización del GNL podría alimentar un circuito cerrado de CO_2 que transportaría este frío en forma de CO_2 líquido a consumidores finales cercanos a las estaciones de regasificación. La Figura 10 muestra un esquema de recuperación del frío residual de la vaporización de GNL.

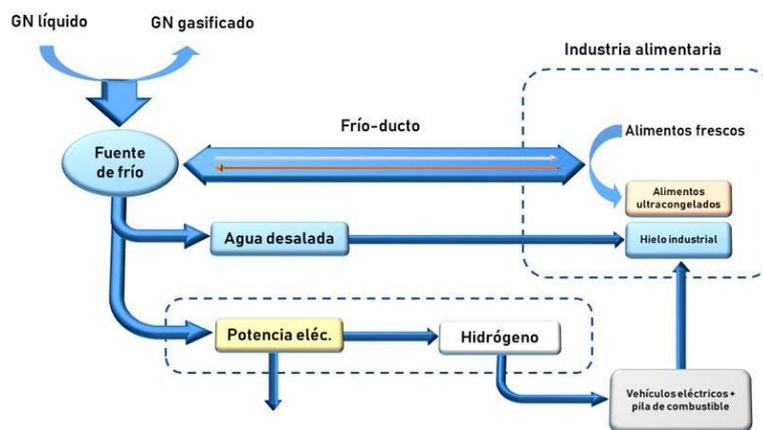


Figura 10. Esquema de recuperación de frío residual
(Fuente: Proyecto FEDER Ininterconecta – Shaky, cofinanciado por CDTI¹²)

El principal carácter innovador de esta tecnología radica en aprovechar flujos térmicos preexistentes para obtener una ultra-congelación gracias a la regasificación de GNL. Esta tecnología pretende valorizar esta energía térmica promoviendo el acercamiento físico de empresas consumidoras de frío (naves de conservación y congelado, fábricas de hielo a nivel industrial, industria de la separación del aire como oxígeno y nitrógeno, industria del CO_2 sólido

¹² Proyecto Shaky: <http://www.ariema.com/sobre-ariema/proyectos/proyecto-shaky#:~:text=T%C3%ADtulo%3A%20Uso%20de%20fr%C3%ADo%20residual,uso%20de%20pilas%20de%20combustible.&text=Duraci%C3%B3n%20del%20proyecto%3A%20Octubre%202018%20E2%80%9320Diciembre%202020>

o hielo seco, depuración de agua de mar, conservación de hemoglobina, district cooling, etc.) a las plantas de regasificación de GNL.

3.4.2. Aplicaciones: industria y mercados

En España hay siete plantas de regasificación localizadas en Mugarodos, Sagunto, Bilbao, Barcelona, Cartagena, Huelva y El Musel [17]. Estas plantas son principalmente propiedad de Enagás, quien ha realizado varios estudios en colaboración con otras empresas, como Técnicas Reunidas, para analizar la viabilidad de recuperar el frío de la vaporización de gas natural licuado en la planta de regasificación de Barcelona.

Actualmente, existe un proyecto de implementación de esta tecnología que tiene previsto el aprovechamiento del este calor para la planta de Huelva, conocido como proyecto Shaky [18]. Por un lado, este proyecto busca utilizar los excedentes de frío procedentes del GNL para desarrollar un novedoso tratamiento por congelación para producir hielo y ultra-congelar productos relacionados con la alimentación. Este proceso de congelación será inferior a los 10 minutos para alcanzar la total congelación del producto a una temperatura por debajo de los -35 °C. Por otro lado, se pretende aprovechar parte de esta energía criogénica para conversión en otras formas de energía:

- Se utilizará parte del frío para la destilación de agua dulce, pudiendo usar la misma durante distintas etapas del proceso. Para ello, se construirá un dispositivo que permitirá depurar el agua necesaria basándose en un método fundamentado en el ahorro energético.
- Se utilizarán los excedentes de frío para producir hidrógeno mediante electrólisis y utilizarlo en un sistema de generación auxiliar basado en pila de combustible para vehículos de transporte refrigerado, a través de la transformación previa de esa energía térmica en eléctrica.

3.4.3. Impactos asociados

Con siete plantas en operación, España es el país con más regasificadoras de Europa [17]. Por lo tanto, se podría aprovechar la infraestructura existente y mejorar su rendimiento energético y económico para la valorización de un frío que no iba a ser aprovechado.

3.4.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presenta la recuperación de frío de la vaporización de gas natural licuado y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 7. Análisis DAFO de la recuperación de frío de la vaporización de gas natural licuado

FORTALEZAS	DEBILIDADES
1. Gran cantidad de energía disponible (miles de GWh)	1. Inversiones elevadas 2. Búsqueda de usuarios finales de ese frío cerca de las instalaciones
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Interés de empresas grandes con estudios a nivel de planta piloto 2. Muchas plantas disponibles donde poder hacer pilotos	1. Bajo precio de las tecnologías alternativas (frío desde electricidad / bombas de calor)

3.5. Ciclo de Rankine Orgánico

3.5.1. Descripción de la tecnología

La tecnología de Ciclo de Rankine Orgánico, en adelante ORC por sus siglas en inglés (Organic Rankine Cycle), es un sistema que permite la conversión de calor en electricidad a través de un conjunto de procesos fisicoquímicos que involucran un fluido de trabajo en un circuito cerrado.

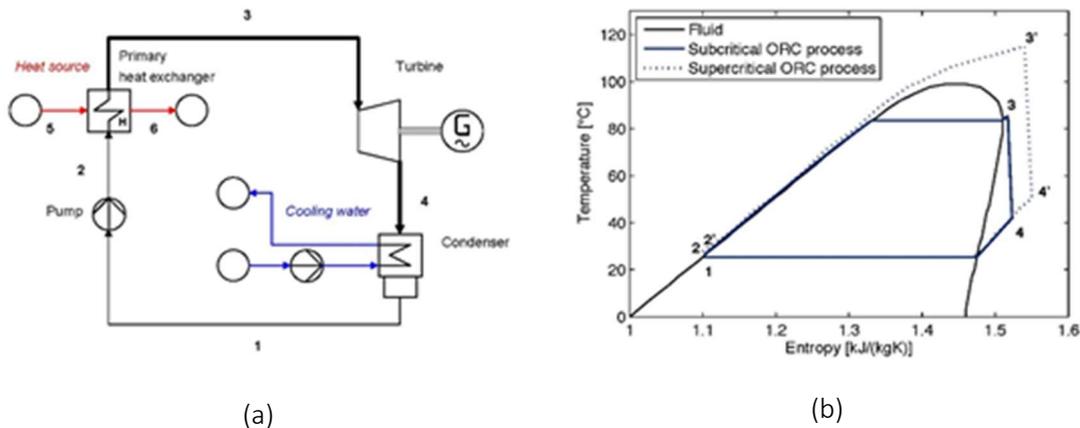


Figura 11. Representación de un sistema ORC
 (a) configuración de un ORC y (b) Proceso ORC en un diagrama T-s
 (Fuente: KCORG)

Los sistemas ORC siguen los mismos principios que el ciclo de Rankine de vapor tradicional que se utiliza en la mayoría de las centrales térmicas para producir electricidad, pero utiliza un fluido orgánico en lugar de agua. La posibilidad de seleccionar el mejor fluido de trabajo dependiendo de la fuente de calor disponible y el tamaño de la planta, da como resultado múltiples ventajas: turbomáquinas más eficientes, vacío limitado en el condensador y mayor rendimiento (eficiencia entre un 2 % y un 18 % en función de la fuente de calor residual y el fluido de trabajo utilizado)

en comparación con los ciclos Rankine de vapor y ciclos de gas, especialmente para fuentes de calor inferiores a 400 °C y potencia de salida inferior a 20 MW.

Aplicación	T _{cond} [°C]	T _{evap} [°C]	Fluidos recomendados	Aplicación	T _{cond} [°C]	T _{evap} [°C]	Fluidos recomendados
RCR	30-50	120	R113	CHP	50	170	Ethanol
RCR	30	150-200	Benzene, Toluene, RC123	MCI- RCR	76	n/a	R134a
MCI	55	60-150	H2O, R245ca, Isobutane	MCI- RCR	95	n/a	R134a
CHP	90	250-350	Butyl-benzene	GEO	30	150	R1234yf, R1225yeE
GEO	30	100	RE133, R245, R600, R245fa, R245ca, R601	RCR	20-35	150	n/a
GEO	25	80-115	Propylene, R227ea, R245fa	MCI RCR	35	96-221	Benzene
RCR	25	100-210	R113	RCR	n/a	120	R600a/R601
Solar	35	60-100	R152a, R600, R290	RCR	27-87	327	R11, R141b, R113, RC123, R245fa, R245ca
Solar	45	120-230	n-dodecane	RCR	n/a	277	RC123
RCR	25	145	R236A	Solar	30	150	R245fa, R134a
RCR	50	80-220	R113, RC123				

Leyenda: RCR: recuperación de calor residual / MCI: Motores de combustión interna /CHP: Cogeneración / GEO: geotermia

Figura 12. Fluidos de trabajo recomendados para sistemas ORC
(Fuente: IV Seminario Internacional de sistemas ORC, 13/09/2017 Milán)

3.5.2. Aplicaciones: industria y mercados

La aplicación de sistemas ORC ha ido aumentando a un ritmo sostenido desde los primeros años del nuevo milenio y actualmente alcanzan una capacidad total instalada que ronda los 3.000 MWe, poniéndose en servicio aproximadamente 100 unidades cada año en todo el mundo.

La generación de electricidad a partir de instalaciones geotérmicas de alta temperatura, son el actualmente principal campo de aplicación con aproximadamente el 75 % de toda la capacidad instalada de ORC en el mundo. Sin embargo, el número de plantas es relativamente bajo, ya que requieren grandes inversiones y sistemas de varios megavatios de potencia (>15 MW). Las fuentes de calor geotérmico suelen estar disponibles a bajas y medias temperaturas (100-200 °C).

La recuperación de calor residual es un campo relativamente emergente para los sistemas ORC con un potencial muy interesante para todos los tamaños de unidad. Todos los grandes actores están activos en el mercado con plantas de tamaño medio-grande que recuperan calor en turbinas de gas, motores de combustión interna y procesos industriales. En la actualidad, la mayoría de los fabricantes se centran en pequeñas aplicaciones de recuperación de calor residual con sistemas que oscilan entre los 2 y 150 kWe [19]. Las aplicaciones de recuperación de calor residual cubren en torno al 11 % del mercado total con un número relevante de plantas en funcionamiento, de la cuales, una gran cantidad de unidades son de baja potencia (<5 kW). Un porcentaje elevado de procesos de fabricación industrial, emiten a la atmósfera cantidades significativas de energía térmica de baja y media temperatura (60 - 350 °C). Las aplicaciones más relevantes son:

- Acoplamiento de motores de combustión interna (MCI) y ORC: los motores de combustión interna (MCI) se caracterizan por eficiencias cercanas al 50 % en el caso de instalaciones muy grandes, esta eficiencia está asociada a la cantidad de calor residual involucrado en las operaciones del motor. La recuperación de la energía térmica tanto de los gases de escape como del circuito de refrigeración para producir un trabajo mecánico útil es de creciente interés. Entre otras tecnologías como termoelectricidad y producción de frío a través ciclo de absorción, los ORC parecen ser la solución más destacada para tales aplicaciones, donde el acoplamiento de un ORC a un MCI para la recuperación de calor podría mejorar la potencia neta global y, por tanto, la eficiencia del ciclo.
- Aplicaciones para sistemas de biomasa: representan una participación total de aproximadamente un 11 % y con un número considerable de plantas, la mayoría de ellas sistemas de cogeneración de entre 1 y 18 MW. En las plantas de cogeneración de biomasa, el sistema ORC produce electricidad y agua caliente a partir de la energía térmica de los gases de escape procedentes de la combustión de biomasa. El agua caliente se utiliza para satisfacer la demanda de calor local de, por ejemplo, procesos de secado de madera o calefacción urbana.
- Aplicaciones solares: cabe indicar que su presencia en el mercado es testimonial debido principalmente al alto coste de inversión en el campo solar que hace que el ORC acoplado a los colectores solares sea más caro que los paneles fotovoltaicos y los sistemas de almacenamiento eléctrico en baterías. A pesar de ello, tanto los paneles solares planos como los de tubo de vacío se pueden acoplar a un sistema ORC, según las aplicaciones y el lugar de la instalación: mientras que los colectores planos requieren una menor inversión de capital, los colectores concentradores y de tubos de vacío garantizan una mayor cantidad total de energía producida y eficiencia en toda la vida útil del panel, especialmente si está equipado con sistemas de seguimiento solar. Los sistemas solares se caracterizan por alcanzar temperaturas inferiores a los 300 °C, por lo que, desde un punto de vista de la eficiencia energética, ofrecen una gran oportunidad para el acoplamiento de un ORC.

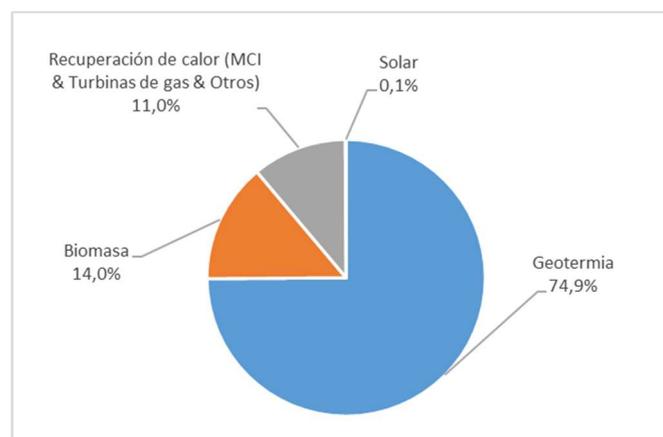


Figura 13. Presencia de sistemas ORC según la aplicación industrial
(Fuente: adaptado del IV Seminario Internacional de sistemas ORC, 13/09/2017 Milán)

Por otro lado, el número de fabricantes está aumentando y las grandes empresas de equipos eléctricos convencionales están introduciéndose en el mercado de la mano de nuevas empresas

especializadas en la tecnología. La mayor parte de empresas fabricante de ORC son grandes compañías internacionales, aproximadamente treinta en todo el mundo, de las cuales solo dos (RANK⁷ y ENERBASQUE¹³) son nacionales con un impacto relevante a nivel internacional.

El mercado de la recuperación de calor se encuentra todavía en una etapa temprana, pero superando ya la fase de demostración/prototipo. La principal aplicación es en gran parte la recuperación de calor de turbinas y motores diésel o de gas, con aproximadamente el 65 % de la capacidad instalada total. Utilizar los humos de escape de los motores de combustión o de las turbinas, es más fácil que la recuperación de calor industrial y ha sido el sistema más utilizado durante mucho tiempo, pero los motores son cada vez más eficientes y esta aplicación no se considera renovable en muchos países que desarrollan hojas de ruta de transición energética [19].

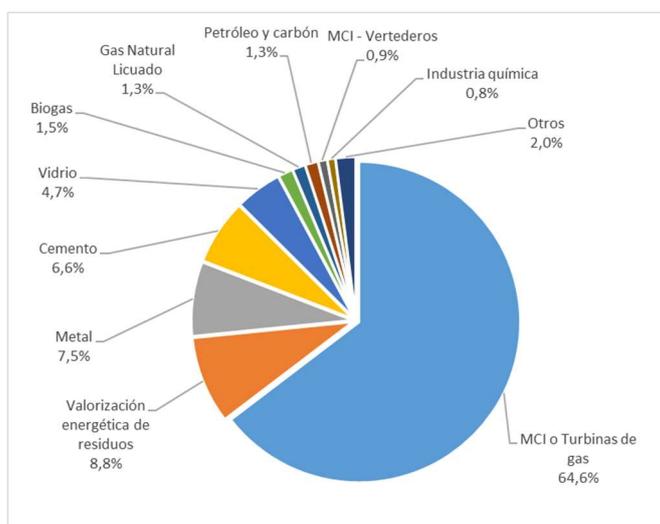


Figura 14. Nivel de presencia de sistemas ORC en la industria
(Fuente: IV Seminario Internacional de sistemas ORC, 13/09/2017 Milán)

3.5.3. Impactos asociados

Dentro del panorama nacional, el número exacto de sistemas ORC en funcionamiento actualmente es una incógnita ya que no existe un registro oficial que cuantifique las unidades instaladas y sus tipologías. Por contra, se encuentra disponible un inventario de las instalaciones de cogeneración, residuos, biomasa y biogás de producción de energía eléctrica instaladas hoy en día, y aunque no todas ellas llevan incorporado un sistema ORC, nos permite evaluar de manera somera el potencial de implantación de esta tecnología a pequeña, mediana y gran escala (6 kW - 200 MW) en España [20].

¹³ ENERBASQUE: <http://enerbasque.com/>

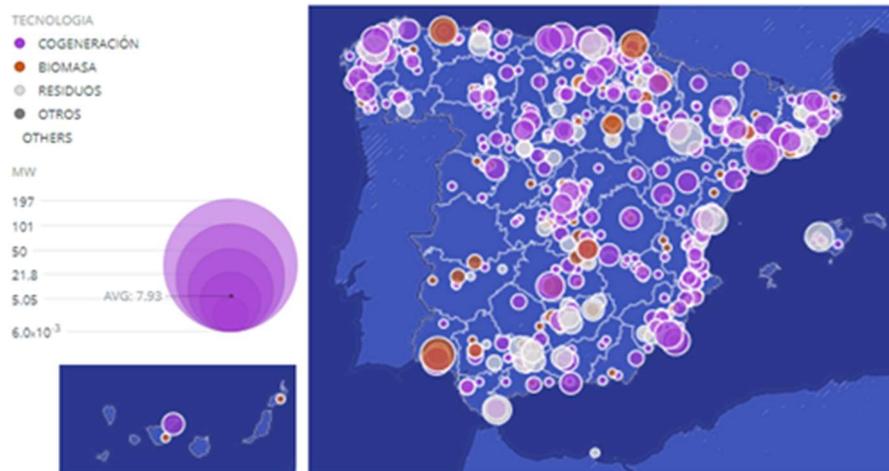


Figura 15. Nivel de presencia de sistemas ORC en la industria Instalaciones de cogeneración de residuos biotérmicas (Fuente: Red Eléctrica de España)

El aumento de los precios de la electricidad y del CO₂ dentro del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS), han extendido la necesidad de recuperar calor también en procesos industriales de pequeño tamaño, en donde los sistemas ORC de entre 3-10 kW de capacidad están ganando cuota de mercado, si bien es cierto que, actualmente los periodos de amortización son largos debidos a los altos costes de inversión. Se espera que, en un corto/medio plazo, el coste de la tecnología ORC de baja potencia permita su expansión en el mercado gracias a la economía de escala.

3.5.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presentan los ciclos ORC y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 8. Análisis DAFO de la recuperación de frío de los ciclos ORC

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tecnología probada y madura con muchas referencias 2. Disponible a pequeña escala a partir de pocos kW 3. Amplio rango de funcionamiento (10 % - 100 % de carga eléctrica) 4. Elevada eficiencia del ciclo 5. Sistemas poco ruidosos, compactos y con bajo mantenimiento diario 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Altos costes de inversión 2. Eficiencia de generación de energía eléctrica relativamente baja¹⁴ 3. Fluido de trabajo caro 4. Envejecimiento y descomposición térmica del fluido de trabajo y aceite térmico como portador de calor 5. Inflamabilidad del aceite térmico y del fluido de trabajo

¹⁴ Aunque el rendimiento es muy alto, la producción eléctrica es baja por la alta densidad del fluido orgánico, que hace que este sea muy lento y la turbina generadora no pueda girar muy rápido.

<ol style="list-style-type: none"> 6. Menos costes en caso de sistemas de producción o mayores beneficios en caso de sistemas de generación de energía 7. Sistemas modulares simples de baja presión. Funcionamiento totalmente automático, incluidos los procedimientos de arranque y apagado 8. Bajo desgaste mecánico de los componentes del sistema ORC (bajas velocidades de giro de la turbina) 9. Debido a las propiedades del fluido orgánico y al ciclo cerrado, no se produce corrosión, y el sistema no pierde fluido de trabajo salvo rotura 10. Larga vida útil 11. Corto periodo de construcción 	<ol style="list-style-type: none"> 6. La temperatura limitada de los gases de combustión requiere técnicas de control especiales 7. Caída de entalpía relativamente baja en la turbina que debe compensarse con un mayor caudal másico (en comparación con el agua) 8. La turbina requiere un diseño especial 9. Las condiciones de vacío en el condensador y la eliminación de gases sin condensación requieren una bomba de vacío 10. La potencia eléctrica depende de la potencia calorífica 11. Los parámetros operativos son sensibles a la calidad del combustible 12. Número relativamente pequeño de desarrolladores de tecnología 13. Salida de potencia nominal limitada, los sistemas más grandes requieren un diseño modular. Cada planta de producción de energía tiene unas características distintas por lo que es posible que el diseño del ORC deba de hacerse ad hoc
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Disponibilidad limitada de tecnología competitiva dentro de un rango de potencia reducido. 2. Disponibilidad de incentivos. 3. Promoción de la cogeneración. 4. Necesidad de modernizaciones y reemplazos en los sectores de la energía eléctrica y térmica. 5. Desarrollo regional intensificado. 6. Acciones dirigidas a la seguridad local del suministro eléctrico. 7. Aumento de los precios del CO₂ dentro del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS). 8. Investigación en curso sobre nuevos fluidos de trabajo. 9. Incremento de los precios de la electricidad en algunos mercados. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incentivos financieros necesarios para la rentabilidad del proyecto 2. Los resultados financieros dependen del tamaño del equipo 3. Periodo de amortización relativamente largo 4. Mayor riesgo debido a cambios relativamente frecuentes de políticas y condiciones del mercado, incluidos los mecanismos de apoyo. 5. Baja efectividad de los incentivos. 6. Mercados financieros difíciles. 7. La tecnología ya no es innovadora, por lo que existen dificultades para obtener fondos para innovaciones. 8. Restricciones normativas sobre el uso de ciertos fluidos de trabajo óptimos para aplicaciones a pequeña escala.

3.6. Tecnologías termoeléctricas

3.6.1. Descripción de la tecnología

Las tecnologías termoeléctricas son capaces de convertir el calor residual procedente tanto de procesos industriales como de calderas domésticas de calefacción y agua caliente en electricidad. La conversión es reversible, pudiendo transformar la electricidad en energía calorífica, con la funcionalidad de enfriar o calentar. El efecto termoeléctrico, también denominado termoelectricidad, abarca cuatro fenómenos distintos: los efectos Seebeck, Peltier Joule y Thomson, recogidos en la Tabla 9.

Tabla 9. Fenómenos que gobiernan la termoelectricidad

<p>Efecto Seebeck</p> <p>Establece que se genera una diferencia de potencial entre los extremos libres proporcional a la diferencia de temperaturas alcanzada al calentar la unión de dos metales o aleaciones de diferente composición. Gracias a este diferencial, se genera energía eléctrica.</p>
<p>Efecto Peltier</p> <p>Consiste en la generación o absorción de calor en la unión de dos materiales distintos al someterla a una corriente eléctrica. El efecto es reversible.</p>
<p>Efecto Joule</p> <p>Consiste en la emisión de calor a lo largo de un conductor por el que circula una corriente eléctrica. Este calor se debe a la energía generada en los choques de los electrones con los átomos de conducto. Actúa en oposición al efecto Peltier y provoca una reducción total de la de la refrigeración disponible. No es un efecto reversible.</p>
<p>Efecto Thomson</p> <p>Consiste en la generación o absorción de calor cuando circula una corriente eléctrica por un material conductor en el que existe un gradiente de temperatura. Este fenómeno depende de la dirección de la corriente eléctrica y la magnitud del gradiente de temperatura. Es un efecto reversible.</p>

Los materiales capaces de experimentar la termoelectricidad se caracterizan por presentar baja conductividad térmica y elevada conductividad eléctrica. Las tecnologías termoeléctricas son tecnologías emergentes, siendo los materiales semiconductores, cuyas propiedades se encuentran entre los valores de los metales y los aislantes, los más investigados para las aplicaciones termoeléctricas. De acuerdo con el rango de temperaturas de trabajo, se distinguen tres grupos de materiales:

- Baja temperatura: pueden trabajar en torno a los 175 °C y son aleaciones de bismuto con antimonio, telurio y selenio.
- Media temperatura: pueden trabajar en torno a los 575 °C y son aleaciones de plomo.
- Alta temperatura: pueden trabajar en torno a los 1.025 °C y son aleaciones de silicio y germanio [21].

3.6.2. Tipos de dispositivos termoeléctricos

Los dispositivos termoeléctricos más relevantes son los módulos Peltier y los generadores termoeléctricos.

- Módulos Peltier: son los más utilizados debido a su menor coste y mayor número de aplicaciones. Están compuestos por numerosos termopares formados por un semiconductor tipo N y otro tipo P situados eléctricamente en serie con un conductor de cobre, y térmicamente en paralelo con dos placas cerámicas con elevada conductividad térmica y muy baja conductividad eléctrica. Estos dispositivos actúan como generadores de electricidad (efecto Seebeck) y como refrigeradores (efecto Peltier). Se diferencian en su geometría. La eficiencia depende de la disposición geométrica de los elementos que la componen. Varía entre el 20 - 25 % [22].

Las ventajas son fuentes de potencia flexible, capaces de recuperar energía poco mantenimiento y tienen una vida útil muy larga. Al no contener fluidos térmicos, constan de un diseño simple, compacto, seguro, pequeño y muy ligero.

Los principales inconvenientes son la baja eficiencia de conversión y la necesidad de mantener una diferencia de temperatura constante para evitar grandes fluctuaciones de potencia eléctrica.

Algunas de sus aplicaciones son los enfriadores de microprocesadores, calefacción y refrigeración cámaras para pruebas climáticas de componentes electrónicos, los enfriadores de agua para la industria de los semiconductores, los sistemas de refrigeración para láser industriales y médicos y las fuentes de alimentación para equipos médicos, refrigeradores portátiles, etc.

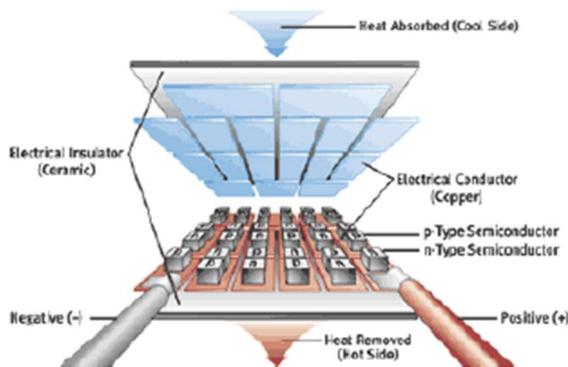


Figura 16. Módulo Peltier
(Fuente: Thermoelectrics handbook)

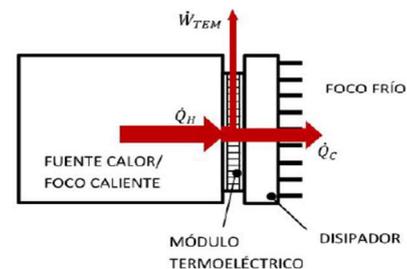


Figura 17. Generador termoeléctrico
(Fuente: ETS Ingenieros Industriales de la UPM)

- Generadores termoeléctricos: están formados por uno o varios módulos termoeléctricos conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. De este modo, parte del calor que llega a la cara caliente de los módulos es transformado en energía eléctrica (efecto Seebeck), mientras que el resto del calor es disipado al foco frío a través de un intercambiador de calor.

Las ventajas de estos dispositivos son la fiabilidad y durabilidad. Sus principales inconvenientes son que los materiales termoeléctricos existentes tienen una figura de

mérito alrededor de 1; por lo tanto, el rendimiento que pueden ofrecer es reducido. Es alrededor del 7-14 % [23].

Algunas de las aplicaciones son las sondas espaciales, para recuperar una parte del calor producido por el motor y que pueda ser empleada por el vehículo.

3.6.3. Aplicaciones: industria y mercados

Las tecnologías termoeléctricas tienen un potencial limitado para la recuperación de calor industrial debido a la baja eficiencia de las celdas Peltier. Funcionando a óptimas condiciones, la celda Peltier puede generar 8 W de potencia. En este aspecto, falta desarrollar los diferentes materiales termoeléctricos para poder emplearlos en la recuperación de calor industrial y que sea eficaz.

No obstante, en la actualidad se están desarrollando dispositivos que utilizan el calor residual para la digitalización de la industria 4.0. Por ejemplo, AEInnova tiene como producto INDUEYE [24] que se autoalimenta por calor residual (es decir, sin baterías) y permite la monitorización y la sensorización de equipos en grandes instalaciones industriales donde utilicen un uso intensivo de la energía.

3.6.4. Impactos asociados

La digitalización inalámbrica de la industria 4.0 permite la supresión del cableado y de las baterías con la mejora medioambiental que ello supone. Las baterías están formadas principalmente de litio [25] y cobalto [26], dos recursos escasos que pueden ocasionar problemas de contaminación del agua y los organismos acuáticos, introducción de caminos de exploración en ecosistemas sensibles, impactos en el paisaje, en la fauna y la flora y la generación de residuos sólidos y químicos. Además, estos materiales generalmente provienen de minas de explotación de países menos desarrollados, donde las condiciones de trabajo son precarias y los impactos medioambientales no están regulados, siendo habitual el vertido de sustancias ácidas y tóxicas a los ríos y campos locales. Así mismo, el proceso de fabricación supone un gran consumo de agua calor y electricidad.

3.6.5. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presentan las tecnologías termoeléctricas y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 10. Análisis DAFO de la recuperación de frío de las tecnologías termoeléctricas

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Coste bajo 2. Tecnología duradera, fiable y robusta 3. No requiere mantenimiento 4. Fácil escalabilidad 5. Pueden operar en cualquier orientación y diferentes condiciones gravitacionales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja eficiencia de los materiales 2. Valores de figura de mérito < 1 3. Necesidad de mantener una diferencia de temperatura constante para evitar grandes fluctuaciones de potencia eléctrica

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
1. Apto para diferentes sectores 2. Nuevos mercados 3. Estudios de nuevos materiales termoeléctrica para la mejora de la figura de mérito	1. No aceptación de una nueva tecnología por parte de la industria. 2. Otras tecnologías puedan conseguir mayor eficiencia a menor coste 3. No optar a mecanismo de apoyo e investigación

3.7. Sistemas de almacenamiento de energía térmica

3.7.1. Descripción de la tecnología

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (AET) recuperan y almacenan el calor residual o en exceso, y luego lo liberan en función de la demanda de energía. Estos sistemas son especialmente interesantes para su aplicación en modelos desacoplados de generación y demanda (i.e. provenientes de fuentes renovables), procesos de fabricación discontinuos, por lotes o estacionales, y la regulación térmica, etc. El AET es considerado una herramienta de flexibilización, que puede ser combinada con su conversión a electricidad, y viceversa.

La energía térmica (calor y frío) puede almacenarse por medio de calor sensible, calor latente asociado con el cambio de fase (PCM, del inglés, phase change material) o energía termoquímica. A continuación, se presenta un resumen de la revisión bibliográfica [27] [28] [29] [30].

- Almacenamiento por calor sensible: es la tecnología más desarrollada y económica, a pesar de que presenta la menor capacidad de almacenamiento y el sistema de mayor tamaño. El medio de almacenamiento de calor sensible puede ser líquidos, como agua o aceite térmico, o sólidos, como rocas, ladrillos, sales, metales, hormigón, tierra, etc.
- Almacenamiento por calor latente: se trata de un almacenamiento pasivo que se basa en el calor latente de fusión de los materiales, que es la energía que necesita un material para pasar de fase sólida a fase líquida. Es una alternativa prometedora que puede reducir el tamaño de los sistemas convencionales y aumentar la capacidad de almacenamiento (materiales con elevada densidad energética (180-260 kJ/kg)). La combinación con intercambiadores de calor resulta una forma atractiva de almacenar una gran cantidad de calor generado durante el funcionamiento discontinuo. Estos sistemas están disponibles comercialmente en aplicaciones como la integración con elementos constructivos o tanques de agua caliente. Sus principales barreras técnicas son la baja conductividad térmica, la estabilidad del material a lo largo de los ciclos, la segregación de fases y el subenfriamiento.
- Almacenamiento termoquímico: la energía se almacena después de una reacción química (endotérmicas/exotérmicas) reversible, que implica una gran cantidad de calor (entalpía de reacción en torno a 1000 kJ/kg). Alberga gran potencial, dado que la densidad de almacenamiento es aproximadamente de 8 a 10 veces mayor que los sistemas de calor sensible y 2 veces mayor que el calor latente. Ejemplos de estos materiales son los hidruros metálicos, el amoníaco, los carbonatos de calcio y sodio, el mineral de aluminio,

la alúmina, la zeolita y el gel sílice. Permite almacenar energía térmica por una larga duración con bajas pérdidas de calor, apropiada para el almacenamiento estacional. Sin embargo, están restringidos por su novedad y su madurez tecnológica es aún limitada, ya que no han sido ampliamente investigados, y se ven obstaculizados por involucrar reactores complicados, cierta inestabilidad y una débil reversibilidad a largo plazo.

Las principales características de los distintos sistemas AET se resumen en la Tabla 11. El sistema más apropiado debe elegirse en función de la idoneidad de su funcionamiento, su grado de madurez tecnológica, los requisitos técnicos de la aplicación y la viabilidad económica.

Tabla 11. Resumen de las propiedades y características del almacenamiento térmico [28] [31]

PROPIEDAD	Unidad	Sensible	Termoquímico	Latente (PCMs)
Datos energéticos				
Eficiencia	%	50 - 90	75 - 100	75 - 90
Capacidad	kWh/m ³	15 - 200	100 - 540	80 - 110
	kWh/t	10 - 50	120 - 250	50 - 150
Datos económicos				
Coste inversión específico	€/m ³	1,5 - 2.600	800 - 50.000	800 - 7.700
	€/kWh	0,1 - 13	8 - 100	10 - 70
Coste operación y mantenimiento	€/kW·año	107	18-53	223
Datos técnicos				
Tamaño y potencia	MW	0,001 - 10	0,01 - 1	0,01 - 1
	m ³	< 60.000	8 -20	0,1 - 91
Disponibilidad comercial	-	Disponible	Algunos materiales	I+D y prototipos

3.7.2. Aplicaciones: industria y mercados

De acuerdo con la Figura 18, el almacenamiento de calor latente con PCMs representa una alternativa que cumple con el compromiso de ser una estrategia aún innovadora pero prometedora a medio plazo.

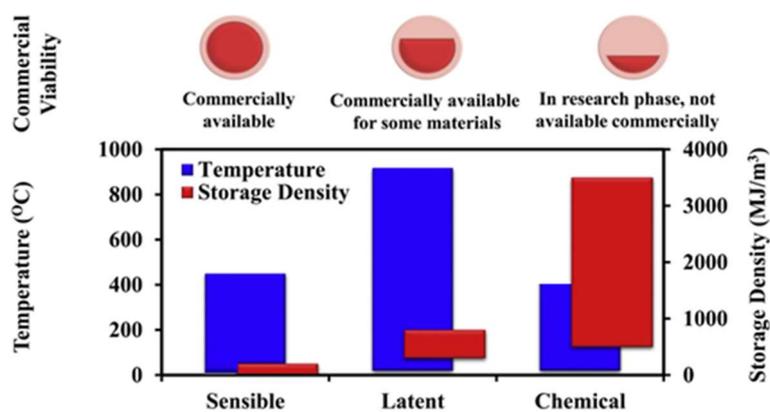


Figura 18. Comparación del funcionamiento y la viabilidad de tecnologías de almacenamiento térmico [33]

En la actualidad, la aplicación de almacenamiento de calor latente con PCMs en condiciones operacionales reales es una prioridad ineludible para lograr un uso a gran escala y su futura comercialización. La aplicación de AET integrando PCMs es escasa especialmente para altos niveles de temperatura., donde se ponen de relieve los problemas de estabilidad térmica, compatibilidad y corrosión [32]. Para resolver sus limitaciones, los estudios se centran en el encapsulamiento y la caracterización de los materiales. A nivel económico, el coste de un sistema PCM oscila entre 0,1 y 10 euros/kWh en caso de temperaturas bajas y medias, y entre 20 y 70 euros/kWh para altas temperaturas.

Los rangos de operación de PCM más altos en procesos industriales se integran en procesos de fusión, fundición, tratamiento térmico, refinado, incineración, etc. En general, los usos más comunes son el precalentamiento del aire de combustión, el precalentamiento de la carga antes de entrar en el horno y el suministro de energía a otros procesos anteriores y posteriores [34]. Las aplicaciones típicas de la gama media son algunos procesos de calor residual industrial como el secado, la cocción al vapor, la cocción, la esterilización, el hervido, etc. Por último, ejemplos de fuentes de calor típicas a elevadas temperaturas son los hornos de fusión y calefacción, calderas, incineradores, tratamientos térmicos y distribuciones de vapor. Como resumen, la Tabla 12 [35] recoge los sistemas de almacenamiento térmico integrados para la recuperación y reutilización de calor residual industrial, y los clasifica según su categoría de prototipo (laboratorio o industrial).

Tabla 12. Resumen de los sistemas AET propuestos en el sector manufacturero para la recuperación y reutilización in situ de calor residual industrial (Fuente: [35])

Manufacturing sector	Country	Scale of the study ^a	IWH source		TES system			Heat demand		Savings
			Source	Yearly potential (MWh)	Exhaust temperature (°C)	TES material	Storage capacity (MWh)	Heat sink	Temperature (°C)	
Basic metals	Sweden	N	Foundry	10 · 10 ³	n.a.	Water	3800	Space heating	40-60	1500 tCO ₂ /y
	n.a.	N	Foundry	n.a.	300	Dual-TES media	10	On-site processes and space heating	<100	n.a.
	n.a.	N, L	Foundry	n.a.	n.a.	Aluminium shots	n.a.	Furnace input scrap material	n.a.	On-site reuse of 6.4% of the IWH
	USA	N	Steelworks	n.a.	315-1500	Packed bed with refractory brick, slag or scrap steel	n.a.	Steam for power generation	n.a.	2.27 kW/t of product
	n.a.	N	Steelworks	n.a.	n.a.	Endothermic reactions	n.a.	Steam and hot water	n.a.	n.a.
	Japan	N, L	Steelworks	n.a.	>1200	Copper	n.a.	Endothermic reaction	n.a.	n.a.
	n.a.	N	Steelworks	n.a.	<1427	Sodium acetate trihydration salt	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Non-metallic minerals	Germany	P	Steelworks	370 · 10 ⁻³ per ton of liquid steel	430	Molten salts	90 kW h/m ³	On-site processes and steam for power generation	n.a.	60-80 kW h/t of energy consumption and 45 kgCO ₂ /t of product
	UK	N	Steelworks	138 · 10 ³	600-1500	Steam	n.a.	On-site processes and DH	n.a.	22,483 tCO ₂ /y
	n.a.	N	Metal casting	220 · 10 ⁶	1200-1600	Molten slag	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	USA	N	Cement production plant	23.6 · 10 ¹²	177-816	Rock beds and draw salts	n.a.	Steam for power generation	n.a.	6.8 · 10 ⁶ MWh of energy consumption
Chemicals and chemical products	Spain	N, L	Concrete production plant	n.a.	n.a.	Eutectic mixture of KNO ₃ and NaNO ₃ with graphite	n.a.	Steam generation	120-250	n.a.
	n.a.	N	Concrete production plant	n.a.	n.a.	Reinforced concrete slabs and paraffin	1.25	On-site processes	n.a.	45% in energy consumption and 15000 t CO ₂ /y
	Netherlands	N	Organic surfactants plant	n.a.	110-160	(1) Metal encapsulated PCM (2)-(3) Concrete	(1) 1.28 (2) 0.17 (3) 0.40	Preheat on-site processes	n.a.	Steam supply (1) 56%, (2) 50% and (3) 70%
Pulp and paper products	n.a.	N	Yeast and ethyl-alcohol plant	n.a.	25-40	Water	n.a.	On-site heating and cooling	n.a.	Heating and cooling demand of 2-3%
	USA	N	Paper and pulp processing facility	n.a.	n.a.	Water	n.a.	Steam	n.a.	Fuel consumption 1.2 · 10 ⁹ /y
Food products and beverages	USA	N	Food factory	n.a.	65	Water	n.a.	Water preheating	n.a.	Energy consumption 5-6%
	Italy	N	Chocolate industry	n.a.	n.a.	Water	n.a.	Hot water network	n.a.	n.a.

n.a.: not available.

^a N: numerical scale, L: laboratory scale, P: pilot plant scale.

Bajo una perspectiva ambiental, económica y energética, los impactos esperados para una industria que adopte este tipo de solución resultaría en un ahorro de 850 MWh/año de gas natural y, por consiguiente, 200 toneladas de CO₂eq reducidas y 58 k€ ahorrados anuales [27].

3.7.3. Impactos asociados

En el artículo López-Sabirón et al. [36], se evalúa la introducción de un sistema AET que utiliza diferentes PCMs con puntos de fusión en torno a 315-400 °C, y una capacidad de almacenamiento entre 170-341 kJ/kg, para recuperar la energía térmica residual liberada en los procesos industriales. Considera la posibilidad de utilizar cinco combustibles fósiles diferentes para generar los 20 casos que se analizaron utilizando la misma metodología (ACV) y el mismo método de evaluación (Potencial de Calentamiento Global, GWP100). Como resultado, la combinación LiOH/KOH alcanzó el mayor potencial de recuperación de energía térmica con 164GJ. Por consiguiente, también alcanzó el mayor potencial de reducción de impacto ambiental (8 y 18 toneladas de CO₂eq), evitando la combustión de gas natural y lignito, respectivamente. Las sales puras, como el NaOH, exhibieron menor capacidad para almacenar energía térmica, pero aún relevante (82 GJ), mientras que los impactos asociados a la fabricación de KNO₃ fueron de 7 a 13 veces mayores que los de los otros PCM. Adicionalmente, en otro estudio considerando los mismos PCMs [37], el sistema de LiOH/KOH exhibió los tiempos más bajos para conseguir que el ahorro de energía equilibre el impacto ambiental de la implementación para cada sistema industrial de AET estudiado.

3.7.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presenta la tecnología de almacenamiento térmico por PCMs y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 13. Análisis DAFO de los sistemas AET con PCMs

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistema pasivo sin necesidad de equipos adicionales que consuman energía (bombas, redes eléctricas, etc.). 2. Optimización de procesos a nivel del sistema completo ya que relaciona aguas arriba y abajo. 3. Alta flexibilidad para incorporar un sistema de PCM como reacondicionamiento de hornos u otros sistemas. 4. Sistema de regulación y amortiguación térmica actuando como fuente a temperatura constante. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Barreras tecnológicas en el desarrollo de PCM a altas temperaturas en escala industrial (muy pocos estudios de PCM > 400 °C). 2. Dificultad en la limpieza del sistema para evitar corrosión e ineficiencias. 3. Altos costes de mantenimiento si provoca bloqueos por suciedad en el sistema. 4. Viabilidad económica dependiente de la eficiencia térmica y adecuación al tipo de proceso donde se incorpore. 5. Requisitos técnicos que pueden impedir un funcionamiento óptimo.

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Recuperación de calor residual disponible en grandes cantidades en las industrias intensivas. 2. Adaptabilidad a diferentes sectores y aplicaciones customizando la capacidad a la demanda. 3. Replicabilidad en otros tipos de proceso y sectores. 4. Mercado nuevo, solución innovadora y única (sin comercializar, pero de creciente interés). 5. Estrategias globales y europeas alineadas con los objetivos del sistema PCM. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reluctancia ante el uso de nuevos sistemas que deben demostrar un alto rendimiento. 2. Complejidad del sistema por ser desconocido.

3.8. Conversión de la energía a gases renovables

3.8.1. Descripción de la tecnología

Se conoce como tecnología “power to gas” a la conversión de energía eléctrica excedentaria, que se genera en periodos con baja demanda, en H₂ mediante electrólisis del agua (disociación de la molécula de agua mediante la aplicación de una corriente eléctrica para generar H₂ y O₂). La tecnología “power to gas” no utiliza directamente el calor residual, sino que dependería de la implementación de alguna de las tecnologías descritas anteriormente para generar electricidad a partir del calor residual, y posteriormente usar esta electricidad para producir H₂. Por lo tanto, sería especialmente apropiada para sistemas con elevada generación de calor residual y baja demanda térmica y eléctrica.

El proceso “power to gas” se lleva a cabo en equipos electrolizadores con celdas electrolíticas ensambladas. La Figura 19 presenta un esquema de una celda clásica para electrólisis del agua.

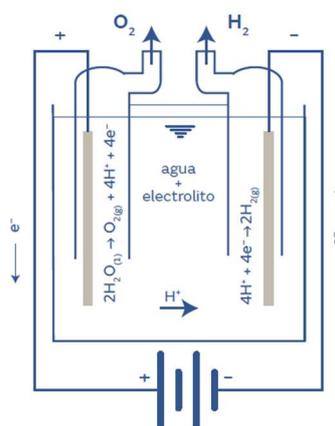


Figura 19. Celda clásica para electrólisis del agua
(Fuente: Feliu y Flotats [38])

En el ánodo (+) se produce O_2 que puede ser recuperado, protones (H^+) y electrones (e^-), mientras que en el cátodo los protones y electrones dan lugar a H_2 como producto del proceso. El transporte de electrones se realiza por circuito eléctrico externo gracias a una diferencia de potencial, mientras que los protones se transportan a través del medio por difusión [38].

La eficiencia del sistema depende de la conductividad del agua (por lo que se añaden electrolitos como hidróxidos de sodio o potasio), la superficie de los electrodos (que deben ser inertes), la formación de burbujas alrededor de los electrodos (dificultan el intercambio de iones), la diferencia de potencial aplicada (debe superar las resistencias eléctricas y la energía de activación de la reacción), de la temperatura de operación, etc [38].

El escalado industrial de una celda clásica para electrólisis ha derivado en tres diseños básicos que se encuentran actualmente disponibles a nivel comercial o en desarrollo: celdas electrolíticas alcalinas, celdas de intercambio de protones (PEM, del inglés, Proton Exchange Membrane) y celdas de óxido sólido (SOE, del inglés, Solid Oxide Electrolysis). La Figura 20 presenta una comparativa de estos diseños [38].

3.8.2. Aplicaciones: industria y mercados

Las principales aplicaciones del hidrógeno producido son [38]:

- Uso directo del H_2 como combustible o como materia prima (producción de hierro y acero, amoníaco, metanol y refino de petróleo –desulfuración, hidrotratamiento, hidrocrackeo)
- Inyección del H_2 en la red de gas natural, cumpliendo con las restricciones necesarias (concentraciones del 5 % vol. en España)
- Transformación del H_2 en CH_4 (reacción de metanación) para ser inyectado en la red de gas natural sin restricciones (ventajas de transporte, almacenamiento, distribución y uso)

Los sectores más relevantes para el consumo de gases renovables, bien sea hidrógeno o gas natural, son [38]:

- Transporte (43 % del consumo total de energía final en España [39]): vehículos de gas natural licuado (GNL) o comprimido (GNC), así como vehículos de hidrógeno propulsados con un motor eléctrico conectado a una pila de combustible
- Residencial, comercial y servicios (30 % del consumo total de energía final en España [39]): gas natural para calefacción
- Industria (24 % del consumo total de energía final en España [39]): los gases renovables suponen una solución flexible disponible a baja, media y alta temperatura. Gran potencial en procesos a media y alta temperatura ($> 150\text{ °C}$) como fuente de energía renovable, donde otras tecnologías presentan limitaciones. Cinco sectores acumulan el 77 % de esta energía: minerales no metálicos (incluyendo cemento, vidrio, etc.); químico y petroquímico; hierro y acero; alimentación, bebidas y tabaco; pasta y papel; metalurgia no férrea (incluyendo aluminio, etc).

Naturgy estima el potencial máximo y disponible de producción mediante “power to gas” en España en 45-53,7 TWh/a y 13,5-23,1 TWh/a, respectivamente [38]. La diferencia depende de:

- Precios futuros de la energía eléctrica renovable
- Periodos de producción de energía eléctrica excedentaria
- En caso de transformar el H₂ a CH₄, depende también de la disponibilidad de CO₂

	Electrólisis alcalina	Intercambio de protones (PEM)	Óxido sólido (SOE)
Madurez tecnológica	Nivel comercial	Nivel comercial	En desarrollo
Temperatura (°C)	60-80	50-80	900-1000
Presión (bar)	<30	<30	<30
Densidad de corriente (A/cm ²)	0,2-0,4	0,6-2,0	0,3-1,0
Voltaje de celda (V)	1,8-2,4	1,8-2,2	0,95-1,3
Potencia (W/cm ²)	<1,0	<4,4	-
Área de celda (m ²)	>4	<0,03	-
Eficiencia eléctrica (%)	62-82	67-82	81-86
Consumo energético específico (kWh/Nm ³ H ₂)	4,5-7,0	4,5-7,5	2,5-3,5
Producción del equipo (Nm ³ /h)	<760	<30	-
Vida media celda (h)	<90.000	<20.000	<40.000
Vida media equipos (años)	20-30	10-20	-
Pureza H ₂ (%)	>99,8	99,999	-
Tiempo de puesta en marcha (min)	15	<15	>60

Datos de Dincer y Acar (2015)³⁶ y Chisholm y Cronin (2016)³⁷.

Figura 20. Especificaciones típicas de celdas electrolíticas para aplicaciones industriales (Fuente: Feliu y Flotats [38])

3.8.3. Impactos asociados

Los impactos asociados a la tecnología “power to gas” dependen de dos factores principales [38]:

- Origen de la electricidad. En el caso de la electricidad generada a partir de calor residual, que se clasifica como fuente renovable, el hidrógeno producido por electrolisis se considera un gas renovable y, por lo tanto, contribuye al ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Eficiencia energética de la transformación de electricidad a gas. La tecnología “power to H₂” presenta eficiencias del 50-75 %, mientras que el “power to CH₄” presenta eficiencias del 40-65 %.

Naturgy estima un ahorro relativo del 25-89 % en emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de energía sustraída mediante “power to gas” con respecto al gas natural.

Tabla 14. Impactos asociados al “power to gas” [38]

Emisiones (gCO ₂ /kWh)	Ahorro respecto gas natural, uso vehicular (%)	Ahorro respecto gas natural, producción de calor (%)	Ahorro (Mt CO ₂ / bcm ¹⁵)
28-195	42-92	25-89	0,8-2,7

3.8.4. Análisis DAFO

A continuación, se resumen las características (debilidades y fortalezas) específicas que presenta la tecnología power to gas y su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades).

Tabla 15. Análisis DAFO de la conversión de la energía a gases renovables

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Producción de H₂ de elevada pureza 2. Múltiples aplicaciones del H₂ producido: almacenamiento químico estacional de energía excedentaria, materia prima para procesos industriales, combustible para transporte, producción de electricidad con posibilidad de autoconsumo o reinyección en la red de distribución eléctrica, producción de biometano con posibilidad de autoconsumo o reinyección en la red de gas natural, producción de calor para uso residencial, etc. 3. Tecnología apropiada para producir calor de media y alta temperatura, donde otras tecnologías tienen limitaciones 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La inyección distribuida de gases renovables podría llegar a superar la capacidad de la red 2. Algunas tecnologías del ámbito de los gases renovables no están suficientemente consolidadas 3. Tecnología indirectamente relacionada con la recuperación de calor residual, dependiente de la transformación previa del mismo en electricidad. Por lo tanto, la eficiencia energética global del proceso de recuperación de calor sería baja y su aplicación quedaría justificada en procesos con elevada producción de calor residual y baja demanda térmica y eléctrica

¹⁵ bcm, del inglés “billion cubic meters”, es una medida de la cantidad de gas natural producido o transportado que equivale a un millardo de metros cúbicos de gas (km³)

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Reducción significativa de emisiones de GEI: elevado potencial para descarbonizar procesos industriales a altas temperaturas (> 500°C), vehículos de transporte de alta capacidad y largas distancias, calefacción de edificios, respaldo a la electricidad eólica y solar 2. Uso combinado de las redes de electricidad y gas, suponiendo un ahorro de entre 3.000-7.000 MEUR/a en 2050 en España: producción de gas renovable durante periodos de excedencia de energía eléctrica renovable, cuyo parque eólico y solar ha de estar sobredimensionado debido al carácter intermitente de su producción 3. Flexibilidad del sistema energético y aprovechamiento de la funcionalidad de la red de gas, cuya capacidad de transporte y almacenamiento es superior a la de los sistemas eléctricos actuales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No se han establecido objetivos concretos de consumo de gases renovables 2. La regulación del sector de los gases renovables está incompleta 3. No son todavía económicamente competitivos frente al gas natural (70-80 €/MWhPCI biometano vs. 22 €/MWhPCI gas natural), aunque podrían serlo si se consideraran sus beneficios socioambientales 4. Déficit de instalaciones de suministro de hidrógeno debido a la complejidad de los procedimientos para obtener los permisos requeridos 5. El conocimiento y la aceptación pública de la cadena de valor de los gases renovables son insuficientes

4. RECURSOS NECESARIOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN: ANÁLISIS PESTEL

El análisis PESTEL es una herramienta que permite identificar los factores externos a nivel macro ambiental que tienen un impacto sobre la implementación de las tecnologías de recuperación de calor residual contempladas en este informe y pueden determinar su evolución. El acrónimo PESTEL se refiere a los factores que se analizan: políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales.

4.1. Recursos políticos

A nivel europeo, directivas como la 2012/27/UE, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética y la Comunicación de la Comisión, COM/2018/773 final, “Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra”, son la base para la implementación paulatina de este tipo de tecnologías. A esto hay que sumar los programas europeos como H2020, Green Deal, Horizonte Europa y la hoja de ruta SPIRE.

A nivel nacional, el PNIEC propone una serie de políticas y medidas agrupadas en cinco dimensiones: descarbonización, eficiencia energética, seguridad energética, mercado interior de la energía e investigación, innovación y competitividad. Entre las medidas específicas para el sector industrial, cabe destacar las relacionadas con el aprovechamiento de la energía residual industrial incluyendo su conversión en otros vectores energéticos [2]:

- La Medida 1.5 promueve la penetración de fuentes de energía renovables en el sector industrial y el autoconsumo mediante líneas de apoyo que contemplen el potencial de mejora de su huella de carbono, el coste o las características de la tecnología.
- La Medida 1.8 promueve el uso de gases renovables para la generación de electricidad y para usos térmicos, mediante la aprobación de planes específicos que fomenten la penetración de biometano, hidrógeno y otros combustibles en cuya fabricación se hayan usado exclusivamente materias primas y energía de origen renovable. Para la realización de estos planes se analizará la situación de los gases renovables en España, teniendo en cuenta los diferentes grados de madurez tecnológica de las distintas opciones, así como la demanda asociada a estos gases y la rentabilidad de su producción en comparación con otras opciones de descarbonización.
- La Medida 2.5 pretende facilitar la penetración de tecnologías de ahorro de energía final con el fin de mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales y reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La Medida 2.6 promueve la eficiencia energética en edificios existentes del sector residencial mediante distintas acciones como, por ejemplo, la instalación de sistemas centralizados de calefacción y refrigeración urbana o de distrito.
- La Medida 2.16 promueve la cogeneración de alta eficiencia de un total de 1.200 MW con una optimización del diseño de las instalaciones existentes para adaptarse a nuevas circunstancias en los procesos, con base en: aprovechamiento del calor útil, autoconsumo eléctrico, flexibilidad en su operación de cara al sistema eléctrico y alta eficiencia. La medida supondría un ahorro de 1.471 ktep de energía primaria acumulada durante el periodo 2021-2030.

Actualmente existen políticas que favorecen la recuperación de calor residual para autoconsumo, así como para su transformación en otros vectores energéticos, como electricidad o gases renovables. No obstante, es fundamental que estas acciones sean decididas, mantenidas en el tiempo y efectivas, es decir, que sean capaces de activar la recuperación de calor residual durante un periodo lo suficientemente largo como para asegurar que el sector industrial desarrolle sus propios mecanismos. Esto se podría conseguir con un plan estratégico de desarrollo de fuentes de energía renovable en el sector industrial con visión de futuro a largo plazo, objetivos a medio plazo e hitos a corto plazo, y con un seguimiento del grado de cumplimiento. Además, sería favorable un posicionamiento conjunto de administraciones, empresas de los sectores involucrados y centros de investigación o tecnológicos.

4.2. Recursos económicos

El aprovechamiento del calor residual industrial de alta y baja temperatura supone una oportunidad de autoconsumo para las industrias con elevada demanda térmica, así como para cubrir las necesidades de calefacción de los sectores residencial y comercial, evitando de este modo el consumo de combustibles fósiles. Además, en previsión de que la fluctuación de los precios de estos combustibles continúe a medio y largo plazo, la integración de las tecnologías de recuperación de calor residual presenta las ventajas de ahorro de combustible y de reducción de costes de operación. Por lo tanto, la oportunidad posee un beneficio tanto económico como medioambiental, pues también favorece el cumplimiento de los objetivos de descarbonización del horizonte 30-50.

Para promover la implementación de estas tecnologías, se podrían diseñar mecanismos de incentivación económica, como ayudas al autoconsumo o ayudas a la inyección en la red de electricidad y gas natural. Así mismo, es importante incentivar el uso de energías renovables por parte del consumidor, puesto que será la demanda la que acabará consolidando la producción de energía limpia. Para ello, es importante promover cuatro ámbitos principales [38]:

- Especificación UNE sobre garantías de origen renovable de la energía
- Mecanismos de soporte económico a la electricidad producida a partir de fuentes renovables, por ejemplo, posibilidad de venta directa para instalaciones de muy baja potencia, tarifas de compra garantizadas en instalaciones de baja potencia, mecanismos de mercado con prima complementaria para instalaciones de media potencia, o ayudas fijadas mediante subasta para instalaciones de alta potencia.
- Fomentar el uso de electricidad y gases renovables en el transporte, por ejemplo, permitiendo a los proveedores de combustibles y carburantes contabilizar el gas renovable en la cuota obligatoria que determina la directiva de energías renovables o la normativa más exigente de cada Estado miembro. Así mismo, fomentar el desarrollo de la infraestructura necesaria para la recarga de combustible renovable (electricidad, gas natural, hidrógeno, etc.). Otras medidas directas que se pueden implantar para apoyar el uso de gases renovables para el transporte consisten en reducciones fiscales o al establecimiento de cuotas mínimas de vehículos de gas o de uso de gas renovable vehicular.
- Fomentar la producción de calor renovable. Por ejemplo, en Alemania, la Ley de energía calorífica renovable establece que en 2020 el 14 % de la energía consumida por los

edificios de cualquier tipo para climatización y agua caliente ha de ser de origen renovable.

No obstante, uno de los impedimentos económicos actuales radica en la incertidumbre de la situación en España tras el impacto de la pandemia por COVID-19.

4.3. Recursos sociales

El aumento de la conciencia ambiental en la sociedad obliga a las empresas a mejorar su imagen pública mediante la aplicación de tecnologías de eficiencia energética. No obstante, la falta de conocimiento y de aceptación pública de ciertas tecnologías, así como la percepción de inseguridad que en algunos casos se les asocia, pueden suponer una barrera para su implementación.

Por otro lado, tanto la posibilidad de crear nuevos puestos de trabajo dedicados al diseño, construcción e implementación de las tecnologías de recuperación de calor residual, así como el posible crecimiento económico y el aumento de la cuota de mercado asociados, pueden impulsar positivamente al usuario final a implantar estas tecnologías a nivel industrial.

Por el contrario, la situación actual debido a la pandemia de COVID-19 se erige como una de las mayores preocupaciones sociales hoy en día, frenando el desarrollo del país y estableciendo un nuevo orden de prioridades.

4.4. Recursos tecnológicos

Los principales factores tecnológicos que pueden afectar a la integración de las tecnologías de recuperación de calor residual en el sector industrial están relacionados con el grado de adaptabilidad de los procesos industriales y de las líneas de producción.

Ciertas barreras tecnológicas asociadas al grado de madurez, debido a su gran carácter innovador, se pueden encontrar en algunas tecnologías, como el almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase o ciertas tecnologías de producción de gases renovables. Al mismo tiempo, la implementación de nuevos procesos supone lidiar con cuestiones de limpieza y mantenimiento, posible corrosión, tiempos de operación, etc. En el caso del transformador de calor por absorción, su implementación se está tratando de impulsar a nivel nacional mediante iniciativas como el proyecto Indus3es, financiado dentro del programa H2020 de la Unión Europea y liderado por Tecnalia, donde se ha elevado el TRL de la tecnología en el marco nacional y europeo hasta un nivel 7, con un demostrador de 200 kW en Turquía, y se continúa tratando de lograr demostradores a gran escala y validar la tecnología hasta TRL 9. Con este tipo de demostradores a nivel nacional se logrará expandir la idea del aprovechamiento de calor de baja entalpía, desaprovechado en la actualidad y, en ocasiones, considerado no valorizable.

4.5. Recursos ecológicos

La evidencia del cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles proyectados para 2030-2050 son los principales factores que promueven los fuertes esfuerzos europeos para cumplir con las metas ambientales. En lo que ahorros y eficiencia energética se refiere, el sector tiene que ir alineado con las políticas europeas y nacionales adoptadas de cara a 2030, en las que

se establece que al menos el 32 % del consumo provendrá de energías renovables y aumentará un 32,5 % la eficiencia energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 40 %. Para cumplir estos objetivos se considera fundamental la revalorización del calor residual industrial.

La Conferencia sobre el Cambio Climático (COP26) y el Protocolo de Kyoto (CMP)/CMP11 son los principales marcos regulatorios ambientales que afectan al macro ambiente de las tecnologías de recuperación de calor residual. Además, las políticas ambientales nacionales y las regulaciones de CO₂ deben ser abordadas para cada ubicación. Por otra parte, la legislación específica sobre diseño ecológico de procesos y operaciones industriales es la que marcará los requisitos a cumplir, entre otros: el Real Decreto 815/2013 de Emisiones Industriales, Orden PRA/321/2017, Sistema de Comercio de Derechos de Emisión RECD/UE/2021, Eficiencia energética 2012/27/EU, Ecodiseño 2009/125/CE.

4.6. Recursos legales

Las industrias con potencial para implementar las tecnologías de recuperación de calor residual deben cumplir con los respectivos códigos y estándares relacionados con la industria en materia de contaminación, así como normas de salud y seguridad, que varían a nivel europeo, nacional e internacional y deben abordarse mediante estrategias específicas para cada mercado geográfico. Además, hay que tener en cuenta ciertos requisitos de protección y comercialización de la propiedad intelectual. Finalmente, es importante considerar el cumplimiento de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) para permitir así que la implementación de las tecnologías de recuperación de calor residual siga el más alto estándar en la industria.

5. ANÁLISIS DAFO

El análisis DAFO permite el estudio de las características que presentan las tecnologías disponibles (debilidades y fortalezas) y de su relevancia en el ámbito nacional (amenazas y oportunidades). Se trata de una herramienta para impulsar la correcta implementación de nuevas estrategias y tecnologías con éxito. El objetivo de este análisis es tomar las decisiones que mejor se adapten a las exigencias del mercado y del entorno económico a partir de la información que obtenga sobre su situación.

A continuación, se presenta un análisis DAFO que resume las características generales comunes a las distintas tecnologías de recuperación de calor residual industrial.

Tabla 16. Análisis DAFO general de las tecnologías de recuperación de calor residual

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ol style="list-style-type: none"> 1. Transformación de calor residual, disponible en grandes cantidades en las industrias intensivas, en un producto de valor añadido (calor de elevada calidad, electricidad, gases renovables, etc.) 2. Aumento de la eficiencia energética del sistema, reduciendo el consumo energético global, los costes de operación y la contaminación 3. Disponibilidad de gran variedad de tecnologías que pueden ser apropiadas para distintas aplicaciones e industrias 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de proyectos piloto de referencia a nivel nacional 2. Escasez de proveedores tecnológicos 3. Mayores costes de implantación que tecnologías tradicionales de recuperación de calor (economizadores) 4. Falta de conocimiento experto y concienciación de los beneficios de la tecnología dentro de la industria
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Motivación de innovaciones técnicas que estimulan la creación de empleo en el sector industrial y contribuyen al crecimiento económico del país 2. Mercado de emisiones y esquemas de incentivación de proyectos sostenibles 3. Líneas estratégicas de la Comisión Europea en materia de energía y aparición de convocatorias de financiación de I+D+i 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo precio de la energía procedente de combustibles fósiles 2. Reluctancia ante el uso de nuevos sistemas que deben demostrar un alto rendimiento 3. Complejidad de sistemas innovadores y desconocidos 4. Sector energético sometido a posibles cambios políticos, de legislación y de condiciones del mercado, incluidos los mecanismos de apoyo 5. Baja efectividad de los incentivos 6. Situación de incertidumbre socioeconómica debido a la pandemia por COVID-19, que modifica las prioridades del momento

6. CONCLUSIONES

En España, el sector industrial representa un cuarto de la energía final total consumida, de la cual una parte sustancial se convierte finalmente en calor residual, bien en forma de gases calientes generados en un proceso industrial, o bien en forma de vapor obtenido en procesos de generación eléctrica. A pesar de que el calor residual podría satisfacer un 15,2 % de la demanda térmica nacional, el potencial de recuperación sigue desaprovechándose debido a una serie de obstáculos, como la necesidad de disponer de tecnologías eficaces y rentables para recuperar el calor que se pierde y reutilizarlo.

Este informe analiza una serie de tecnologías de recuperación de calor residual industrial para su utilización o transformación en otros vectores energéticos, como electricidad o gases renovables, con el fin de destacar su relevancia en la reducción del impacto medioambiental de los procesos industriales y, por lo tanto, en la transición hacia una economía neutra en carbono:

- Bombas de calor
- Transformadores de calor por absorción
- Calefacción de distrito
- Ciclos orgánicos de Rankine
- Tecnologías termoeléctricas
- Sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase (PCM)
- Conversión de energía a gases renovables

El aprovechamiento del calor residual industrial supone una oportunidad de autoconsumo para las industrias con elevada demanda térmica. Asimismo, el calor residual podría utilizarse para cubrir las necesidades de calefacción de los sectores residencial y comercial, evitando de este modo el consumo de combustibles fósiles. Para consolidar su implementación, son imprescindibles acciones políticas decididas y mantenidas en el tiempo, y mecanismos de incentivación económica, como ayudas al autoconsumo o a la producción de electricidad de origen renovable.

Referencias

- [1] Consejo Europeo| Consejo de la Unión Europea, *Unión de la Energía*. Sitio web (consultado en 12/2020):
<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/energy-union/#>
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. Documento web (consultado en 12/2020):
https://www.miteco.gob.es/images/es/pniecCompleto_tcm30-508410.pdf
- [3] Comisión Europea| CORDIS Resultados de las investigaciones de la UE, *Valorización del calor residual: mejorar la eficiencia energética en las industrias de transformación*. Sitio web (consultado en 12/2020):
<https://cordis.europa.eu/article/id/422033-waste-heat-valorisation/es>
- [4] Ministerio de Turismo, Industria y Energía (MINETUR), *Evaluación completa del potencial de uso de la cogeneración de alta eficiencia y de los sistemas urbanos de calefacción y refrigeración eficientes*, 2016. Documento disponible en sitio web (consultado en 12/2020):
<https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transformacion-de-la-energia/evaluacion-potencial-uso-cogeneracion-alta-eficiencia-y-sistemas-urbanos>
- [5] Comisión Europea, *Estrategias y objetivos climáticos*. Sitio web (consultado en 12/2020):
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_es
- [6] IEA Heat Pump Centre, *Annex 35. Application of Industrial Heat Pumps. Final Report. Part I*, 2014, Sweden. Documento disponible en sitio web (consultado en 12/2020):
<https://heatpumpingtechnologies.org/publications/application-of-industrial-heat-pumps-part-1/>
- [7] European Heat Pump Association (EHPA), *Large scale heat pumps in Europe. 16 examples of realized and successful projects*, Industrial & Commercial Heat Pump Working Group (ICHP WG). Documento disponible en sitio web (consultado 12/2020):
<https://www.ehpa.org/media/>
- [8] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, S.S. Betsch, *High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials*, Energy 152(2018)985-1010
- [9] European Heat Pump Association (EHPA), *Large scale heat pumps in Europe. Vol. 2. Real examples of heat pump applications in several industrial sectors*. Industrial & Commercial Heat Pump Working Group (ICHP WG). Documento web (consultado 12/2020):
https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03_Media/Publications/Large_heat_pumps_in_Europe_Vol_2_FINAL.pdf

- [10] C. Mateu-Royo, J. Navarro-Esbrí, A. Mota-Babiloni, M. Amat-Albuixech, F. Molés, *Theoretical evaluation of different high-temperature heat pump configurations for low-grade waste heat recovery*, International Journal of Refrigeration 90(2018)229-237
- [11] J. Jutsen, A. Pears, L. Hutton, *High temperature heat pumps for the Australian food industry: opportunities assessment*, 2017, Australian Alliance for Energy Productivity. Documento web (consultado 12/2020): https://www.airah.org.au/Content_Files/Industryresearch/19-09-17_A2EP_HT_Heat_pump_report.pdf
- [12] R. de Boer, A. Marina, B. Zühlsdorf, C. Arpagaus, M. Bantle, V. Wilk, B. Elmegaard, J. Corberán, J. Benson, *Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat*, 2020.
- [13] T. Nowak, P. Westing, *The European Heat Pump Market and Statistics Report 2019*. European Heat Pump Association (EHPA). Documento disponible en sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.ehpa.org/market-data/market-report/report-2019/>
- [14] K. Lygnerud, S. Werner, *Risk of industrial heat recovery in district heating systems*, Energy Procedia 116(2017)152-157
- [15] DOOSAN, *Catálogo PureCell®|™Model 400 Fuel Cell System*. Documento web (consultado 12/2020): http://www.doosanfuelcellpower.com/download/pdf/catalog/pafc-400kw_en.pdf
- [16] Global Oil and Gas Industry Association for Advancing Environmental and Societal Performance (IPIECA). Sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.ipieca.org/about-us/>
- [17] Enagás, *Plantas de regasificación*. Sitio web (consultado en 12/2020): https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion
- [18] D. Solera Rico, *Proyecto Shaky*, 17/07/2019, Interempresas. Artículo de periódico digital (consultado en 12/2020): <http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/251970-Proyecto-Shaky.html>
- [19] T. Tartière, M. Astolfi, *A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market*, Energy Procedia 129(2017)2-9
- [20] Sistema de información del operador del sistema (E·SIOS), *Red Eléctrica de España*. Sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.esios.ree.es/es>
- [21] D.M. Rowe (Ed.), *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, 2006, Boca Raton: CRC Press

- [22] Wei-Hsin C., Chen-Yeh L., Chen-I H., Wei-Lun H., *Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions*, Energy 45(1)874-881, 2012
- [23] Jiin Yuh J., Ying Chi T., *Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system*, Applied Thermal Engineering 51(1-2)677-689, 2013
- [24] AEInnova, *INDUEYE*. Sitio web (consulta en 12/2020): <https://aeinnova.com/indu-eye/>
- [25] DW, *Living Planet: The problem with lithium mining*. Sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.dw.com/en/living-planet-the-problem-with-lithium-mining/av-46211787>
- [26] BBC, *Top tech firms sued over DR Congo cobalt mining deaths*, 2019. Sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.bbc.com/news/world-africa-50812616>
- [27] P. Royo, *Tesis: Integración de materiales de cambio de fase a alta temperatura en sistemas de almacenamiento térmico para la recuperación avanzada de energía en hornos industriales*, Zaragoza: Universidad de Zaragoza - CIRCE, 2020
- [28] CIRCE, *Deliverable 4.3: Solar Heat integration and Thermal Optimization*, SHIP2FAIR Project (H2020 GA:792276), 2020
- [29] M.K. Rathod, J. Banerjee, *Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 18(2013)246-258
- [30] K.S. Reddy, V. Mudgal, T.K. Mallick, *Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management*, Journal of Energy Storage 15(2018)205-227
- [31] M. Bortolotti (Ed.), *EASE/EERA Roadmap for European energy storage technology development*, p.128, 2017
- [32] P. Royo, V. J. Ferreira, Z. Ure, S. Gledhill, A.M. López-Sabirón, G. Ferreira, *Multiple-Criteria Decision Analysis and characterization of phase change materials for waste heat recovery at high temperature for sustainable energy-intensive industry*, Materials and Design 186(2020)108-215
- [33] H. Nazir, M. Batool, F.J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, Xianhai Xu, K. Vignarooban, P. Phelan, Inamuddin, A.M.Kannan, *Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review*, International Journal of Heat and Mass Transfer 129(2019)491-523
- [34] P. Royo, L Acevedo, V.J. Ferreira, T. García-Armingol, A.M. López-Sabirón, G. Ferreira, *High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries*, Energy 173(2019)1030-1040

- [35] L. Miró, J. Gasia, L.F. Cabeza, *Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review*, Applied Energy 179(2016)284-301
- [36] A.M. López-Sabirón, A. Aranda-Usón, M.D. Mainar-Toledo, V. J. Ferreira, G. Ferreira, *Environmental profile of latent energy storage materials applied to industrial systems*, Science of the Total Environment 473-474(1)565-575, 2014
- [37] V.J. Ferreira, A. M. López-Sabirón, P. Royo, A. Aranda-Usón, G. Ferreira, *Integration of environmental indicators in the optimization of industrial energy management using phase change materials*, Energy Conversion and Management 104(1)67-77, 2015
- [38] A. Feliu Jofre, X. Flotats Ripoll, *Los gases renovables. Un vector energético emergente*, Fundación Naturgy. Documento disponible en sitio web (consultado en 12/2020): <https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/los-gases-renovables-un-vector-energetico-emergente/>
- [39] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), *Consumo de energía final: evolución por sectores*. Sitio web (consultado en 12/2020): <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=Consumo%20de%20energ%EDa%20final&tipbal=f&rep=1>

ESTE DOCUMENTO SE HA REALIZADO CON LA AYUDA DE LA AGENCIA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN CORRESPONDIENTE A LA CONVOCATORIA DE TRAMITACIÓN ANTICIPADA DEL AÑO 2018 DE PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS Y DE INNOVACIÓN, DEL PROGRAMA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN ORIENTADA A LOS RETOS DE LA SOCIEDAD, EN EL MARCO DEL PLAN ESTATAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA Y DE INNOVACIÓN 2017-2020.

CON EL APOYO DE:



PTR 2018-001043



Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética
Agustín de Foxá 25, Planta 1, Oficina 101 - 28036 Madrid
secretaria@pte-ee.org +34 917 88 57 24