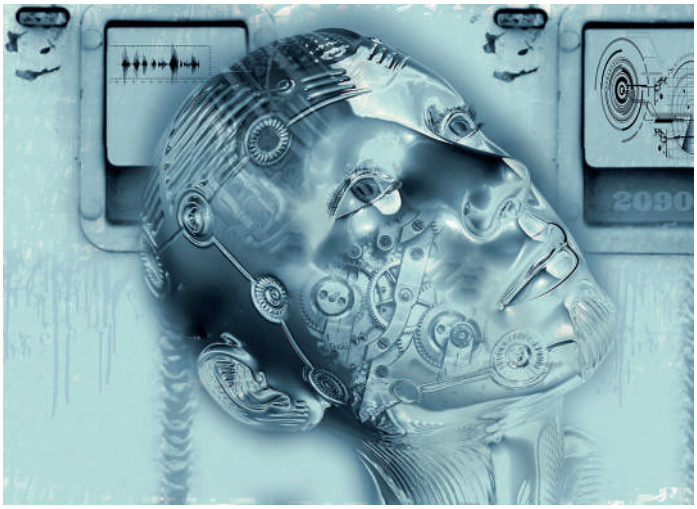
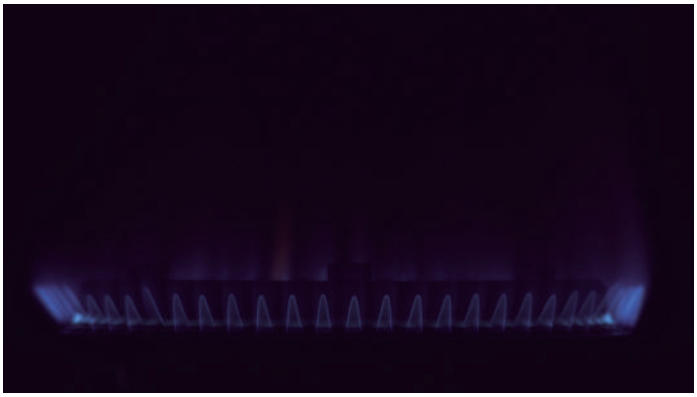


ESTUDIO DE PROSPECTIVA 2030-2050 DE TECNOLOGÍAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA



FECHA 15 de diciembre de 2020

Plataforma tecnológica española de eficiencia energética

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES

Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética (PTE-EE)

Plataforma
tecnológica española de
eficiencia energética

GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES

AUTORES

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS
Aitana Sáez De Guinoa Vilaplana, Víctor Ballestín Trenado; David Alejandro Zambrana Vasquez; Felipe Del Busto Pinzón; Gema Millán Ballesteros; Eva Roldán Saso; María Blecua de Pedro, Clara Á. Jarauta Córdoba, Bárbara Palacino Blázquez, Javier Marcos González.

PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
Guillermo José Escobar López.

TECNALIA
Mercedes Gómez de Arteche Botas, Asier Martínez Urrutia, Miguel Ramírez Stefanou, Sergio Saiz Bombín.

COLABORADORES

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS
Fernando Círez Oto, Álvaro Jorge Arnal Mañas, David Martínez Hernández, Tatiana García Armingol, Alejandro Díaz Baños, Miguel Ángel Castán Lascorz, Ana Isabel González Espinosa, Martina del Cerro, Patricia Royo Gutiérrez.

PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
Rocío Fernández Artime, José Antonio Ferrer Tevar, Armando Uriarte González, Pablo Frades Colmenarejo.

TECNALIA
Ekain Fernández Gesalaga, Jon Zuñiga Palacio.

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

Entidades que han colaborado en la realización del estudio aportando sus conocimientos, opiniones y datos

Presentación

Estimad@s colegas.

Me alegro de encontraros en la lectura de estas páginas, que con tanta ilusión y esfuerzo hemos desarrollado desde la Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética.

El motivo es doble. En primer lugar, porque ello significa que os encontráis en buen estado de salud, lo cual deja atrás meses duros para todos. Meses de transformación, de reflexión y, sin lugar a duda, de enriquecimiento. En segundo lugar, por compartir intereses comunes y una visión importante de futuro. Un futuro en el que la eficiencia energética juega un papel destacado.

Si bien no hemos podido enriquecernos de la lectura previa de la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, publicada por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, ya que ésta ha sido elaborada casi al mismo tiempo, no podemos al menos, dejar de comentar el paralelismo de objetivos perseguidos en ambos documentos.

La neutralidad carbónica es el hito de la sociedad futura, cuyo nacimiento estamos comenzando a tejer y requerirá de una apuesta firme y continua de todos los agentes implicados: tecnológicos, reguladores, financieros, empresariales y sociales. Su desarrollo y consecución no evolucionará por igual en los distintos sectores, pero ninguno de ellos podrá obviarla.

Como todos podrán imaginar, desarrollar la prospectiva tecnológica de la eficiencia energética a 2050 ha sido un reto arriesgado qué, para ser conformado, ha contado con la participación relevante de todos los sectores consultados; hecho que de manera expresa deseo agradecer.

Por último, quisiera poner en valor el trabajo realizado por la Fundación Circe, y Tecnalia, así como la colaboración del IDAE y de la Comisión Permanente de la PTE-ee, cuyas aportaciones, realizadas con un espíritu colaborativo óptimo, han enriquecido el documento que hoy les presentamos.

Esperamos que pueda resultar de su interés, y quedamos a su entera disposición, ante cualquier duda, o disponibilidad para colaboración, que el mismo les inspire.

Un cordial saludo.

Rocío Fernández Artime
Presidente de la PTE-ee

Agradecimientos

En la realización del estudio han colaborado entidades de todo tipo, relacionadas con los sectores implicados, pero también con la investigación y el desarrollo tecnológico. Estas entidades son:

• OFICEMEN
• ANFACO- CECOPESCA
• CENTRO TECNOLÓGICO NACIONAL DE LA CONSERVA Y ALIMENTACIÓN
• IA2 - U DE ZARAGOZA
• CTIC-CITA
• PLATEA (PTE-Acero)
• ACITURRI
• ASEFAVE
• U POLITÉCNICA DE CATALUNYA
• GRUPO TECMARED
• CLUSTER ENERGÍA DEL PAÍS VASCO
• ITS ESPAÑA
• ADIF
• LEA
• AISUM
• TEKNIKER
• SAICA
• CENTRO TECNOLÓGICO CTC
• BATTERYPLAT (PTE Almacenamiento)
• AESA
• EDP
• IMDEA ENERGÍA

Asímismo, en la fase preparatoria, una serie de organizaciones nos ayudaron a definir los retos y las tecnologías emergentes que constituyeron la batería inicial de objetivos del estudio. Estas entidades fueron:

• ASPAPEL
• OFICEMEN
• AFEC
• ASIT (PTE energía solar térmica)
• AEDIVE
• FUNDACIÓN DEL FERROCARIL (PTE del Ferrocarril)
• ANAVE
• ATUC
• AENA
• SENASA
• AESA (Seguridad Aérea)
• GASNAM.
• AMETIC
• ITS España
• GRUPO TECMARED

Contenidos

01 Introducción

1.1. Enfoque del estudio ---------- 12
1.2. Metodología ---------- 14

02 Sector Industrial

2.1. **Bombas de calor de alta temperatura (<140°C)** ---------- 17
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.2. **Transformadores de calor por absorción (AHT)** ---------- 21
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.3. **Separación mediante tecnología de membranas** ---------- 24
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.4. **Reducción del porcentaje de clínker en el cemento** ---------- 31
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.5. **Nuevas tecnologías para pasteurización/esterilización de alimentos** ---------- 34
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.6. **Concentración de efluentes mediante membranas** ---------- 39
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

Contenidos

2.7. **Diagnóstico y optimización de la combustión mediante visualización de llama** 44
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

2.8. **Digitalización de procesos** 48
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

03 Sector Edificación

3.1. **Almacenamiento térmico a nivel de vivienda o edificio por calor latente y por reacciones químicas** 55
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

3.2. **Sistemas de producción de energía integrados en fachada (soluciones activas estáticas y dinámicas)** 65
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

04 Sector Transportes

4.1. **Gemelos Digitales de Movilidad** 75
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

4.2. **Recuperación de energía de frenada, Smart Grids y combustibles alternativos para el subsector Ferrocarril** 81
Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO91

Contenidos

4.3. **Nuevos materiales y motores más eficientes para el subsector Transporte Aéreo** - - - - - - - - - **86**

Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

05 Sector Transversal

5.1. **Sistemas de Acumulación eléctrica de gran capacidad y potencia para mejorar la integración y eficiencia de grandes sistemas de cogeneración (industria y grandes edificios)** - - - - - - - **91**

Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

5.2. **Sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de transporte que permitan mejorar la eficiencia respecto a los sistemas de tracción basada en combustibles fósiles** - - - - - - - - - **98**

Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

5.3. **Nuevos combustibles derivados de residuos o producidos a partir de electricidad renovable** - - - - - - - **104**

Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

5.4. **Nuevos materiales que permitan reducir el consumo o mejorar la eficiencia de los sistemas o equipos donde se utilicen** - - - - - - - **114**

Descripción
Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución
Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050
Análisis DAFO

Contenidos

5.5. **Sistemas fiables de monitorización, control, mantenimiento predictivo, diagnóstico de averías y tele-reparación, basados en Inteligencia Artificial** 123

Descripción

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Análisis DAFO

Índice de figuras 131

Índice de tablas 132

01 Introducción

Uno de los principales objetivos energéticos y medioambientales a nivel europeo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-95% para 2050 respecto a los niveles 1990[1]. Para alcanzar estos objetivos, cada país miembro de la Unión Europea tiene que garantizar una reducción de emisiones dirigidas hacia la descarbonización del sistema energético. En este sentido, se diferencian tres escenarios complementarios:

1- Aumento de la penetración de fuentes de energía renovables (hasta un 75% en 2050 con un objetivo final del 97%) y flexibilización de la demanda.

2- Reducción de consumo energético mediante implementación de medidas de mejora de eficiencia energética.

3- Como complemento a los dos anteriores, desarrollar tecnologías eficientes para la captura de CO_2 en las situaciones en las que no se pueda suprimir el consumo de energía fósil.

Considerando este contexto a largo plazo, y dejando al margen la penetración de energía renovables, uno de los pilares para la consecución de los objetivos es la mejora de la eficiencia energética. En concreto, en el contexto nacional, este es uno de los objetivos clave recogidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP), la Hoja de Ruta del Hidrógeno, la Estrategia Española de Ciencia Tecnología e Innovación (EECTI) y el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la Economía, que se tomarán como referencia para sentar las bases que permitan consolidar la transición hacia la neutralidad climática en el horizonte 2050.

Para llevar a cabo este proceso de descarbonización basado en la mejora de la eficiencia energética, será necesario desarrollar y llevar al mercado nuevas tecnologías, por lo que es importante conocer los retos en materia de I+D que se presentan, y las estrategias necesarias para vencer las barreras que pueden dificultar su desarrollo.

Con este objetivo, la Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética encargó la ejecución de un Estudio de Prospectiva en Tecnologías de Eficiencia Energética en el horizonte 2030-2050, cuyos resultados principales se plasman en este informe.

1- Energy Roadmap 2050.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf

1.1 Enfoque del estudio

Teniendo en cuenta la distribución de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero en España, este informe pretende abordar tres de los sectores que más contribuyen a dicho impacto: industria, edificación y transporte. Para cada uno de estos sectores se analizará la prospectiva de una serie de tecnologías, permitiendo evaluar sus necesidades de desarrollo, las barreras a vencer, y el potencial de mejora esperable, tanto en consumo de energía como de emisiones. Además, se analizan una serie de tecnologías transversales que pueden aplicarse a varios sectores.

Desde el punto de vista del **sector industrial**, la mayor parte de la reducción de emisiones planteada en el PNIEC se centra en la disminución de aquéllas asociadas a procesos de combustión pero, para cumplir las perspectivas a 2050, será necesaria la mejora en tecnologías asociadas a otras etapas del proceso productivo como las que se detallarán en el punto 2 de este informe. En particular, dentro de este sector se abordan la industria química, la industria agroalimentaria, la industria del cemento y la siderurgia, considerando sus hojas de ruta sectoriales y la evolución de una serie de tecnologías emergentes.

En el caso del sector químico cabe destacar que es el que más recursos asigna al desarrollo de I+D+i, acumulando una cuarta parte de las inversiones que la industria destina a esta área. Respecto a la innovación, este sector también lidera el gasto e inversión industrial, situándose por encima de los 1.500 millones de € anuales, lo que supone un 13% sobre el valor añadido, seis puntos más que la media industrial y 11 por encima de la media nacional. 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 (GEI) en al menos un 40 %[2].

En lo referente al sector agroalimentario, hay que indicar que aglutina el 11% de las emisiones de gases de efecto invernadero, si bien es cierto que gran parte de dichas emisiones proceden de la agricultura[3]. En concreto, la industria agroalimentaria supone un 13% de los consumos de energía primaria[4], asociados al procesado de cereales, productos lácteos y cárnicos entre otros. Dentro de este sector, la aplicación de diferentes tecnologías para suministro de calor/frío en el procesado de alimentos, así como control y automatización de procesos asociados mediante inteligencia artificial, tienen un potencial de reducción de consumo total del orden del 50-60% con un horizonte 2050[5].

Por su parte, el sector del cemento, que es el responsable del 5% de las emisiones de dióxido de carbono de origen antropogénico a nivel mundial, plantea una hoja de ruta según la cual la huella de carbono del sector podría reducirse en un 35% en comparación con los niveles del año 1990. Además, mediante la aplicación de nuevas tecnologías emergentes como la captura y almacenamiento de carbono, junto con el apoyo de políticas específicas y desarrollos tecnológicos claves, permitirían alcanzar una reducción potencial del 80% en el año 2050[6].

2- CESCE: Informe sectorial de la economía española. 2019
3- La Energía en España 2017.
4- Datos Instituto Nacional de Estadística.
5- ICF Consulting. Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry from possible Policy Mechanisms.
6- Oficemen: Hoja de ruta De la industria española el cemento para la reducción de emisiones de carbono a 2050.

Por último, dentro del ámbito industrial, el sector siderúrgico es uno de los sectores más intensivos en consumo de energía y, por tanto, responsable de una parte importante de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, debido a la falta de tecnología para llevar a cabo las reducciones planteadas en las hojas de ruta a nivel internacional, solo se lograría una disminución del 15% en la generación total de dióxido de carbono para el mejor de los escenarios planteados para el sector[7]. Por esta razón, es importante analizar el potencial de aparición de nuevas tecnologías, así como las medidas de incentivación del sector que permitan incrementar este porcentaje.

Desde el punto de vista del **sector de la edificación**, tras la modificación en mayo de 2018 de la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios 2010/31/UE, se incluyeron nuevas estrategias en la Directiva 2018/844/UE, para apoyar la renovación de los edificios, tanto residenciales como no residenciales, públicos y privados, con el fin de transformarlos con medidas de alta eficiencia energética y descarbonizarlos antes de 2050, facilitando la transformación a edificios de consumo de energía casi nulo. Dentro de los objetivos planteados en rehabilitación energética de edificios, se disponen, por un lado, una mejora de la eficiencia energética de la envolvente térmica en 1,2 millones de viviendas y, por otro, una renovación de las instalaciones térmicas de calefacción y ACS de 300.000 viviendas al año de media[8]. En el caso de edificios públicos, se determinan objetivos de renovación del 3% anual de la superficie edificada[9]. En este informe se detallan, dentro del sector de la edificación, los retos y tecnologías detectadas para promover soluciones que ayuden a alcanzar los objetivos establecidos y reducir la dependencia energética, esperada en el 61% para 2030[10]. Tomando estos datos como punto de partida para determinar la prospectiva 2030-2050 que se presenta en este estudio, se analizan diferentes tecnologías de sistemas de generación de calor y de frío, uso de energía renovable en edificios y soluciones activas y pasivas en la rehabilitación energética de edificios.

Finalmente, el **transporte** es el tercer sector clave presentado en este informe. La hoja de Ruta del Transporte 2050 recoge una serie de retos y oportunidades que incluyen aspectos estructurales con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 60% respecto a los valores de 1990[11]. Por ejemplo, en el transporte por ferrocarril se quiere aumentar la tasa de uso en media distancia y cercanías, lo que supondrá una reestructuración de las rutas existentes y su gestión[12]. Para conseguir los objetivos planteados para el sector, es importante reducir la dependencia de los sistemas de transportes respecto de los combustibles fósiles (petróleo) sin causar un detrimento en su eficiencia ni comprometer la movilidad. Para ello, se plantean diferentes medidas basadas en sustitución de combustibles, utilización de técnicas digitales para la optimización de rutas o cadenas logísticas multimodales, así como reducción de peso en el material rodante.

Además de disponer de tecnologías accesibles, en los sectores edificios, transporte y servicios, es particularmente importante la movilización de la población para racionalizar la demanda de energía vía un cambio de hábitos de consumo y movilidad.

7- CESCE: Informe sectorial de la economía española.
8- PNIEC 2021-2030.
9- PNIEC 2021-2030.
10- PNIEC 2021-2030.
11- Comisión Europea, Libro Blanco del Transporte.
12- MEMO Transporte 2050: principales desafíos y medidas clave. MEMO/11/197.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/MEMO_11_197.

1.2 Metodología

En este punto se detalla la metodología seguida para llevar a cabo el estudio, así como las principales hipótesis de cálculo utilizadas para la estimación del potencial de ahorros de energía y reducción de emisiones.

La Figura 1 muestra las 3 Fases principales del proyecto y sus interacciones:

FASE 1: Diagnóstico del estado tecnológico del sector/subsector. Esta fase comenzó con un análisis preliminar y una exhaustiva revisión bibliográfica de los sectores y tecnologías planteadas en un prediagnóstico realizado por la PTE-ee. Tras esta revisión inicial, se llevaron a cabo diferentes reuniones y conversaciones sectoriales con el objetivo de determinar la viabilidad y las necesidades de cada tecnología.

FASE 2: Partiendo del diagnóstico realizado en la FASE 1 y los comentarios recibidos de los expertos sectoriales, el siguiente paso consistió en la clasificación de la documentación y a la priorización de medidas. Durante esta fase, y previo acuerdo con la PTE-ee, se eliminaron aquellas tecnologías que se encontraban en TRL-9 y que, por lo tanto, no tenían cabida en un informe de prospectiva a 2030-2050, como, por ejemplo, el secado y utilización como combustible de lodos de depuradora en la industria cementera, los sistemas de refrigeración de doble etapa con NH_3 y CO_2, y el sistema de tratamiento térmico de leche en un solo paso, sin pasteurización intermedia. Otra medida sustituida ha sido la relativa a la aplicación de Inteligencia Artificial al proceso de desgasificación del acero en la metalurgia secundaria. La opinión del sector al respecto es que no sería ampliamente replicable en España y que no se considera un área prioritaria a la que dedicar los esfuerzos en I+D+i.

FASE 3: Consistió en la elaboración del informe final y el refinado de la información con expertos sectoriales en los casos que fue necesario. El informe final está acompañado de una serie de fichas resumen para cada una de las tecnologías (no incluidas en este documento).

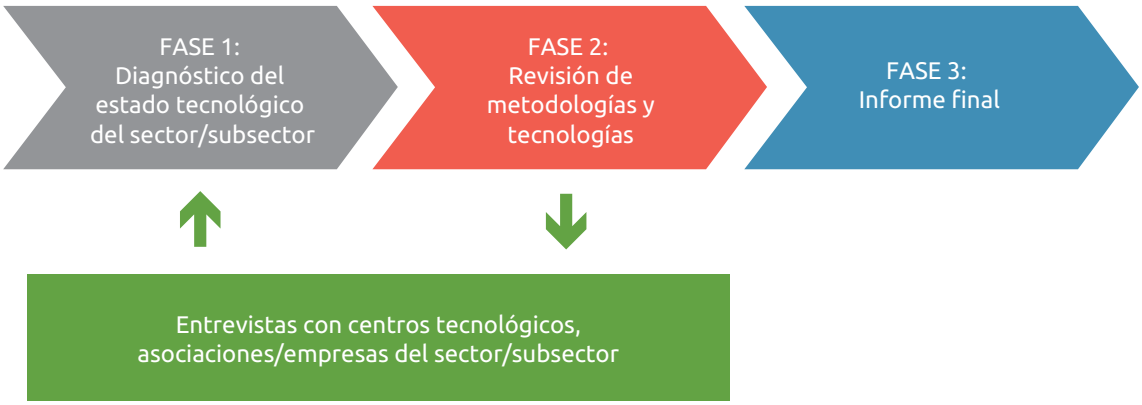


Figura 1. Fases del proyecto.

Cabe señalar que las tres Fases no son secuenciales, sino parte de una técnica iterativa que ha permitido ir incrementando el nivel de detalle durante la interpretación. Esta actividad transversal corresponde a la combinación de los resultados del diagnóstico y la revisión con la evaluación de las metodologías y tecnologías identificadas, para poder desarrollar la hoja de ruta de la implementación.

Además de la metodología usada para recopilar y contrastar la información incluida en el presente informe, la siguiente figura muestra la metodología de cálculo utilizada para definir la línea base de consumos de energía por subsector y estimar los ahorros en términos de energía y emisiones esperados en el horizonte 2030-2050.

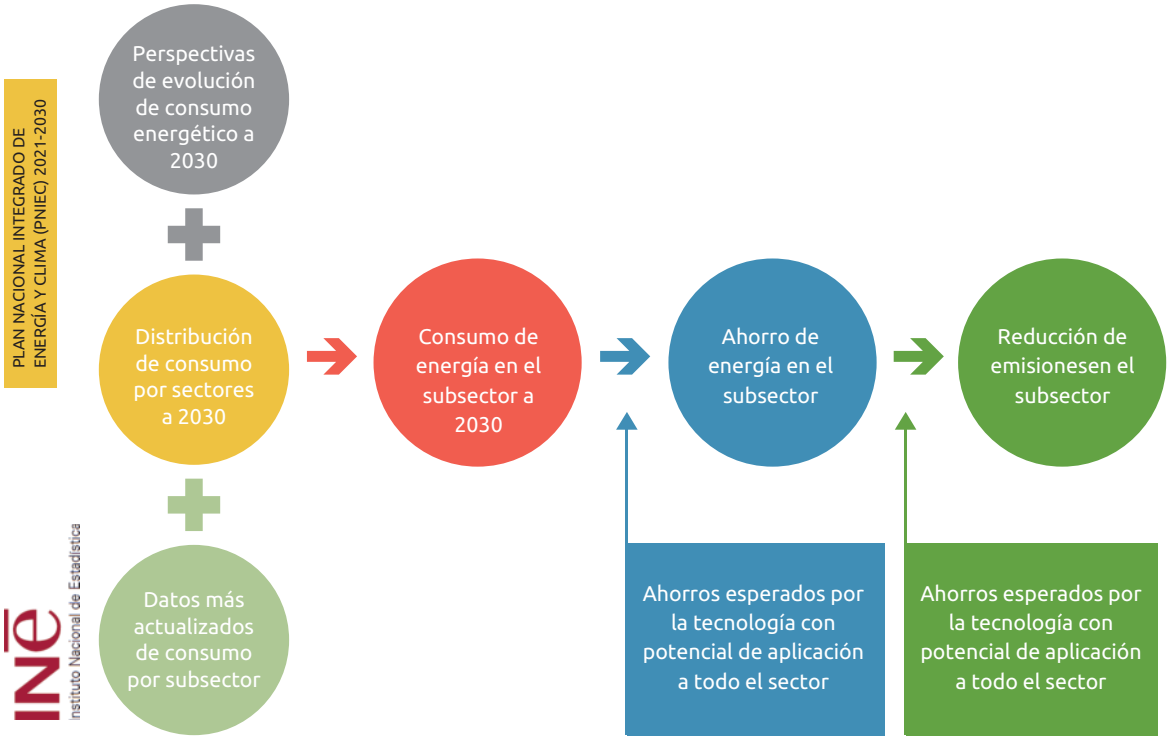
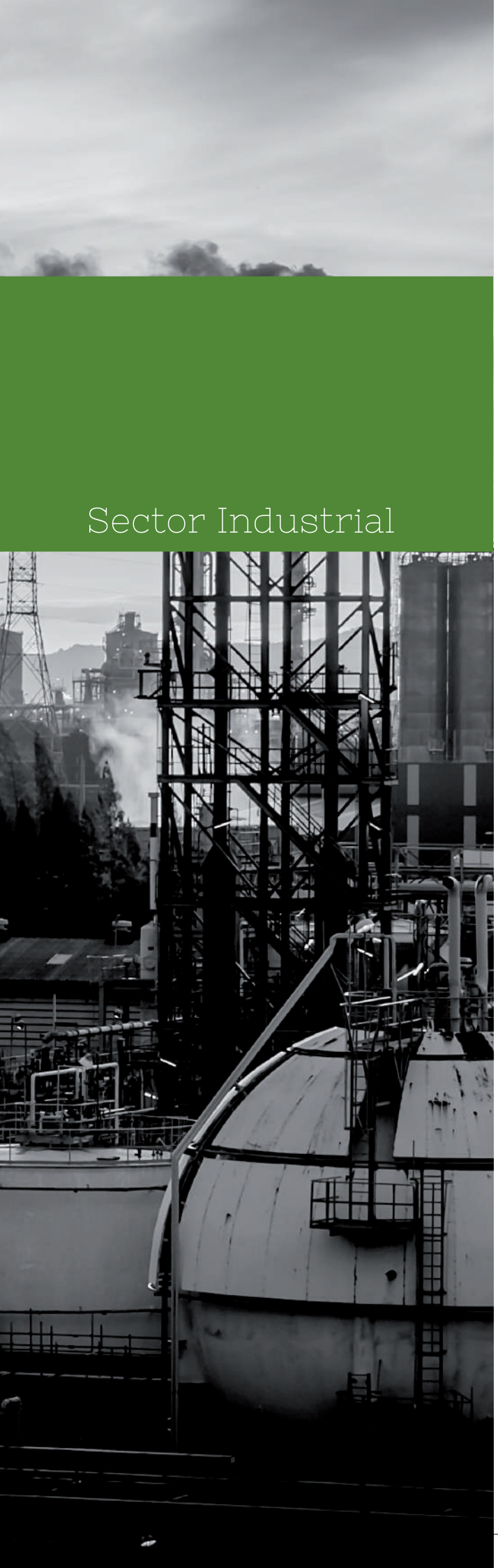


Figura 2. Metodología de cálculo para la evaluación de ahorros y reducción de emisiones esperadas tras la implementación de las tecnologías.

02 Sector Industrial



Sector Industrial

2.1 Bombas de calor de alta temperatura (<140 °C)

Descripción

Las bombas de calor son equipos que utilizan el ciclo de refrigeración cerrado con un compresor que es accionado por un motor eléctrico o de combustión de gas. El fluido de trabajo o refrigerante es uno de los componentes principales que, mediante sus propiedades termodinámicas, transfiere energía térmica del foco frío al foco caliente. Dependiendo del rango de temperaturas en las que se encuentran los focos, se denominan: equipos de refrigeración, bombas de calor de baja, de media y de alta temperatura. El salto de temperatura entre el foco frío y el foco caliente que puede brindar una bomba de calor está entre los 30 y 70 °C.

El principio de operación de las bombas de calor de alta temperatura se basa en el aprovechamiento del calor residual procedente de un proceso industrial (30-100 °C) para la evaporación del refrigerante en el evaporador, que opera a baja presión. Una vez captado ese calor, el refrigerante evaporado se comprime y eleva su presión al paso por el compresor y entra en el equipo condensador, donde cede su calor a la corriente entrante (fría) a revalorizar, siendo el objetivo alcanzar temperaturas de hasta 140 °C. Una vez cedido ese calor, el refrigerante vuelve a su estado líquido y reduce su presión a su paso por la válvula de expansión, para volver a iniciar el ciclo.

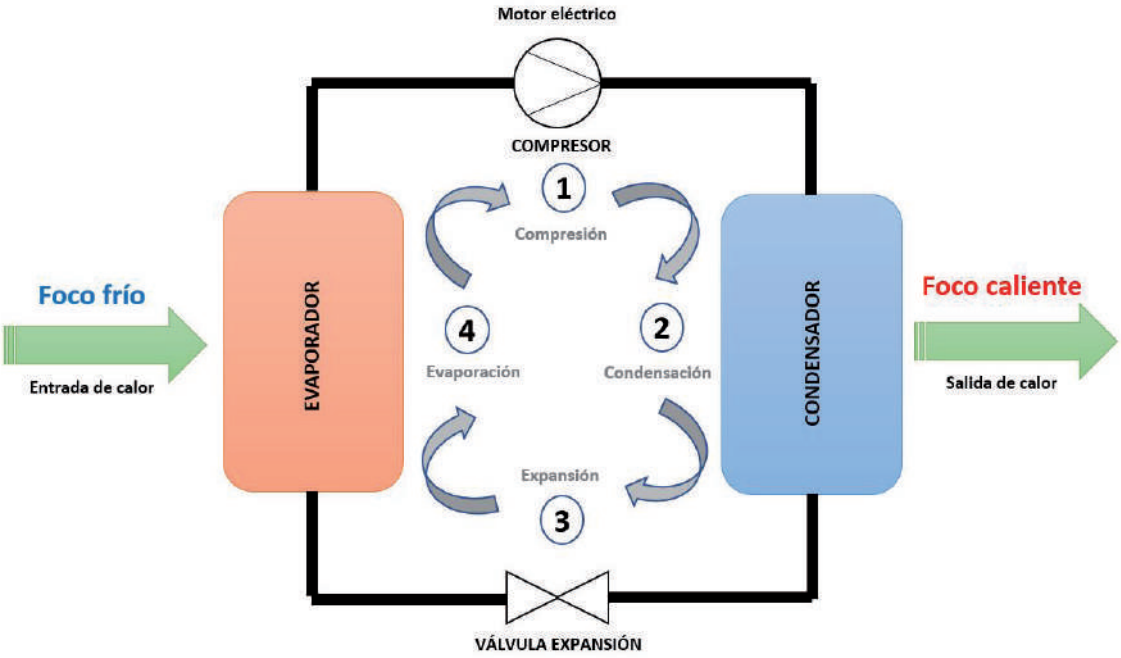


Figura 3. Principio de operación de un ciclo de compresión simple.

En este contexto, existe en la industria multitud de procesos, muy habituales, que producen corrientes residuales de calor de baja temperatura y que no son aprovechadas en la actualidad. Cabe señalar los siguientes procesos industriales en la industria química, petroquímica, farmacéutica y alimentaria, en los que esta tecnología tiene una cabida importante:

• 30 °C - 60 °C: Torres de refrigeración, Precalentamiento, Lavado.

• 60 °C - 100 °C: Lavado, Pasteurización, Esterilización, Secado.

• 100 °C - 140 °C: Vapor, Destilación, Desalinización.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

El mercado de estos equipos ha estado monopolizado y dirigido a la generación de calor con temperaturas de operación de hasta 80 °C[13]. Esto ha enfocado la investigación y el desarrollo hacia refrigerantes y componentes que operen a estas temperaturas. El rango de temperatura de operación del equipo está limitado por las propiedades del refrigerante que se determinan por su temperatura y presión crítica. Las bombas de calor para aplicaciones industriales (TRL 9) pueden trabajar con temperaturas en el foco frío entre 0 y 40 °C y pueden llegar a generar temperaturas de hasta 80 °C. No obstante, existen muy pocos fabricantes que puedan brindar una solución para trabajar con temperaturas más elevadas.

El reto en la actualidad reside en tratar de alcanzar temperaturas hasta 140 °C, utilizado refrigerantes tipo HFO (hidrofluoroolefinas) de última generación, naturales como hidrocarburos, CO_2 y NH_3, con índice GWP (Global-warming potential) <150 y alcanzar COPs (coefficent of performance) en torno a 6, con temperaturas de activación entre 40-70 °C.

13- Arpagaus 2018, High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants and application potentials.

En la actualidad, no existen prototipos a escala industrial ni a nivel español ni a europeo, y el papel fundamental lo desarrollan los centros tecnológicos y los fabricantes (compresores, refrigerantes, válvulas de expansión) para tratar de alcanzar las prestaciones de alta temperatura hasta 140 °C, sobre todo en el marco de proyectos europeos. Se podría afirmar, por tanto, que a nivel nacional la tecnología se encuentra en un TRL 4, ensayando prototipos de laboratorio y componentes con el fin de alcanzar dichas temperaturas objetivo y COPs en torno a 4-6, gracias a iniciativas de I+D a nivel europeo (H2020; SPIRE; HORIZONTE EUROPA) y nacional (Retos; Misiones-CDTI, etc.). Involucrados en el desarrollo de esta tecnología, se encuentran centros tecnológicos nacionales como Tecnalia Research & Innovation y la Universidad Politécnica de Valencia. Algunas iniciativas destacables se indican a continuación:

Proyecto CHESTER: (2018-2022) "Compressed Heat Energy Storage for Energy from Renewable sources". El principal objetivo del proyecto CHESTER es el desarrollo y validación de un sistema innovador que permite la gestión, el almacenamiento y el suministro de energía combinando el sector eléctrico con el sector térmico. Proyecto financiado dentro del H2020 de la Unión Europea.
https://www.chester-project.eu/

Proyecto HeatUp: (2015-2019) "High temperature heat pumps for efficient utilisation of low temperature surplus heat". El objetivo de HeatUp es ampliar el rango de temperatura de las bombas de calor más allá de los 200 °C mediante el uso de fluidos de trabajo naturales como butano, amoniaco (NH_3) y agua (H_20). https://www.sintef.no/projectweb/heatup/

Proyecto DryFiciency: (2016-20121) "Waste Heat Recovery in Industrial Drying Processes". El objetivo es llevar a los sectores intensivos en energía de la industria manufacturera europea a una alta eficiencia energética y una reducción de las emisiones de carbono fósil mediante la recuperación de calor residual para fomentar la competitividad, mejorar la seguridad del suministro energético y garantizar una producción sostenible en Europa.
http://dry-f.eu/

Es necesario el aumento de la diseminación de la tecnología en el entorno de los sectores señalados (papel, química, petro-química, farmacéutica, alimentario) para concienciar de la necesidad de participación industrial y la implantación de prototipos a gran escala.

En lo que se refiere a la viabilidad económica, cabe destacar que la inversión asociada a un equipo de escala comercial, en el entorno de 1 MW de calor revalorizado rondaría los 500 €/kW revalorizado, suponiendo el equipo de bomba de calor en torno a 40-50 % de la inversión total, y siendo lo restante la inversión asociada a la instalación del mismo. Los costes de operación y mantenimiento podrían situarse en torno al 5 %, en concreto derivado del compresor, y donde se podrían llevar a cabo acciones de mejora para reducirlo.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Tomando como ejemplo un equipo en torno a 1 MW de potencia revalorizada (salida condensador), el calor recuperado podría rondar los 750 kW, considerando una corriente de entrada de calor residual en torno a 90 °C y de corriente recuperada en torno a 135 °C.

Para este mismo rango de potencia, en los 20 años de vida útil de una máquina de 1 MW de calor revalorizado, se pueden ahorrar unos 24.400 t de , lo que supone unos 48 kg CO_2/€ invertido. 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 CO_2/GJ[14]), y el consumo de energía final que tiene la bomba de calor derivado del compresor (110 kg CO_2/MWh[15]).

Análisis DAFO

En la tabla 1, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas, Oportunidades) de esta tecnología.

La fortaleza de esta tecnología reside en la valorización de corrientes residuales abundantes en la industria energéticamente intensiva y que, en la actualidad no son valorizadas por su "baja temperatura" (<100 °C). Además, las bombas de calor tienen un bajo consumo de energía final (compresor) y los costes de mantenimiento anuales podrían considerarse bajos, en torno al 5% de la inversión.

La principal amenaza reside en las tecnologías actuales para generación de vapor de baja presión (calderas de vapor) y que las industrias no apuesten por la innovación y la descarbonización de su sector en este sentido.

La principal debilidad con la que se encuentra esta tecnología es que no se utiliza de manera amplia en procesos industriales a nivel nacional/europeo. Por lo tanto, no existe un "know-how" aplicable a las fases del desarrollo y estudio económico. Además, hay una disponibilidad muy limitada de componentes críticos como compresor, válvula de expansión, etc., para altas temperaturas. A esto hay que sumar el desconocimiento de la posibilidad de generación de vapor de baja presión, en comparativa con la producción actual mediante generadores de vapor.

Debilidades

- Falta de concienciación del sector industrial para revalorizar el calor de baja temperatura (30-100 °C).
- Desconocimiento de la tecnología a nivel industrial (alta temperatura).
- No existe una metodología de trabajo aplicable a las fases del desarrollo y estudio económico.
- Disponibilidad limitada de componentes.

Amenazas

- Solide de las tecnologías habituales de generación de vapor (calderas de gas) por su coste actual y asentamiento en el mercado.

Fortalezas

- Bajo consumo de energía final (compresor).
- Bajos costes de mantenimiento.
- Payback entre 3-4 años.

Oportunidades

- Capacidad de generación de vapor de baja presión.
- Abundancia de corrientes de baja temperatura en el ámbito industrial (<100 °C).

Tabla 1. Análisis DAFO de las bombas de calor de alta temperatura.

14- Factores de emisión: registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbón. MITECO (Junio 2020. Versión 15).
15- https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/medio-ambiente/gestion-medioambiental/emisiones-directas

Entre los retos que se marcan reside, en primer lugar, la concienciación del sector industrial para revalorizar el calor de baja temperatura (30-100 °C), considerado de "baja calidad", para asociar la eficiencia energética con competitividad. Además, se debe promover la diseminación de la tecnología para mostrar sus capacidades asociadas a la producción, como es la capacidad de generar vapor de baja presión para uso en los procesos, y apoyar las iniciativas I+D+i para poder llegar a TRL altos y equipos comerciales.

2.2 Transformadores de calor por absorción (AHT)

Descripción

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 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 < 120 °C, ampliamente disponibles en la industria energéticamente intensiva, como es el caso de la química (procesos de destilación, purificación), papelera (procesos de secado y laminado) y alimentaria (procesos de secado, esterilización y fermentación).

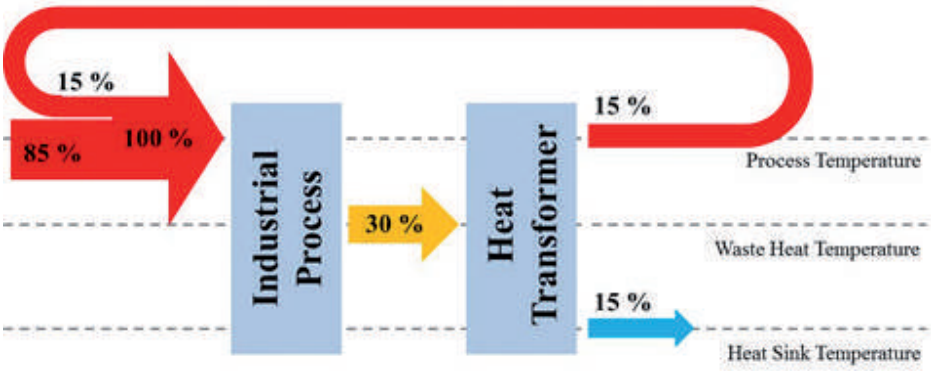


Figura 4. Esquema de revalorización de calor en un AHT. Fuente: Tecnalia

La operación del AHT es similar a la del ciclo de refrigeración por absorción, pero, en este caso, trabajando a la inversa. Los componentes principales del AHT son: evaporador y absorbedor, trabajando a alta presión (~ 100 kPa en condiciones de operación típicas); y condensador y generador, trabajando a baja presión (~ 10 kPa en condiciones de operación típicas). En este caso, la corriente de calor residual es la encargada de separar el refrigerante (agua) del absorbente (solución de LiBr-H_2O) en el propio generador. 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 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, en definitiva, una tecnología que permite recuperar y revalorizar parte del calor residual de baja entalpía, teniendo un consumo asociado despreciable, por lo que permite reducir las emisiones de CO_2 en procesos industriales. El AHT es una tecnología versátil y aplicable a un amplio intervalo de potencias.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

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 Industri3s, liderado por Tecnalia Research & Innovation, se ha llevado a cabo un demostrador de 200kW 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, Misiones-CDTI y europeas H2020; SPIRE; HORIZONTE EUROPA.

Para llevar a cabo la impulsión de esta tecnología se debería aumentar la potencia hasta 1 MW de calor revalorizado e incrementar la diseminación de la tecnología en el entorno de los sectores señalados (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 / Farmacéutica: Procesos de destilación y purificación, 100-140 °C.
- Industria Alimentaria: Procesos de secado, esterilización, fermentación, 60-100 °C.

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.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

En lo que se refiere a los beneficios 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 t de CO_2, lo que supone unos 60 kg CO_2/€ 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 CO_2/GJ[16]).

Análisis DAFO

En la tabla 2, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

La fortaleza de esta tecnología reside en la valorización de corrientes residuales abundantes en la industria energéticamente intensiva y que, en la actualidad no son valorizadas por su "baja temperatura" (<100 °C). Además, son equipos que se activan térmicamente, es decir, no existe consumo de energía final para su operación y los costes de mantenimiento podrían considerarse bajos, entorno al 2% de la inversión total.

Debilidades

- Desconocimiento de la tecnología a nivel industrial.
- Es preciso desarrollo tecnológico a nivel europeo.

Amenazas

- Las tecnologías con las que compite están implantadas a nivel europeo.

Fortalezas

- Muy bajo consumo de energía final (activación con calor residual)
- Bajos costes de operación y mantenimiento.
- Periodos de retorno de la inversión < 6años.
- Tecnología probada y operando a nivel comercial en Asia.

Oportunidades

- Valorización de corrientes de baja temperatura (< 100 °C), las cuales son abundantes en la industria energéticamente intensiva.
- Posibilidad de aplicación en redes de distrito.

Tabla 2. Análisis DAFO de los transformadores de calor por absorción (AHT)

16- Factores de emisión: registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbón. MITECO (Junio 2020. Versión 15).
17- Recovery and Transport of IndustrialWaste Heat for Their Use in Urban District Heating and Cooling Networks Using Absorption Systems. Antonio Atienza-Márquez , Joan Carles Bruno * and Alberto Coronas CREVER—Group of Applied Thermal Engineering, Mechanical Engineering Dept., Universitat Rovira i Virgili.

Cabe destacar que este tipo de equipo, además, puede hacer realidad la sinergia industria-ciudad de cara a la producción de calor para redes de distrito tal y como se está planteando actualmente en China[17].

Los períodos de retorno de la inversión son aceptables para el entorno industrial (<6 años), aunque se pretende llegar a paybacks inferiores a los 3 años.

Los principales retos planteados con esta tecnología son:

- Concienciación del sector industrial para revalorizar el calor de baja temperatura (<120 °C), considerado de "baja calidad", para asociar la eficiencia energética y la competitividad.

- Conseguir períodos de retorno < 3años. En la actualidad se sitúan en torno a los 4-5 años.

- Posibilidad de aplicación en redes de distrito existentes.

Las principales barreras con las que se encuentra esta tecnología es que no ha sido testeado a escala industrial nacional, por lo que puede haber dificultades técnicas, y la necesidad de espacio, muchas veces escaso en industrias de largo recorrido como la química, petroquímica y farmacéutica.

2.3 Separación mediante tecnología de membranas

Descripción

Las membranas son materiales barrera que sirven para separar compuestos de manera selectiva mediante un gradiente (de presión, concentración, etc.) entre un lado y el otro de la membrana. De esta manera, en los procesos de separación mediante la tecnología, se consigue que un componente "A" de una mezcla permee más rápido que el resto, obteniendo dos corrientes a la salida del sistema, una enriquecida en dicho componente "A" y otra empobrecida en dicho componente a través de la membrana. En la Figura 5 se puede observar un ejemplo de módulo de membrana donde se alimenta aire a la entrada. En este caso, el oxígeno, el CO_2 y el vapor de agua permean más rápidamente que el nitrógeno, obteniendo una corriente enriquecida en dichos componentes denominada "permeado", y una empobrecida en dichos compuestos (y por lo tanto enriquecida en nitrógeno) denominada "retenido".

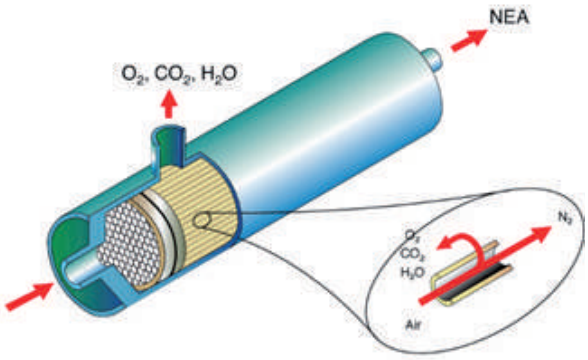


Figura 5. Módulo de una membrana de fibra hueca. Fuente: MEDALTM, Air Liquide.

Dado que los procesos de membranas son prácticas instauradas a nivel industrial sobre las cuales se tiene amplio conocimiento, la diversificación en sus usos, sobre todo a través de la concesión de propiedades selectivas, es lo que les confiere un gran potencial para optimizar la eficiencia de los procesos industriales en los cuales se implementen.

Los procesos de separación por membranas han alcanzado niveles de eficiencia energética muy altos, y un estudio reciente del Grupo Elimelech de la Universidad de Yale en Estados Unidos, ha revelado que las áreas a abordar para mejorar la eficiencia energética de los procesos por membranas residen, por un lado, en el grado de selectividad ofrecido por la membrana, que elimina la necesidad de realizar otras operaciones de purificación posteriores que requieren consumos energéticos considerables, y, por otro, en las operaciones de ingeniería conjunta que optimizan el uso de los recursos[18].

Esto representa un cambio de paradigma en la búsqueda de nuevos materiales de mejora de rendimiento, puesto que el foco deja de estar centrado en la mejora de la permeabilidad para un mismo gradiente de separación, y pasa a estar centrado en la selectividad hacia ciertos componentes.

Las membranas pueden utilizarse para tratar prácticamente cualquier tipo de fluido. Por ejemplo: la industria química utiliza grandes cantidades de agua, ya sea como solvente, fluido de intercambio de calor, o fluido de transporte[19], por lo que muchas de las soluciones presentadas se focalizan en disoluciones acuosas, aunque son aplicables a un amplio espectro de fluidos, ya sean gaseosos o mezclas de compuestos orgánicos.

En la industria química las principales aplicaciones de las membranas son:

• Acondicionamiento de agua de proceso.

Las aplicaciones de pretratamiento consisten en reducir el paso de ciertos iones, maximizando el de agua. Puesto que el agua que ingresa a la planta suele tener una concentración mayor de especies disueltas de diversa índole, las membranas suelen ser susceptibles al ensuciamiento o *"fouling"*, conducente a la pérdida de eficiencia del proceso y el desgaste de las membranas. Típicamente, las grandes industrias cuentan con instalaciones de ósmosis inversa, en donde las membranas son películas delgadas compuestas (*"Thin Film Composites"*, TFC) que cuentan con una capa activa depositada sobre un soporte. En aquellos casos en donde el agua de ingreso a planta no provenga de la red (por ejemplo, agua de mar), operaciones como la ultra y microfiltración son comunes como pretratamiento.

• Recuperación de compuestos valiosos y separación de otros indeseados de corrientes.

La permeabilidad de las membranas hacia ciertos compuestos viene determinada por un parámetro conocido como *Molecular Weight Cut-Off* (MWCO), el cual determina el peso molecular a partir del que el 90% de las especies disueltas será rechazado. La operación más típica y sencilla en cuanto a separación de especies iónicas es la nanofiltración, operación que tiene gran selectividad hacia iones divalentes, teniendo un rechazo considerablemente menor de iones monovalentes. A su vez, ha ganado un fuerte predominio en este campo, la implementación de técnicas que emplean un campo eléctrico de corriente continua en conjunción con membranas de intercambio catiónico o aniónico las cuales se conoce aumentan la eficiencia de la separación, como la electrodiálisis y la desalinización capacitiva o elec-

18- S. K. Patel et al., "The relative insignificance of advanced materials in enhancing the energy efficiency of desalination technologies," Energy & Environmental Science, vol. 13, no. 6, pp. 1694–1710, 2020, doi: 10.1039/D0EE00341G.
19- N. Groot, "E4water: Water challenges for the chemical industry," p. 32.

trodeionización (CDI, por sus siglas en inglés). A su vez, las técnicas biomiméticas mediante la implementación de Aquaporins, han sido aplicadas ampliamente en los últimos años como metodologías de purificación.

• Tratamiento de efluentes gaseosos y/o líquidos.

Las prácticas de descarga "cero efluentes líquidos" (*zero-liquid discharge*, "ZLD") supone requerimientos cada vez más exigentes hacia los procesos de tratamiento de efluentes industriales. Técnicas como la ósmosis directa o la ósmosis por presión retardada, son métodos emergentes en esta área sobre todo por su versatilidad. Las técnicas electroquímicas también pueden ser incluidas dentro de este campo puesto que es de especial interés el manejo de metales pesados y otros compuestos altamente tóxicos en los efluentes industriales.

Por último, los avances en las tecnologías de membranas son cada vez más predominantes en el ámbito de tratamiento de efluentes gaseosos, existiendo actualmente membranas funcionalizadas para la captura de CO_2 y purificación de H_2. El empleo de la tecnologías de membranas es también una práctica habitual en la producción de sosa y de potasa.

El empleo de la tecnologías de membranas es también una práctica habitual en la producción de sosa y de potasa.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

• Producción/purificación de hidrógeno

Actualmente, el 95% de la producción de hidrógeno se lleva a cabo mediante el reformado de combustibles fósiles (fundamentalmente gas natural, aunque también pueden procesarse GLP o naftas). Principalmente, se realiza mediante el proceso de reformado de gas natural con vapor (SMR, steam methane reforming). Se trata de un proceso termoquímico endotérmico que convierte el metano y el vapor de agua en hidrógeno. El proceso completo produce hidrógeno de alta pureza apto para su consumo: además de la etapa de reformado, donde se genera un gas de síntesis, este proceso también consta de etapas de water gas shift para convertir el CO y agua en más hidrógeno y CO_2, y una etapa final de purificación de hidrógeno.

Figura 6. Membranas de fibra hueca (arriba) y módulos de membrana (abajo). Fuente: TECNALIA.

Las tecnologías de purificación de hidrógeno empleadas a escala industrial suelen ser el *Pressure Swing Adsorption* y la destilación criogénica. Se prevé la ne-

cesidad de acoplar tecnologías de captura y valorización de CO_2 para que la huella de carbono de esta generación de hidrógeno sea la menor posible.

Por otro lado, en los últimos años se ha desarrollado la tecnología de reactor de membrana para generación distribuida de hidrógeno de alta pureza. Es el caso del desarrollo realizado entre Tecnalia y la Universidad Técnica de Eindhoven, que actualmente se está comercializando a través de H2SITE, *"start-up"* promovida por ambas entidades. En este tipo de reactores, las etapas de reacción mencionadas arriba (reformado, *water gas shift*), y la etapa de purificación con membranas, se integran en una única etapa. De esta manera, se pueden obtener conversiones similares al proceso convencional de reformado, pero a temperaturas mucho más bajas (por debajo de 600 °C). Esta tecnología se puede utilizar para producir hidrógeno a partir de gas natural o también de otras fuentes como bioetanol, biogás, amoniaco, etc. En la Figura 7 se muestra el esquema de un reactor de membrana que se alimenta con

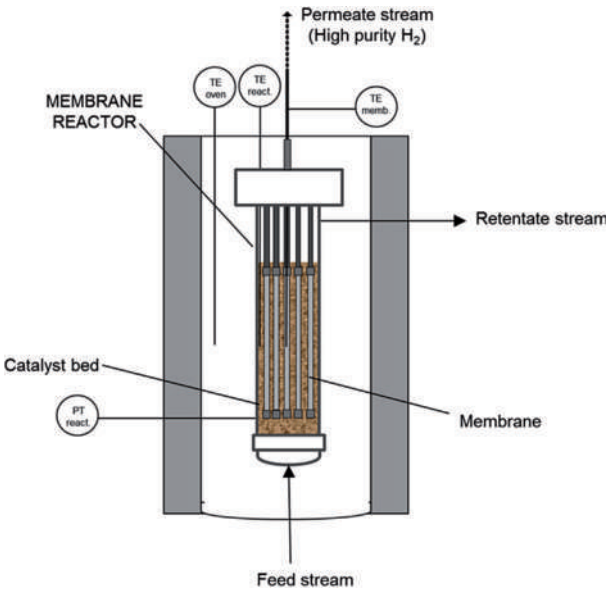


Figura 7. Esquema de un reactor de membrana para producción de H2 de alta pureza. . Fuente: Palladium based membranes and membrane reactors for hydrogen production and purification: An overview of research activities at Tecnalia and TU/e. Elsevier, 2017.

metano (o gas natural) y en la que se obtiene una corriente de hidrógeno de alta pureza que permea a través de las membranas tubulares (normalmente se utilizan las membranas base Pd) y otra corriente con alto contenido en CO_2. Esta última corriente concentrada en CO_2 podría cumplir con los requerimientos para su posterior valorización/utilización o secuestro.

• Captura de CO_2

Actualmente hay tres estrategias principales para captura de CO_2: precombustión, postcombustión y oxicombustión:

Precombustión:
La captura en precombustión tiene relación con el proceso descrito en el punto anterior, donde un combustible es reformado/gasificado/etc. con lo que se convierte a un gas de síntesis, y entonces se emplean tecnologías de separación para capturar el CO_2. La tecnología de separación más empleada son los solventes físicos. Por ejemplo, el proceso Rectisol es uno de los procesos más utilizados donde se utiliza metanol refrigerado y por ello tiene un consumo energético alto. Si esta separación se pudiera hacer a mayor temperatura sería un proceso con un consumo energético menor.

Postcombustión:
En la captura en postcombustión el CO_2 es separado de una corriente rica en N_2 producida a partir de un proceso de combustión. La tecnología de referencia es la de los solventes basados en aminas. Se están estudiando otros solventes, pero tienen una limitación de requerimiento energético para la regeneración del solvente.

Todos estos conceptos se encuentran hoy en día en un nivel relativamente avanzado de desarrollo para los procesos de separación de referencia, es decir, los disolventes físicos para precombustión y los sol-

ventes basados en aminas para postcombustión.

En la actualidad se encuentran en funcionamiento plantas piloto a escala de 1 a 50 MW para estos sistemas, y están previstas instalaciones de demostración a escala de cientos de megawatiosen los próximos años. Un aspecto importante de las centrales eléctricas con captura de CO_2 es el consumo de energía requerido por los procesos de separación necesarios para lograr bajas emisiones de carbono (por ejemplo, calor para la regeneración de solventes en tecnologías de pre y post combustión). Este requerimiento de energía es la razón principal de la reducción de la eficiencia neta general de la generación de energía, siendo las penalizaciones por eficiencia neta promedio para la captura de postcombustión del 10% en relación con una central térmica de carbón sin captura, y 8% para captura de precombustión en comparación con un IGCC sin captura. Por esta razón existe un gran número de actividades de investigación en curso para reducir el consumo total de energía del proceso, tanto mediante un diseño mejorado de sistemas de separación convencionales, como mediante el desarrollo de tecnologías innovadoras (por ejemplo, disolventes avanzados, membranas, absorbentes sólidos), con un menor impacto esperado en la eficiencia de la planta y el coste de los equipos. Las principales tecnologías de separación de CO_2 son absorción, adsorción (PSA y TSA), membranas y destilación criogénica. La absorción es la tecnología de separación de CO_2 más madura, pero se necesita una cantidad de energía significativa para regenerar el solvente y también existen problemas ambientales relacionados con la degradación del solvente. Las membranas tienen potencial para competir con tecnologías basadas en solventes debido a su compacidad, modularidad, facilidad de instalación, flexibilidad de operación y menor coste y consumo de energía. Las membranas poliméricas son las más utilizadas comercialmente, pero tienen algunas limitaciones (por ejemplo, temperatura, estabilidad ante determinados contaminantes). En ese sentido, se están desarrollando tipos de membranas más innovadores como las de membranas de matriz mixta (mixed matrix membranes) donde se tiene una matriz polimérica con partículas inorgánicas (zeolitas, MOFs, etc.) para poder realizar la captura de CO_2 en condiciones mejoradas y más eficientes.

Sector farmacéutico

La tecnología de membranas está en auge en la economía de generación de productos farmacéuticos. Dicha tecnología puede servir para varias separaciones de la Industria farmacéutica como son, la purificación de productos, tratamiento de aguas, recuperación de solventes, etc.

En cuanto a los tipos de separación, se suelen emplear membranas para nanofiltración, ultrafiltración, microfiltración, pervaporación, osmosis inversa, etc.

Esta tecnología se suele emplear para concentrar productos y también realizar post-tratamientos de aguas residuales generadas en los procesos.

Algunos proyectos destacados en la temática se listan a continuación:

Proyecto ARENHA: Advanced materials and Reactors for ENergy storage tHrough Ammonia. Proyecto financiado dentro del programa marco H2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 862482. https://arenha.eu/

Proyecto MACBETH: Membrane and Catalysts beyond economic and Technological Hurdles. Proyecto financiado dentro del programa marco H2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 869896. https://www.macbeth-project.eu/

Proyecto MEMBER: Advanced MEMBranes and

membrane assisted processes for pre- and post-combustion CO_2 captuRe.
https://member-co2.com/

Proyecto BIONICO: Biogas membrane reformer for decentralized H_2 production. Proyecto financiado dentro del programa marco Fuel Cells and Hydrogen 2 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 671459. http://www.bionicoproject.eu/

Proyecto HYGRID: Hydrogen Recovery from Natural Gas Grids. Proyecto financiado dentro del programa marco Fuel Cells and Hydrogen 2 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 700355.
https://www.hygrid-h2.eu/

Proyecto FLUIDCELL: Proyecto financiado dentro del programa marco Fuel Cells and Hydrogen 2 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 621196.
https://www.fluidcell.eu/

Proyecto C2FUEL: Carbon Captured Fuel and Energy Carriers for an Intensified Steel Off-Gases based Electricity Generation in a Smarter Industrial Ecosystem. Proyecto financiado dentro del programa marco H2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 838014.
https://cordis.europa.eu/project/id/838014

Proyecto M4CO2: Energy efficient MOF-based Mixed Matrix Membranes for CO_2 Capture. Proyecto financiado dentro del programa marco FP7 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 608490.
https://cordis.europa.eu/project/id/608490

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

La tecnología de reactor de membrana se presenta como prometedora para generación de hidrógeno distribuido a un coste reducido y con mayor eficiencia. Por poner un ejemplo, en el proyecto europeo BIONICO[20] de generación de hidrógeno de alta pureza a partir de biogás mediante esta tecnología, el modelado del proceso determinó que la conversión de biogás a hidrógeno podría ser de hasta el 72%, más de un 10% mayor que la tecnología disponible comercialmente. Además, se determinó que dicha tecnología es un sistema flexible para producir H_2 de alta pureza a partir de diferentes composiciones de biogás (de vertedero o de digestión anaerobia). Por otro lado, la evaluación tecno-económica determinó que la reducción potencial de coste de esta tecnología frente a las tecnologías comerciales sería de 5-7%.

Más allá, se espera que las tecnologías de captura de CO_2 tengan un papel relevante en la descarbonización de la industria, teniendo en cuenta el objetivo de la Unión Europea para 2050 de tener emisiones neutras de carbono. En este sentido, en el proyecto europeo MEMBER[21] sobre captura de CO_2 con tecnología de membranas se ha definido como objetivo un coste de la captura de CO_2 <30 €/t CO_2 en precombustión en centrales térmicas y <40 €/ton en postcombustión en centrales térmicas.

Análisis DAFO

En la tabla 3, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

La fortaleza de esta tecnología reside en la separación eficiente y competitiva de corrientes en comparación con tecnologías comerciales o más implementadas en la industria.

Además, la tecnología de membranas puede servir para dar solución a varias industrias. Aunque en esta sección se dirige al sector químico-petroquímico y al sector farmacéutico, serviría para otro tipo de industrias también.

La tecnología de reactores de membranas se prevé

20- http://www.bionicoproject.eu/
21- https://member-co2.com/

Debilidades	Amenazas
• Tecnología no testada a escala industrial nacional.	• Hay tecnología comercial de generación de H2 (H2 azul).
Fortalezas	**Oportunidades**
• Separación eficiente y competitiva de los compuestos de valor. • Aplicable a numerosos sectores, aparte del químico y farmacéutico. • En el caso del H2, generación de H2 in-situ.	• H2: generación de H2 verde. • CO2: políticas de descarbonización del sector industrial.

Tabla 3. Análisis DAFO de la separación mediante membranas.

como una tecnología prometedora de generación de hidrógeno distribuida. Actualmente esta tecnología podría estar en un TRL 5-6. Esta generación de hidrógeno podría ser in-situ en las industrias que necesiten hidrógeno como combustible para sustituir el uso de combustibles fósiles (reducción de emisiones de CO_2) o también como materia prima. Por otro lado, se prevé que, en un futuro próximo el hidrógeno se transporte y distribuya a través de las redes de gas natural hasta el punto de uso. Se prevén dos escenarios de transporte-distribución de hidrógeno: hidrógeno mezclado con gas natural hasta un porcentaje, e hidrógeno puro. En el caso del hidrógeno mezclado con gas natural, se prevé la necesidad de extraer el hidrógeno de la mezcla en el punto de uso, y en ese sentido, la tecnología de membranas se vislumbra como prometedora cuando el contenido de hidrógeno no es muy alto.

Las principales barreras con las que se encuentra esta tecnología de membranas avanzada es que no ha sido testeada a escala industrial nacional, por lo que puede haber dificultades técnicas (por ejemplo, estabilidad) que habría que solventar para implementar esta tecnología en las industrias química, petroquímica y farmacéutica.

2.4 Reducción del porcentaje de clínker en el cemento

Descripción

En torno al 5% de las emisiones mundiales del CO_2 de origen antropogénico son debidas a la industria del cemento, teniendo dichas emisiones un doble origen. Por un lado, cerca del 60 % de las emisiones son causadas durante la etapa de descarbonatación de la materia prima principal (caliza), denominadas como emisiones de proceso. El otro 40% de las emisiones proviene de los combustibles necesarios para elevar la temperatura al rango necesario para que se produzca el proceso de descarbonatación mencionado y al resto de las reacciones que componen la "clinkerización". En este contexto, la formulación de nuevos tipos de cemento con menor contenido en clínker, es una de las estrategias a seguir para reducir significativamente las emisiones de CO_2 y la energía consumida en forma de combustible.

La mayoría de los tipos de cemento están compuestos principalmente por el clinker y yeso, junto con otros componentes minerales que presentan propiedades hidráulicas similares al clinker cuando se muelen y mezclan con el resto de los componentes. Entre estas materias primas, destacan particularmente las escorias de los altos hornos de la industria del hierro o acero, las cenizas volantes procedentes de las centrales eléctricas de carbón y los materiales volcánicos naturales (puzolanas). Estos materiales (llamados adiciones) pueden ser usados para sustituir parcialmente el clínker del cemento, reduciendo así los volúmenes utilizados y también las emisiones de CO_2 asociadas a su producción.

La decreciente actividad de las centrales térmicas de carbón, principales suministradoras de adiciones para el cemento, hace necesario buscar alternativas. Las cenizas volantes constituyen típicamente el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a cenizas de fondo o escorias, que son depositadas en las escombreras de las centrales térmicas. La principal diferencia con respecto a las cenizas volantes es el tamaño de las partículas y por tanto su método de separación en la central, pero es importante destacar que estas escorias ya han sido sometidas a una activación térmica que las hace activas hidráulicamente. Por tanto, se considera que pueden ser potencialmente aprovechables como adiciones para sustituir parcialmente el clínker del cemento, de manera análoga a las cenizas volantes. La medida consiste en extrapolar las actividades de explotación minera a las escombreras de cenizas de fondo de las centrales térmicas.

En cuanto a costes, se considera un coste de extracción de 4-5 €/t, similar al de las materias primas convencionales, al que habría que añadir un coste, aún por determinar, para su pretratamiento[22] (a priori, solo molturación, ya que están activadas térmicamente).

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Se trata de un concepto que se encuentra en un nivel de desarrollo correspondiente a TRL 1-2, sobre el que no se conocen iniciativas precursoras, ya que se están comenzando a perfilar en el momento de redacción de este documento. En torno al año 2027-2028 podrían ejecutarse proyectos demostradores a TRL 7-8, abriendo paso a una posible implementación comercial a partir del 2030.
Se trata, además, de una innovación que puede des-

22- Datos estimados por OFICEMEN pendientes de validación experimental.

arrollarse íntegramente a nivel nacional, iniciándose con la toma de muestras homogéneas en las escombreras, mediante maquinaria de sondeo empleada en la industria minera y su posterior análisis químico y mineralógico. En un siguiente paso, es precisa una molienda y adecuación del material, y el uso de laboratorios con capacidad para tratar materiales hasta temperaturas de 1.000 °C, para lograr la activación hidráulica. Finalmente, es necesario un análisis químico y mineralógico del material final, antes de ser calificado como apto para su uso en sustitución de las cenizas volantes.

Toda esta infraestructura de I+D está disponible a nivel nacional entre laboratorios de grupos cementeros como CEMEX, Universidades como la Politécnica de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

La viabilidad económica de este nuevo tipo de aprovechamiento viene determinada por el coste de la tonelada de CO_2, prevista en 34,7 €/t para 2030[23]. Considerando un dato estándar de 0,8 t CO_2 emitidas/t clínker[24], que se estima podría reducirse hasta las 0,2 t CO_2 emitidas/t clínker utilizando estas nuevas adiciones, deja un margen de 0,6 t CO_2 ahorradas/t y por tanto de 21 €/t de escorias utilizadas. Además, desde el punto de vista energético, se evita el consumo asociado a la producción del clínker en el horno, que se encuentra entre 3.350 MJ/t clínker (escenario eficiente en 2020) y 3.200 MJ/t clínker (escenario eficiente en 2050)[25].

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

El sector cementero español, en colaboración con el Ministerio de Industria, Energía y Turismo ("MINETUR") ha elaborado el "Plan CRECIMENTA 2030", en el que se fija un objetivo de 30 millones de toneladas anuales de producción de cemento equivalente en España en el año 2030[26]. Asumiendo una potencial sustitución del 5% de dicha cantidad por adiciones procedentes de las cenizas de fondo o escorias de centrales térmicas, podrían utilizarse del orden de los 1,5 millones de toneladas anuales.

En términos meramente energéticos, teniendo en cuenta un consumo necesario para la fabricación del clínker de 0,078 tep/t clínker (promedio entre los escenarios 2020 y 2050), y sin tener en cuenta el consumo energético que podría ser necesario para el pretratamiento de las escorias, ya que aún es desconocido, el potencial ahorro anual en un escenario hipotético de completo despliegue, ascendería a 117 ktep/año.

Respecto a las emisiones de CO_2 evitadas, es necesario considerar tanto las emisiones evitadas en la descarbonatación de la caliza, como las emisiones derivadas del consumo de combustibles en dicho proceso. Para las primeras, se estima una reducción de 0,6 t CO_2/t de escorias utilizadas y para las segundas, se utiliza el factor de paso para el cálculo de emisiones de 97,5 tCO_2/TJ[27] correspondiente al coque de petróleo, puesto que supone más del 90%[28] del consumo de combustibles en cementeras en España. Con esto, las emisiones de CO_2 evitadas durante la clinkerización ascenderían a 900.000 tCO_2/año y las evitadas debido al uso de combustibles en dicho proceso podrían ascender a 478.968 t CO_2/año.

23- PNIEC
24- Datos estimados por OFICEMEN pendientes de validación experimental.
25- OFICEMEN. Hoja de Ruta de la industria española del cemento para la reducción de emisiones de carbono a 2050.
26- Informe base de "CRECIMENTA 2030": propuesta de reactivación industrial de OFICEMEN al Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
27- Factores de emisión: registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbón. MITECO (Junio 2020. Versión 15).
28- Fundación CEMA. Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España (2017).

Análisis DAFO

En la tabla 4, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

Como principales amenazas a considerar, podría destacarse que el margen en el uso de las adiciones está limitado por la normalización armonizada del cemento, EN 197-1, que recoge los tipos de cemento comunes según sus constituyentes principales. Dicha normalización armonizada debe admitir el uso de estas nuevas adiciones, puesto que actualmente las únicas adiciones permitidas son las escorias de horno alto, las puzolanas naturales y las cenizas volantes silíceas . También la compleja y en ocasiones restrictiva, aunque fundamental, legislación medioambiental en materia de residuos puede suponer una barrera o un freno a posibles proyectos demostradores.

La principal debilidad que presenta esta tecnología es que permitirá el aprovechamiento de un recurso finito, aunque abundante, que puede encontrarse en diferente estado dependiendo de la práctica de la central térmica en concreto.

El hecho de que el aprovechamiento de estos materiales no requiera, a priori, de equipamiento y procesos diferentes a los ya utilizados en el sector, tanto para su extracción como para su pretratamiento antes de ser utilizado como adiciones, es una importante fortaleza que puede contribuir a su despliegue. Además, se trata de un aprovechamiento de residuos/recursos autóctonos, en el que todas las partes implicadas están manifiestamente interesadas, y en línea con el objetivo de descarbonización del sector. También para las energéticas es una ventaja, al disminuir los costes de restauración ambiental de las escombreras.

La relación directa de esta medida con el concepto de Economía Circular y el claro apoyo por parte de distintos organismos, tanto nacionales como internacionales, al desarrollo de innovaciones en este sentido, supone una clara oportunidad para una exitosa implementación masiva.

Debilidades

- Recurso finito.
- Variabilidad del estado de las cenizas dependiendo de la escombrera.
- Presencia de inquemados.
- Residuos mezclados en las escombreras.

Amenazas

- Uso de adiciones limitado por EN 197-1.
- Complejidad de la legislación en materia de residuos.

Fortalezas

- Procesos necesarios conocidos.
- Aprovechamiento recurso autóctono.
- Alineado con la economía circular.
- Desarrollo posible completamente nacional.

Oportunidades

- Creciente apoyo a iniciativas de economía circular.
- Descarbonización del sector, objetivo de la industria cementera.
- Mitigación del coste de la restauración ambiental de las escombreras para las energéticas.

Tabla 4. Análisis DAFO de la reducción de clínker en el cemento.

2.5 Nuevas tecnologías para pasteurización/ esterilización de alimentos

Descripción

El procesado térmico para la conservación de alimentos (pasteurización y esterilización) es un paso necesario para inactivar microorganismos patógenos, así como las enzimas que pudieran comprometer su calidad y seguridad. Estos procesos son intensivos en el consumo de vapor y representan un porcentaje elevado del consumo de energía total en muchas plantas del sector. Desafortunadamente, las intensidades de tratamiento, tiempo y temperatura de proceso también son proporcionales a la cantidad de pérdida de nutrientes, desarrollo de sabores indeseables y deterioro de las propiedades funcionales de los alimentos.

El uso de ultrasonidos (US) se basa en unos sistemas de generación de frecuencias acústicas inaudibles, también conocidas como ondas de presión, por encima de los 20kHz. En el caso de tratamiento térmico de alimentos, se utilizan frecuencias bajas, también conocidas como ultrasonidos de alta potencia (entre los 20 y 100 kHz). En combinación con calor, los ultrasonidos pueden acelerar la tasa de esterilización de los alimentos, disminuyendo así tanto la duración como la intensidad del tratamiento térmico y el daño resultante[30]. Las ventajas de la esterilización por ultrasonidos respecto al calor incluyen: la minimización de la pérdida de sabor, mayor homogeneidad y ahorros de energía significativos.

Con las frecuencias utilizadas, ocurre un fenómeno físico conocido como cavitación: un efecto hidrodinámico que se produce cuando se crean burbujas de vapor dentro de un líquido en el que actúan fuerzas que responden a diferencias de presión y temperatura. Este fenómeno ocurre en regiones bajo ondas de presión de alta amplitud que se alternan rápidamente y consiste en el crecimiento y colapso de burbujas de gas dentro de un medio líquido. El vapor o las burbujas de gas se crean por el cambio de la distancia promedio entre moléculas y la disminución de la presión. Las burbujas crecen en áreas de baja presión, colapsando violentamente al pasar a áreas de alta presión y produciendo temperaturas cercanas a 4.727 °C, así como presiones superiores a 1.000 atm[31] debido a la liberación de energía almacenada durante la expansión. Sin embargo, el calor producido por la implosión de las burbujas se disipa instantáneamente, por lo que no hay un aumento sustancial de temperatura en el medio. Cuando la intensidad aumenta, el tamaño de las burbujas también aumenta y, por lo tanto, la energía liberada durante el colapso[32].

El mecanismo de muerte microbiana se debe principalmente al adelgazamiento de las membranas celulares, al calentamiento localizado y a la producción de radicales libres[33]. Durante la emisión de US se lleva a cabo una polarización de las moléculas, afectando principalmente a la membrana celular. Con

30- Gallo, M., Ferrara, L., & Naviglio, D. (2018). Application of ultrasound in food science and technology: A perspective. Foods, 7(10), 164.
31- 101,3 MPa.
32- Carrillo-López, L. M., Alarcon-Rojo, A. D., Luna-Rodríguez, L., & Reyes-Villagrana, R. (2017). Modification of food systems by ultrasound. Journal of Food Quality.
33- Chemat, F., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. Ultrasonics sonochemistry, 18(4), 813-835.

ello se consigue inactivar las células bacterianas, principal objetivo del uso de esta técnica. Además, la circulación de la onda en un medio líquido provoca zonas alternas de compresión y expansión, produciendo la cavitación y la consecuente formación de burbujas en el medio. En las zonas de expansión, las burbujas aumentan su superficie, difunden el gas, hasta un momento en que es imposible retener la presión de vapor de la burbuja por la energía aplicada y las burbujas colapsan al condensar el vapor rápidamente; esto conlleva a una colisión de moléculas y ondas de choque, que a su vez aumentan la presión y la temperatura. De este modo se consigue destruir ciertas bacterias (más difícil en el caso de bacterias esporuladas), si bien, la formación de radicales libres durante la cavitación, se cree que altera el ADN y por tanto la viabilidad bacteriana.

Los US pueden incrementar la productividad de una planta de procesado al acortar los ciclos productivos, ya que se produce una transferencia térmica más rápida, que puede reducir hasta un 30% del tiempo preciso, suponiendo un ahorro energético y un aumento de la productividad, al permitir incrementar el número de ciclos de tratamiento a lo largo del día.

Estas cualidades hacen del uso de US una tecnología interesante en determinadas etapas de producción de alimentos como en escaldados, cocciones, además de en los sistemas de pasteurización o esterilización. Cabe mencionar que el uso para esterilización de productos en envase metálico no sería adecuado en este caso, por el efecto negativo de los US sobre este material.

Finalmente, es una tecnología económica e inocua, con un bajo consumo energético, que no aporta contaminación al agua de tratamiento ni genera sustancias tóxicas en el alimento, y que puede ser utilizada tanto para alimentos sólidos como líquidos[34],[35]. Además, destaca por su versatilidad, ya que los desarrollos en los que se trabaja actualmente persiguen no requerir una sustitución total de las líneas de tratamiento térmico existentes, sino que el objetivo es añadir y adaptar los equipos de ultrasonidos a los ya existentes, mejorando el consumo energético del conjunto.

En términos de coste energético, por ejemplo, en una planta de producción de atún en conserva media, en las balsinas de cocción con agua donde el calentamiento de la misma se realiza con vapor con serpentín de intercambio, el uso tradicional para una cocción de atún de 3-4 kg/u puede suponer un coste total de producto de 2.700 €/t/ciclo, mientras que adaptando un sistema de US el coste medio pasaría a ser de 2.250 €/t/ciclo, lográndose por tanto un ahorro del 17%[36].

Por otro lado, la aplicación de la inducción en el tratamiento térmico de alimentos resulta también una tecnología prometedora por la reducción de tiempos y consumos energéticos, así como por su flexibilidad y posibilidad de adaptación a determinadas instalaciones existentes. Además, es aplicable a otros procesos térmicos no destinados a la conservación (cocción, escaldado, etc.). A modo de ejemplo, en un prototipo desarrollado para la esterilización de alimentos enlatados, el ahorro energético proviene de un nulo consumo de vapor y de agua, mientras que en un autoclave convencional el consumo se sitúa en 4,5 kg vapor/lata y 1,25 l agua/lata. El consumo eléctrico de la inducción producido en este caso de aplicación es aproximadamente igual al consumo de un autoclave convencional, de 49 Wh, obteniéndose por tanto un ahorro energético neto al prescindir completamente del consumo de vapor y agua[37].

34- Kang, D., Zhang, W., Lorenzo, J. M., & Chen, X. (2020). Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1-20.
35- Monteiro, S. H., Silva, E. K., Alvarenga, V. O., Moraes, J., Freitas, M. Q., Silva, M. C., ... & Cruz, A. G. (2018). Effects of ultrasound energy density on the non-thermal pasteurization of chocolate milk beverage. Ultrasonics Sonochemistry, 42, 1-10.
36- Datos proporcionados por ANFACO-CECOPESCA.

Al margen de nuevas tecnologías de tratamiento térmico de alimentos, como el uso de ultrasonidos o de la inducción electromagnética, los nuevos desarrollos destinados a mejorar los procesos convencionales de generación, transporte y utilización del vapor son muy demandados por la industria de alimentación y bebidas[38].

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Existen multitud de centros trabajando en la conservación de alimentos, aunque solo algunos de ellos desarrollando nuevas soluciones en ultrasonidos e inducción a nivel nacional y disponiendo de instalaciones experimentales a escala de laboratorio (TRL4). Destaca en el campo de los ultrasonidos ANFACO-CECOPESCA, que dispone de una larga trayectoria en estas tecnologías, que se materializan en 4 patentes de aplicación de US para esterilización (ES 2 569 542 B1), cocción (ES 2 569 416 A1), congelación (ES 2 552 844 B1) y descongelación (ES 2 570 254 B1). Además, han trabajado en proyectos, tanto con empresas desarrolladoras como con usuarias finales de ultrasonidos, que pueden considerarse precursores a nivel nacional para la validación de la tecnología, concretamente en el tratamiento térmico de productos pesqueros:

Proyecto ECOSON: (2011-2013) "Diseño y desarrollo de un sistema de conservación por ultrasonidos para productos de la pesca y de la acuicultura". Convocatoria de Proyectos de Investigación Sectorial de la Dirección General de I+D+i, Conselleria de Economía e Industria, Xunta de Galicia.

Proyecto VALORATUN: (2013-2015) "Mejora integral del proceso de transformación del atún". El objetivo es la optimización de los procesos de fabricación de atún en conserva, desarrollando nuevos equipos (incluyendo US), nuevos estudios de mejora del tratamiento de materia prima y obtención de producto final premium. Proyecto empresarial consorciado liderado por CALVO CONSERVAS. Convocatoria FEDER INNTERCONECTA Galicia. Cofinanciación CDTI y Agencia Gallega de Innovación, Xunta de Galicia.

Proyecto MELLORATUN: (2018-2020) "Aplicación de tecnologías emergentes en el procesado de túnidos". El objetivo principal del proyecto es la optimización de una línea de procesado de conservas de atún mediante la aplicación de nuevas tecnologías innovadoras (US) implementadas en aspectos críticos como la aceleración del proceso de descongelación, la optimización del empaque, el aumento de la productividad y la mejora de la calidad y salubridad del producto terminado. Programa Conecta-Peme, Xunta de Galicia.

Actualmente, para la aplicación de US en el tratamiento térmico de alimentos, se está en una fase de comenzar a escalar prototipos de mayor tamaño, para poder hacer una posterior transición al escalado industrial. Otras futuras líneas de investigación en este campo, necesarias también para el despliegue de la tecnología, deben ir encaminadas al estudio de intensidades y frecuencias a utilizar para distintos tipos de alimentos y etapas de proceso en las que pueden ser aplicables. El objetivo es validar la tecnología de US para distintos tipos de alimentos y procesados.

Otra línea de trabajo se debe centrar en determinar los materiales de envase aptos para la aplicación de esta tecnología para la esterilización de productos envasados.

Existen centros de I+D+i de referencia trabajando en la mejora de los procesos de pasteurización/esterilización: ANFACO-CECOPESCA, Ctic Cita - Centro de Innovación y Tecnología Alimentaria, CTNC-Centro Tecnológico Nacional de Conserva y Alimentación, IA2- Instituto Agroalimentario de Aragón, AINIA.

37- Datos proporcionados por CITIC-CITA.
38- Información proporcionada por CTNC.

En cuanto al coste de la tecnología, actualmente solo es posible proporcionar referencias para equipos de US (generador + sonotrodo) aplicables en tamaños de instalaciones semiindustriales. A modo de ejemplo, el coste de un equipo de US necesario para realizar tratamientos térmicos en una balsina de 2.000 l (700 kg de alimento) asciende a 12.000 €. Cabe destacar que, aunque existen fabricantes en el mercado de equipos de US para su aplicación en el campo de la limpieza, las aplicaciones que se detallan en este apartado necesitan unos equipos "a medida", que encarecen el coste.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

En el año 2030, es objetivo del PNIEC que el consumo energético en el sector industrial se sitúe en 20.131 ktep. Asumiendo que la contribución del sector de la alimentación, bebidas y tabaco se mantenga en un 11% (últimos datos disponibles, para 2018[39]), el consumo de energía en el sector será de 2.280 ktep, de los cuales 1.450 ktep serán procedentes de combustibles y destinados a usos térmicos.

Dentro de los usos térmicos en esta industria, los tratamientos térmicos dedicados a la conservación, pasteurización y esterilización juegan un papel fundamental, ya que son unas de las principales tecnologías utilizadas, de carácter transversal, y aplicadas a la mayoría de los alimentos[40]. Aproximadamente el 50% del consumo térmico en este sector se debe a demandas de baja temperatura[41], donde los más representativos son los tratamientos térmicos de conservación. Asumiendo un despliegue total en este segmento, el potencial total de ahorro podría ascender a 123,25 ktep, considerando el 17% de ahorro de referencia obtenido en el caso de estudio mostrado.

Según datos del INE, el consumo térmico se reparte de la siguiente manera en el sector de la alimentación y bebidas: Carbón 1%, productos petrolíferos 54%, gas natural 37% y energías renovables 8%. Puesto que no existe en el PNIEC una prospección detallada del consumo de energía final por fuentes y subsectores industriales, se van a hacer extensivas las tendencias marcadas para el sector industrial en su conjunto, de reducción del 32% del peso de los productos petrolíferos, de eliminación del carbón y de aumento del 11% de la contribución de energías renovables a la demanda de combustibles. Esto se traduciría en una disminución del factor de emisión de 62 a 58 kg CO_2/GJ.

Con estas hipótesis, el ahorro energético se traduciría en 2030 en 299.307 tCO_2/año.

Análisis DAFO

En la siguiente tabla, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología:

La principal debilidad que, con el estado actual de desarrollo de la tecnología, puede destacarse es que no es aplicable a cualquier tipo de envase, cuando se aplica a la esterilización de producto envasado, debido al efecto de los US en el material del envase. Actualmente, aunque existen equipos industriales (generador + sonotrodo) de aplicación de ultrasonidos, dirigidos a operaciones de limpieza, su aplicación para el tratamiento térmico de alimentos requiere de una adaptación, es decir, deben fabricarse a medida.

Al ser una tecnología que se aplica a un proceso que típicamente usa vapor, mediante tecnologías muy probadas y efectivas, y para procesos de suma importancia en la seguridad alimentaria, como son la

40- BREF-Food and drink and milk industries.
41- Fluch J., Brunner C., Grubbauer A. (2017). Potential for energy efficiency measures and integration of renewable energy in the European food and beverage industry based on the results of implemented projects. ICSEF 2017.
39- Instituto Nacional de Estadística.

Debilidades

- No aplicable a envases de cualquier material.
- Equipos estándar no aplicables, necesidad de adaptación.

Amenazas

- Reticencias al cambio en el sector debido a los estrictos criterios de seguridad alimentaria que tienen que cumplir estos productos.
- Tecnologías convencionales muy consolidadas y conocidas.

Fortalezas

- Tecnología sencilla.
- Válido tanto para alimentos sólidos como líquidos.
- Válido tanto para alimento envasado como sin envasar.
- Aplicable en líneas existentes de tratamiento térmico.
- Tecnología económica.

Oportunidades

- Tecnología replicable en un gran abanico de tratamientos y alimentos.
- Determinados alimentos pueden mejorar sus propiedades organolépticas.
- Disminución de los tiempos de procesado y, por tanto, mejora de la productividad.

Tabla 5. Análisis DAFO de las nuevas tecnologías para la pasteurización/esterilización de alimentos.

pasteurización y esterilización de alimentos, puede inspirar ciertas reticencias en el sector. Esto puede suponer una amenaza para su despliegue en el horizonte 2030-2050.

Cabe mencionar que no es una tecnología complicada y que, por el principio físico que se produce, es una técnica aplicable tanto a sólidos como a líquidos y tanto para el tratamiento térmico de producto envasado como sin envasar. Además, puede ser a priori aplicada, con ciertas modificaciones, a las líneas actuales de tratamiento térmico. Esto la hace una tecnología fácilmente aplicable, replicable y económica, siendo éstas sus principales fortalezas y al mismo tiempo oportunidades. También es posible que, en el procesado de determinados alimentos, el resultado final del tratamiento en términos de calidad organoléptica puede ser mejor que con los tratamientos térmicos convencionales.

2.6 Concentración de efluentes mediante membranas

Descripción

Las membranas son elementos filtrantes semipermeables. La separación de las sustancias suele ser producida por diferencias de presión, térmicas o eléctricas. Debido a los avances realizados en los últimos años para aumentar su eficiencia energética, se han convertido en las tecnologías preferidas para ciertas aplicaciones. Dado que los procesos de membranas son prácticas instauradas a nivel industrial sobre las cuales se tiene amplio conocimiento, la diversificación en sus usos sobre todo a través de la concesión de propiedades selectivas es lo que les confiere un gran potencial para optimizar la eficiencia de los procesos industriales en los cuales se implementen[42].

En el sector de la alimentación y bebidas, además de cumplir los roles de separación típicos, sobre todo aquellos relacionados con la separación de microorganismos, concentración de productos, proteínas y otros compuestos para asegurar la calidad del producto final, encuentran especial aplicación en la recuperación de compuestos de sus efluentes, siendo una aplicación alineada con los principios de economía circular. Así pues, el valor de los tratamientos por membranas reside en la capacidad de tratar corrientes residuales y obtener el mayor beneficio posible de ellos, ya sea a través de la valorización de compuestos presentes en corrientes residuales como materias primas u otros productos de alto valor añadido[43] o la concentración de los lodos para generar energía.

Un aspecto fundamental en la operación de las industrias de este sector es la alta carga orgánica y de nutrientes en sus efluentes acuosos, que deben ser

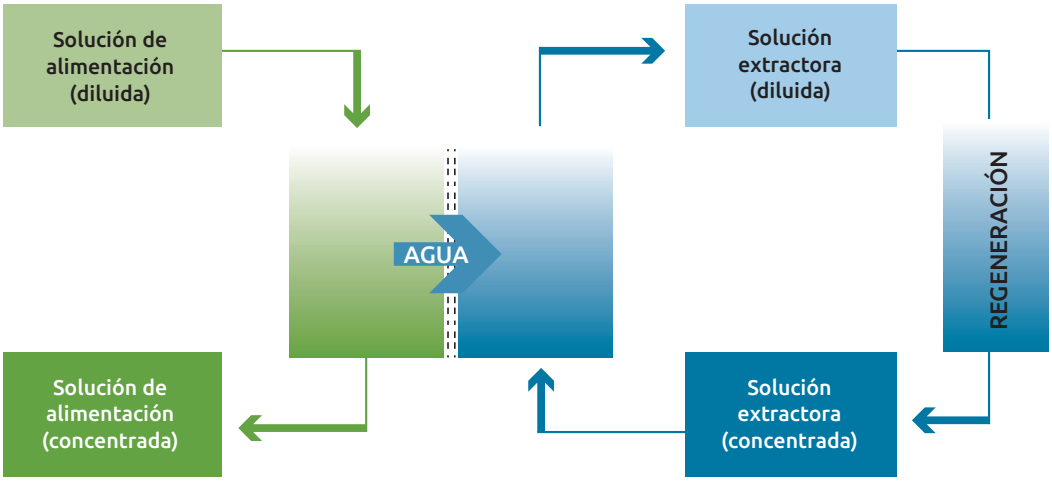


Figura 8. Esquema básico de la ósmosis directa. Fuente: CIRCE.

42- Guiga W., Lameloise M-L, (2019). Membrane separation in food processing. Green Food Processing Techniques Preservation, Transformation and Extraction. 2019, Pages 245-28743- Nazir A., Khan K., Maan A., Ziac R., Giornod L., Schroëne K., (2019). Membrane separation technology for the recovery of nutraceuticals from food industrial streams. Trends in Food Science & Technology. Volume 86, Pages 426-438.

tratados para cumplir con límites de vertido y evitar problemas ambientales como la eutrofización. Además, las prácticas de descarga cero de efluentes líquidos (*Zero-Liquid Discharge*, "ZLD" por sus siglas en inglés) supone requerimientos cada vez más exigentes hacia los procesos de tratamiento de efluentes industriales. Debido a esta alta carga orgánica de las corrientes a tratar en el sector agroalimentario, las membranas suelen estar sujetas a ensuciamientos por materia orgánica que induce la formación de *biofilms* (contaminación microbiológica debida al crecimiento de microorganismos en la superficie de la membrana y que ocasiona la obstrucción de los poros), con una consecuente pérdida del rendimiento de la operación.

Las ventajas de la ósmosis directa (TRL 7-9), en la que el flujo de agua sigue el gradiente osmótico natural de las soluciones en contacto (solución de alimentación y solución extractora), se caracterizan por la tolerancia de estas membranas al fouling (ensuciamiento o acumulación de componentes sobre la superficie o los poros de la membrana) y su capacidad de tratar soluciones concentradas.

Las ventajas de emplear tecnologías de concentración y recuperación de agua en estas industrias, no sólo reside en disminuir el considerable consumo de agua y el gasto energético de su tratamiento final[44], sino también el potencial que ofrece el concentrar las corrientes ricas en compuestos orgánicos que pueden ser digeridos anaeróbicamente para producir biogás. Esta solución puede ser aplicada para tratar efluentes de un gran número de industrias en el sector agroalimentario: cárnica, pesquera, láctea, bebidas, azucarera, entre otras. Para la concentración de soluciones y recuperación de agua, la combinación de ósmosis directa e inversa utiliza alrededor de 8 a 10 veces menos energía (5-20 kWh/m3) que las técnicas de evaporación[45].

También los reactores de biofilm de membrana aireados (MABR, por sus siglas en inglés) (TRL 7-9) han ganado prominencia en los últimos años, con la creciente preocupación respecto al manejo y control de nutrientes en efluentes, que conducen a la eutrofización de las fuentes receptoras. Típicamente, las depuradoras cuentan con un sistema de balsas donde microorganismos, bajo un principio de metabolismo aeróbico, convierten el amonio presente en las aguas en nitrato (nitrificación), y luego en ausencia de oxígeno convierten el nitrato en nitrógeno gaseoso (desnitrificación), el cual es un gas inerte e inocuo. La nitrificación consume cantidades importantes de oxígeno, constituyendo este uno de los principales costes operacionales de estos establecimientos. El arreglo modular y compacto del MABR permite tratar efluentes ricos en nutrientes para producir la nitrificación/desnitrificación simultánea, ofreciendo una alternativa económica y energéticamente viable para el control de nutrientes en efluentes, consiguiendo ahorros de hasta un 90% en comparación con los tratamientos convencionales.

Los costes de instalaciones de lodos activados rondan los 750 – 850 €/m3 día en los casos de tratamiento convencional, aumentando a 1.050 – 1.250 €/m3 día cuando se incorporan membranas en el proceso de depuración de agua, mientras que para una instalación de MBR con capacidad similar los costes rondan los 700- 960 €/m3 día[46].

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

La configuración de las membranas en diferentes procesos es un campo sobre el que se posee amplio conocimiento. Así pues, las configuraciones más habituales que se encuentran en la industria de la alimentación son en espiral, fibra hueca, placas y

44- "DuraMem® and PuraMem® membranes for organic solvent nanofiltration – OSN".
45- Porifera.
46- R. Iglesias, P. Simón, L. Moragas, A. Arce, and I. Rodriguez-Roda, (2017) "Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors," Water Sci. Technol., vol. 75, no. 11–12, pp. 2562–2570.

marcos y tubulares. La elección quedará sujeta a la aplicación para la cual la membrana ha sido seleccionada. Los esfuerzos de I+D dentro del desarrollo de membranas de ósmosis directa se centralizan en mejorar la selectividad, permeabilidad y eficiencia. De esta manera, reducir la polarización interna y la tendencia al ensuciamiento, aumentar la permeabilidad de agua, reduciendo o incrementando la de ciertos solutos, son las áreas que resultan de mayor interés. Si bien la configuración final del equipo dentro del cual se ubicará la membrana no presenta mayores novedades, pues se encuentra comercialmente, la investigación en torno a esta tecnología se focaliza principalmente en la búsqueda de materiales para la fabricación de nuevas membranas, que confieran fenómenos de superficie particulares, y la viabilidad del escalado industrial.

El MABR es una tecnología emergente, si bien tiene desarrollo a nivel industrial. En España en 2018 se instaló el primer reactor de este tipo[47]. Su versatilidad para ser instalada en forma modular otorga a esta tecnología una ventaja competitiva para el tratamiento de efluentes in-situ, con sus ahorros energéticos y económicos asociados. Se puede acondicionar para grandes instalaciones, pero lo instalado actualmente son instalaciones modulares.

Existen en España numerosos centros tecnológicos en el sector agroalimentario, en los que los que se trabaja en la aplicación de membranas (CTNC, IA2, ANFACO-CECOPESCA, LEITAT, AINIA, Eurecat). Mayoritariamente, la I+D+i de la aplicación de membranas en el sector de alimentación y bebidas está centrado en la recuperación de compuestos y nutrientes de valor añadido y en el tratamiento de efluentes residuales, para la eliminación de contaminantes, así como hacia la máxima reutilización del agua. Por otro lado, aunque los procesos con membranas son prácticas instauradas en el sector, sigue dedicándose una parte de la investigación a la mejora de selectividades, por ejemplo, con la modificación de la matriz polimérica mediante la incorporación de nanoestructuras[48],[49].

No se han identificado un gran número de proyectos con participación/coordinación nacional en la aplicación de ósmosis directa para el tratamiento de efluentes residuales en la industria agroalimentaria, estando más extendida esta tecnología en el campo de la desalinización de aguas. No obstante, a continuación, se citan algunos ejemplos:

Proyecto EFLUCOMP: (2017-2020) Tiene como objetivo la investigación en tecnologías competitivas y coste-eficientes (incluyendo la ósmosis directa) para abordar la problemática asociada a la presencia de contaminantes en efluentes, como la materia orgánica persistente o la elevada salinidad. Generalitat de Catalunya - Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Proyecto Digestake: (2018-2022) Este proyecto incluye el estudio de nuevos procesos de ósmosis directa para regenerar agua y valorizar un concentrado de nutrientes para transformarlos en fertilizantes de alto valor añadido, de aplicación en las estaciones depuradoras de aguas residuales. Generalitat de Catalunya - Fondo FEDER.

En cuanto a grupos de referencia en la materia, de particular relevancia en el ámbito agroalimentario a nivel internacional son el Grupo Elimelech de la universidad de Yale, que estudia principalmente el fouling y la recuperación de nutrientes, y SUEZ y Fluence, que ofrecen tecnologías como el MARB y la digestión anaerobia y tienen un importante peso en I+D+i.

47- https://www.acciona-agua.com/pressroom/in-depth/2018/march/spain-s-1st-oxyfas-mabr-plant-is-commissioned-by-acciona-agua/
48- V. Vatanpour, A. Ghadimi, A. Karimi, A. Khataee, and M. E. Yekavalangi (2018) "Antifouling polyvinylidene fluoride ultrafiltration membrane fabricated from embedding polypyrrole coated multiwalled carbon nanotubes," Materials Science and Engineering: C, vol. 89, pp. 41–51, Aug. 2018.
49- Ihsanullah (2019). "Carbon nanotube membranes for water purification: Developments, challenges, and prospects for the future," Separation and Purification Technology, vol. 209, pp. 307–337.

En cuanto a costes, las instalaciones de lodos activados rondan los 750 – 850 €/m3 y día en los casos de tratamiento convencional, aumentando a 1.050 – 1.250 €/m3 y día cuando se incorporan membranas en el proceso de depuración de agua, mientras que para una instalación de MBR con capacidad similar los costes rondan los 700- 960 €/m3 día[50].

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

La inmensa casuística que se encuentra en la generación de efluentes en la industrial de la alimentación y bebidas, y la ausencia de registros o datos al respecto, no permite hacer una valoración para la extrapolación del tratamiento por membranas a todo el sector. Por ello, se va a tomar como caso de estudio el potencial energético de generación de biogás mediante digestión anaeróbica, como aprovechamiento final tras la concentración de efluentes llevada a cabo con membranas, concretamente para el sector cárnico (vacuno y pollo).

Considerando un potencial de generación[51] de 0,09 kWh/día por pollo procesado (2 kg/canal) y 14,5 kWh/día por vaca procesada (310 kg/canal), y los últimos datos de producción anual de carnes en España de 1.412.223 t de pollo[52] y 666.632 t de vacuno[53], se obtendría un potencial del orden de los 35.000 GWh anuales o 3.000 ktep.

Análisis DAFO

En la tabla 6, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

Debilidades

- Elevados costes iniciales.
- Polarización interna.
- Energía necesaria para la regeneración de la solución de extracción.

Amenazas

- Otras tecnologías de menor coste inicial.

Fortalezas

- Mínimo consumo energético.
- Obtención de agua de alta calidad.
- Elevadas selectividades.
- Diseños compactos.
- Diseños modulares.

Oportunidades

- Numerosas industrias con efluentes con alta carga orgánica.
- Aplicación alineada con la economía circular.
- Esfuerzos crecientes en la reducción del estrés hídrico.
- Creciente interés en *Zero-Liquid Discharge.*

Tabla 6. Análisis DAFO de la concentración de efluentes mediante membranas.

50- R. Iglesias, P. Simón, L. Moragas, A. Arce, and I. Rodriguez-Roda, (2017) "Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors," Water Sci. Technol., vol. 75, no. 11–12, pp. 2562–2570.
51- Fluence Corporation. "Digestión Anaerobia: la solución verde para la industria alimentaria"
52- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (2019). "El sector de la avicultura de carne en cifras".
53- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (2019). "Informe anual de la industria alimentaria 2019-2020".

Las tecnologías de concentración por membranas mediante ósmosis directa presentan importantes fortalezas, entre las que destaca su menor consumo energético frente a las tecnologías tradicionales de concentración, como la evaporación, ya que sólo se requiere una pequeña cantidad de energía para bombear las soluciones. Además, ofrecen la oportunidad de obtener agua de alta calidad apta para el riego agrícola y unas selectividades al compuesto objetivo no comparables con las técnicas convencionales. Por último, cabe mencionar que se trata de diseños más compactos, en comparación con las tecnologías convencionales de separación, y modulables, para adaptarse a distintos tamaños de instalación.

Todas estas cualidades hacen que la aplicación de membranas, particularmente en técnicas de ósmosis directa, encuentren una importante oportunidad de aplicación en industrias que empleen corrientes con alta carga orgánica, como es el sector de la alimentación y bebidas. Por otro lado, se trata de una aplicación alineada con la economía circular de agua, que permite recuperar compuestos valiosos a bajo coste y mejorar el estrés hídrico del planeta, de creciente importancia a nivel global.

Como debilidades de la tecnología se pueden mencionar los elevados costes iniciales, aunque se compensan con unos menores costes operativos a lo largo de su vida útil. Además, el efecto conocido como polarización interna, producida cuando la solución concentrada no puede penetrar en la membrana debido a la tortuosidad de los canales, reduce la diferencia de presión osmótica efectiva considerablemente y con ello el rendimiento de separación. También hay que destacar que la regeneración de la solución de extracción requiere un input energético que dependerá de cada caso de aplicación y, por otro lado, que dependiendo de la concentración del efluente a tratar puede ser difícil encontrar soluciones de extracción adecuadas. Finalmente, ciertos materiales de membranas encuentran dificultad en el escalado, como las que hacen uso de nanopartículas-NPs-, o las redes organometálicas -MOFs- en matriz polimérica).

No se identifican amenazas más allá de que surjan otras tecnologías con menor coste inicial, por ejemplo, que el desarrollo de la ósmosis inversa sea tal que sea más viable económicamente vencer el gradiente de presión que regenerar la solución extractora en la ósmosis directa.

2.7 Diagnóstico y optimización de la combustión mediante visualización de llama

Descripción

La combustión es un proceso complejo afectado por multitud de variables que influyen en la llama, por ejemplo, forma, temperatura, movimiento, etc. y que pueden determinar la eficiencia del proceso. A modo de ejemplo se presenta la Figura 9[54], donde puede apreciarse el comportamiento diferente de la llama al llevarse a cabo la reacción con diferente cantidad de aire mientras se mantiene constante la de combustible. La imagen inferior corresponde a un menor ratio aire/combustible, lo que provoca un alargamiento de la llama y la formación de un cono secundario, al completarse la combustión con el aire ambiente. La imagen proporciona información muy valiosa para estudiar la combustión.

El diagnóstico por imagen de la combustión se trata de una tecnología no intrusiva para determinar el comportamiento de la combustión basado en la imagen de la llama. La adquisición de las imágenes de la llama se puede realizar con diferentes tipos de cámaras para estudiar los rangos espectrales característicos en cada caso. En aplicaciones industriales, dichas cámaras suelen colocarse dentro del horno o la caldera, aunque también podría evaluarse su colocación fuera del mismo.

Figura 9. Combustión de mezcla gas natural/ hidrógeno con diferentes ratios aire/combustible. Fuente: Effects of hydrogen and primary air in a commercial partially-premixed atmospheric gas burner by means of optical and supervised machine learning techniques. Elsevier, 2020.

Por medio del desarrollo de algoritmos, se procesan las imágenes para obtener las características de éstas y relacionarlas con las condiciones de combustión. En ocasiones, existe ya una cámara disponible que visualice lo que ocurre en el interior del horno, por lo que este hecho en sí mismo ya se podría considerar una ayuda al manejo del sistema. Y, si además se incorporan algoritmos que puedan alertar de combustión ineficiente, generación de humo dentro de la cámara de combustión, posición y movimiento de la llama, etc. se consigue una tecnología integrada para la optimización del funcionamiento del equipo. En otros casos donde la cámara no esté instalada o no sea la adecuada, se comenzaría por la evaluación y elección del sistema de visualización más adecuado que se ajuste a la aplicación y, a partir de ahí se realizaría el desarrollo completo.

54-González-Espinosa, A., Gil, A., Royo-Pascual, L., Nueno, A., & Herce, C. (2020). Effects of hydrogen and primary air in a commercial partially-premixed atmospheric gas burner by means of optical and supervised machine learning techniques. International Journal of Hydrogen Energy.

Otro aspecto a tener en cuenta de esta tecnología es la posibilidad predicción de las emisiones generadas basada en las propias imágenes de las llamas. Las nuevas técnicas de machine learning permiten este tipo de predicción utilizando las características de la imagen ayudando hacia el avance de la industria 4.0. Es importante destacar que, al digitalizar la llama, se abre la oportunidad de aplicar las técnicas de inteligencia artificial aplicada a la combustión.

Actualmente, la herramienta se centra en el desarrollo de la generación de alarma y avisos una vez detectada una posible desviación, pero el objetivo final es desarrollar una herramienta autónoma que pueda integrarse en el sistema de control de la planta. Esta tecnología en particular, centrada en la detección aire/combustible, puede conseguir un diagnóstico de la combustión in situ y en tiempo real, ya que se anticipa a los medidores convencionales, que se colocan aguas abajo e incluso son compartidos por diferentes instalaciones, ocasionando desviaciones de la medida.

Esta tecnología es válida para una amplia gama de combustibles. Se ha trabajado con combustible sólido: carbón, biomasa y co-combustión, y gaseoso: gas natural y mezclas con hidrógeno al 23%. En este último caso tanto a nivel de laboratorio como industrial.

Los beneficios de aplicar esta tecnología para optimizar la combustión dependen del estado de partida del equipo, pero parece razonable estimar unos potenciales ahorros entorno al 3-4%[55].

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Se trata de una tecnología que se encuentra en un nivel de desarrollo TRL 5, ya que se ha llegado a realizar una prueba de concepto a nivel industrial. En 2023 se espera que alcance la madurez TRL 7 debido a las actividades llevadas a cabo en diferentes proyectos que se realizan actualmente.

El diagnóstico por imagen aplicado a la combustión es una herramienta innovadora que puede implementarse en la industria intensiva donde la combustión sea su principal fuente de energía. Actualmente, el nivel de desarrollo se sitúa en un lazo de control que incluye el factor humano, pues por el momento el desarrollo de la tecnología solo es capaz de proporcionar alarmas y avisos para actuar sobre el sistema.

El objetivo final o perspectiva de evolución de esta tecnología es el desarrollo de un sistema integrado de combustión inteligente, basado en las imágenes de llama, que en un futuro se implemente en el sistema de control de la planta y que permita que las desviaciones detectadas en la combustión sean corregidas automáticamente. También se está trabajando en la mejora de la velocidad de procesado de imágenes mediante el uso de hardware más potente.

Para el desarrollo de esta tecnología, CIRCE cuenta con un laboratorio de combustión para realizar pruebas experimentales con diferentes tipos de combustibles. Además, gracias a las actividades realizadas dentro de los proyectos en los que participa, esta tecnología se implementará en entornos industriales en un futuro próximo.

El procesamiento de imágenes ha experimentado una evolución considerable en los últimos años, debido en gran parte al desarrollo de hardware capaces de tratar volúmenes de datos cada vez más grandes.

Existen otros grupos de investigación que trabajan o han trabajado en analizar la combustión a partir de imágenes, aunque en la mayoría de los casos los estudios se centran a escala de laboratorio. CIRCE

55 - Datos experimentales obtenidos en el proyecto e-glass para el sector del vidrio.

está llevando esta técnica a escalas de mayor calado, ya que se ha trabajado en la industria del vidrio y petroquímica en proyectos anteriores y actualmente se continúa la línea de trabajo con una acería y cementera.

Algunos proyectos destacables se resumen a continuación:

Proyecto DISIRE: (2015-2018) "Integrated Process Control based on Distributed In-Situ Sensors into Raw Material and Energy Feedstock". El objetivo de este proyecto es el de avanzar en procesos más sostenibles en la industria intensiva a través de un sistema de control integrado. La fundación Solar Impulse incluyó a dicho proyecto dentro de su catálogo de las 1.000 soluciones tecnológicas para la eficiencia. Financiado por el H2020-SPIRE de la Comisión Europea.
https://cordis.europa.eu/project/id/636834/es

Proyecto STEAMBIO: (2015-2018) "Flexible Superheated Steam Torrefaction and Grinding of Indigenous Biomass from Remote Rural Sources to Produce Stable Densified Feedstocks for Chemical and Energy Applications". El objetivo de este proyecto es demostrar la viabilidad de un sistema móvil para pretratamiento de residuos agroforestales. Financiado por el H2020-SPIRE de la Comisión Europea. https://www.steambio.eu/

Proyecto BAMBOO: (2018-2022) "Boosting Industrial Flexibility". El objetivo de este proyecto es la demostración de tecnologías basadas en la recuperación de calor, flexibilidad eléctrica y valorización de corrientes residuales integradas en una herramienta para la gestión de la flexibilidad de materiales y energías entre los diferentes sectores. Financiado por el H2020 de la Comisión Europea. http://bambooproject.eu/

Proyecto RETROFEED: (2019-2023) "Implementation of a smart RETROfitting framework in the process industry towards its operation with variable, biobased and circular FEEDstock". El objetivo de este proyecto se centra en proporcionar más flexibilidad a la industria intensiva para poder introducir materiales alternativos, biobasados y adoptando economía circular. Realizando un retrofitting del equipo principal del proceso, desarrollando nuevos sensores y mejorando los sistemas de monitorización y control. Además, se desarrollará una herramienta de ayuda a la toma de decisión para la mejor gestión de este nuevo escenario. Financiado por el H2020 de la Comisión Europea.
https://retrofeed.eu/

La viabilidad económica de esta tecnología está relacionada con el sistema de combustión en el que se aplique, siendo los sectores más adecuados para su implementación la industria intensiva energéticamente, ya que son procesos que consumen un gran volumen de combustible y corresponden a procesos donde las temperaturas que se alcanzan son superiores a los 1.000° C. Al tratarse de una herramienta ad-hoc, ya que su desarrollo depende de multitud de factores, no es posible establecer un coste estándar, pues es necesario definir su alcance. Mientras en ocasiones se podría integrar en los sistemas existentes de supervisión de los hornos, en otros casos, habría que comenzar desde la identificación del tipo de cámara, posición, etc. más adecuados. Con todas estas limitaciones, y en el estado actual de desarrollo, se estima un coste entre 30.000 y 70.000 €.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Esta tecnología se considera de especial relevancia para los sectores altamente consumidores de energía. Entre ellos destacan la industria de minerales no metálicos, la siderurgia y fundición y la metalurgia no férrea. Entre estos sectores, consumieron un total de 5.833 ktep en 2018, según los últimos datos disponibles, lo que supone un 41% de todos los combustibles utilizados en el sector industrial durante ese año.

Considerando que el escenario objetivo del PNIEC marca una estabilización del consumo energético para 2030 en el sector industrial, siendo similar al producido en 2020, y asumiendo una extrapolación a la mitad del consumo térmico en estos sectores intensivos, ya que esta tecnología es aplicable a cualquier proceso de combustión, se obtendría un potencial de ahorro de 102 ktep.

Análisis DAFO

En la tabla 7, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

La principal fortaleza de esta herramienta es un amplio campo de aplicación dentro de la industria intensiva, en particular los hornos, donde se pueden considerar diferentes combustibles, quemadores y tipos de hornos.

La apuesta por la digitalización de la industria y la eficiencia energética ofrece una gran oportunidad para la implementación de esta tecnología, ya que aborda ambos aspectos. Además, la descarbonización de la industria intensiva es objetivo en las hojas de ruta internacionales y supone una oportunidad de despliegue de esta tecnología, ya que, al introducir nuevos combustibles, podría ayudar a monitorizar y optimizar estos nuevos escenarios que se presentan.

En cierta medida, la amenaza de esta tecnología puede venir provocada por las reticencias a la digitalización de ciertos segmentos de la industria, ya que se observa un nivel de automatización muy diferente entre distintas industrias.

La principal debilidad que presenta esta herramienta es la necesidad de adaptación a cada una de las aplicaciones a considerar, ya que la combustión contempla multitud de escenarios y es necesario diseñarla para cada caso en particular.

Debilidades	Amenazas
• Necesidad de adaptación a cada instalación.	• Bajo grado de digitalización de la industria. • Reticencia a la integración en los sistemas de control actuales.
Fortalezas	**Oportunidades**
• Amplio campo de aplicación en hornos y calderas. • Aplicable a diversos tipos de combustible, incluido el hidrógeno. • Beneficios adicionales a la optimización de la combustión. • Bajo periodo de retorno.	• Gran campo de aplicación en la industria intensiva. • Descarbonización de la industria intensiva. • Digitalización de la industria intensiva.

Tabla 7. Análisis DAFO del diagnóstico y optimización de la combustión mediante visualización de la llama.

2.8 Digitalización de procesos

Descripción

La aplicación de inteligencia artificial en procesos industriales supone la introducción masiva de tecnologías digitales que más allá de la automatización, teniendo un efecto transformador en los procesos y productividad, así como en el consumo energético de los mismos.

Este campo requiere del desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías para el tratamiento de datos de múltiples fuentes en la industria. Para ello se utilizan tecnologías y algoritmos de machine learning, Big Data y Data Science, Blockchain o redes neuronales para el manejo y valorización de datos y la explotación de la información resultante.

En la actualidad se encuentran en desarrollo conocimientos y tecnologías para aplicar estos principios para cubrir las necesidades de la industria en campos como los siguientes:

- Sistemas de modelización, simulación y predicción del comportamiento de máquinas y procesos de fabricación.
- Sistemas de trazabilidad que permitan monitorizar la transformación y distribución de un producto, garantizando la validez y seguridad de la información.
- Desarrollo de gemelos virtuales que permitan el diseño de procesos y posterior optimización).
- Visión artificial.
- Realidad virtual y aumentada.

Estos modelos permiten la diagnosis industrial de fallos en equipos, componentes y sistemas en servicio, así como estimar, preservar o extender la vida útil funcional de activos industriales.

A continuación, se detallan las aplicaciones de digitalización de procesos en los siguientes ámbitos:

- Monitoreo de eficiencia y mantenimiento predictivo.
- Modelo de sistemas mediante inteligencia artificial y gemelo digital.
- Trazabilidad de productos utilizando Blockchain.
- Visión por computador.

Monitoreo de eficiencia y mantenimiento predictivo

La recopilación de un gran volumen de datos sobre el estado y el funcionamiento de los equipos de planta permite que las actividades de mantenimiento, que se realizan habitualmente de forma periódica, pasen a estar agendadas por la situación real de los equipos, en lo que se conoce como *condition-based maintenance*.

De este modo se reducen costes de mantenimiento, se optimiza el rendimiento de estos equipos y se limitan los tiempos de parada de servicio, mejorando el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

La medición de los parámetros de entrada y salida de los sistemas permite controlar de manera constante la eficiencia de estos y avisar, como vemos destacado en rojo en la figura 10, de reducciones den la eficiencia del sistema:

La realización de los mantenimientos basada en la evolución de la eficiencia del sistema, permite evitar periodos de reducción del rendimiento previos al mantenimiento de las instalaciones, o la realización de paradas y revisiones innecesarias.

Los sistemas de mantenimiento predictivo utilizan los datos del sistema (eficiencia, operación, temperaturas, vibraciones, distorsión de la señal eléctrica, etc.) y algoritmos de inteligencia artificial para:

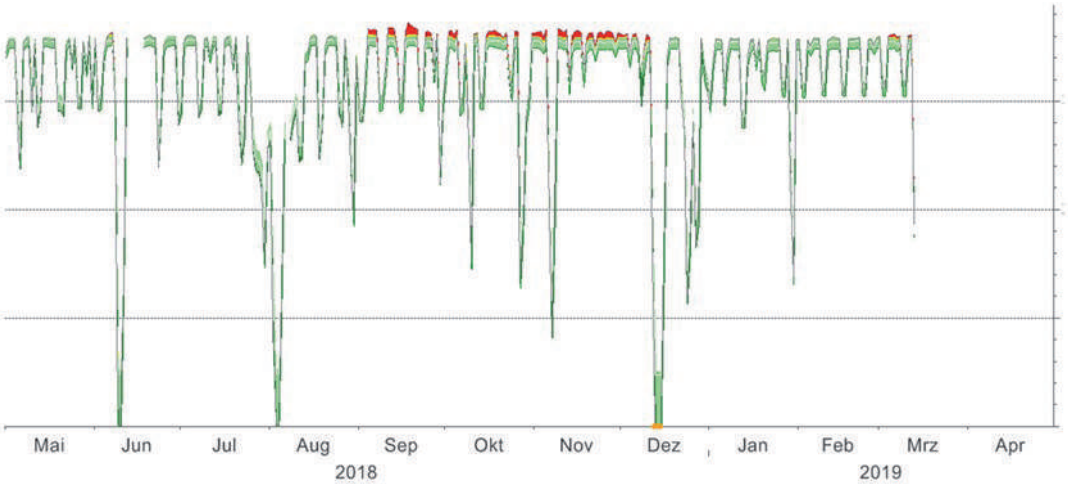


Figura 10. Curva de consumo real de un sistema de monitorizado de energía identificando desviaciones sobre consumo teórico. Fuente: ÖKOTEC EnEffCo

- Predecir la ocurrencia del fallo al identificar patrones y causas (root-cause analysis).
- Focalizar la atención en los elementos del sistema con probabilidad de fallo.
- Detección temprana de fallos actuales o inminentes.
- Prevención del fallo, el aumento de su gravedad y limitando su propagación.
- Estimación de la vida útil restante de los sistemas (Remaining Useful Life o RUL).
- Sincronizado de las acciones con los planes de producción y mantenimiento.
- Soporte en tiempo real a la toma de decisiones.

Asimismo, utilizando el concepto de gemelo digital, se pueden crear modelos de equipos con restricciones de mantenimiento. El resultado de la simulación se puede integrar en el hardware del equipo de forma que de avisos de alarma cuando las condiciones se han superado.

Estos sistemas se pueden aplicar transversalmente en la industria. A continuación, se listan algunos sectores:

- Sistemas de refrigeración industrial (sector químico, farmacéutico y alimentación y bebidas).
- Hornos industriales (sectores de siderurgia y cemento y minerales no metálicos).
- Plantas de cogeneración.
- Motores eléctricos y sistemas de bombeo de alta potencia: controlando su rendimiento y estado de partes móviles para agendar mantenimientos.
- Fundición de metales: detectar y gestionar los crisoles atípicos, sus posibles causas (materias primas, condiciones de los ánodos) y mejorando en términos de calidad o mantenimiento predictivo de los metales y evitando emisiones.

Modelado de sistemas y procesos y desarrollo de gemelos digitales

Las técnicas de aprendizaje de machine learning permiten modelar el comportamiento de una máquina o sistema de cara a poder predecir o simular su comportamiento en diferentes escenarios de producción.

Este modelo permite evaluar las condiciones en las que el sistema es más eficiente en cada escenario productivo y ajustar las configuraciones pertinentes óptimas. La implementación del modelado ayudará a incrementar la productividad, reducir los costes y aumentar la eficiencia de los procesos industriales. El diseño tradicional basado en modelos implica la verificación y validación de dichos modelos, que se pueden utilizar para optimizar el diseño o el funcionamiento de un dispositivo o proceso. Normalmente, el modelo se valida comparando los

resultados experimentales con los resultados del modelo y realizando la estimación de parámetros. El concepto de gemelos digitales abarca los pasos de verificación y validación descritos anteriormente para el diseño basado en modelos. La diferencia es que un gemelo digital implica que la transferencia de información entre el modelo y el dispositivo o proceso es mucho más inmediata y a menudo en tiempo real.

Para desarrollar proyectos de esta índole son necesarias arquitecturas y modelos con un nivel de digitalización elevado para la adquisición, procesado y análisis de datos de múltiples fuentes heterogéneas acorde a las especificaciones requeridas. Uno de los retos a la hora de su implementación es complementar otras tecnologías legadas y superar las posibles carencias de datos en determinadas aplicaciones.

Algunos sectores de aplicación de estos modelos son los siguientes:

- Sistemas de refrigeración industrial (sector químico, automoción-Plantas de Pinturas, farmacéutico y alimentación y bebidas): control y ajuste continuo los parámetros de operación de las instalaciones de refrigeración industrial, adaptando a las necesidades reales de trabajo en cada momento con la configuración óptima (gestión de recursos renovables, temperaturas de impulsión, regulación de equipos, etc.).

- Gestión de sistemas HVAC: de manera análoga al anterior, comunicando con sistemas de seguridad e incorporando información de ocupación se puede aplicar un gemelo a la climatización de edificios. El sistema puede predecir las necesidades de climatización actual y futura por climatología exterior, ocupación, etc. así como su perfil de evolución, pudiendo aplicar la configuración de sistemas, impulsiones, temperaturas, etc. energéticamente óptima para asegurar el confort de los usuarios.

- Planificación de la producción (sector químico y farmacéutico): modelización de referencias de producto y máquinas para establecer de manera automática la previsión de producción de los lotes acorde a los plazos de entrega.

- Hornos y calderas industriales (sector siderurgia y cemento/minerales no metálicos): la modelización y el desarrollo de un gemelo digital sirven para evaluar sistemas de control y los efectos de cambios en el modo de operación (cambio de combustible, de mezclas, de temperaturas de aire, de materia prima, etc.).

- Operación e instrumentación de sistemas de cogeneración: en una cogeneración asociada a una planta industrial las condiciones de demanda son cambiantes de manera constante, y los instrumentistas van incorporando sistemas y ajustando su configuración. El modelado de los sistemas permitiría una simulación de los diferentes escenarios de configuración. De este modo el modelo podría sugerir (o incluso ejecutar) la configuración óptima para cada estado de la planta.

Visión artificial

La visión por computador es capaz de procesar e interpretar imágenes del mundo real a través de un ordenador, permitiendo automatizar tareas y tomar decisiones correctas.

Estos procesos se logran a través de algoritmos de aprendizajes automático supervisado, aportando los patrones de decisión; o no supervisado, mostrando conjuntos de imágenes para cada posible resultado y dejando que el sistema induzca las características y patrones de cada bloque.

Llevados al campo de la eficiencia energética las principales aplicaciones de estos sistemas son las siguientes:

- Inspección automática de productos intermedios o finales para determinar su validez. Estos aprendizajes permiten la detección de objetos en 2D o 3D ya que el ordenador recibe la información visual y la relaciona con los patrones aprendidos con anterioridad, identificando los objetos y diferenciando si cumplen los estándares marcados. Es un elemento importante en el control de calidad de los productos alimentarios, tanto en la selección de frutas como el correcto cierre de las latas de conserva, o la elaboración de productos cárnicos procesados. En la industria química y/o farmacéutica existen vías de aplicación para la inspección de envasados y embalajes. La detección intermedia de los problemas de calidad del producto permite descartarlos automáticamente y evitar el consumo energético de las fases posteriores de procesado.

- Análisis en tiempo real del estado de la llama en la combustión de hornos/calderas[56] (siderurgia y cemento/minerales no metálicos): El sistema interpreta automáticamente el estado de combustión y propone otras entradas de combustible y aire o directamente reajusta la composición en tiempo real para asegurar la eficiencia óptima de manera constante.

- Medición en tiempo real por rayos X del estado de combustibles sólidos como la biomasa[57], determinando concentración de humedad, objetos extraños para mejorar la eficiencia en su combustión.

- Supervisión con sistemas a través de imágenes térmicas con drones, desde el estado de instalaciones eléctricas de generación o consumo a la verificación automática del estado de aislamiento y otras partes externas de sistemas térmicos como las chimeneas.

Trazabilidad de producto

La tecnología blockchain permite el desarrollo de sistemas de trazabilidad que monitoricen la transformación y distribución de un producto garantizando la validez y seguridad de la información.
Estos sistemas gestionan la trazabilidad de un producto desde materia prima, ya sea interna dentro de una empresa, o externa mediante un sistema común entre varias fases de extracción, procesado, transporte, etc. Esto abre la posibilidad a analizar en caso de fallo la procedencia y proceso de cada una de las partes del producto, aumentando ostensiblemente las capacidades del sistema de calidad para controlar la cadena.

Mediante la tecnología blockchain se crea una cadena de bloques para cada elemento, asociando un bloque por cada etapa por la que pase (una máquina, un reparto, etc.) con la información de registro necesaria. Una vez unido un bloque a la cadena, este se replica y no es modificable por el usuario, asegurando de este modo una fiabilidad máxima de la información.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

La digitalización de procesos es un campo muy amplio, tanto en actuaciones y capacidades de los sistemas, como en sectores de aplicación en la industria. La evolución de los sistemas está siendo más rápida, en cuanto a ampliación de capacidades, que la velocidad que tiene la industria de aplicarlos. Dado que en su mayoría se trata de soluciones piloto sin una implementación en mercado, podemos hablar de un TRL 6 actual.

Los sistemas de monitoreo de eficiencia y mantenimiento predictivo están en desarrollo en proyectos de investigación actuales, mediante la creación de sistemas de soporte a la toma de decisiones en tiempo real. La principal dificultad de implantación,

56- Proyecto BAMBOO.
57- FUELCONTROL (ETV) https://ec.europa.eu/environment/ecoap/etv/fuelcontrolr_en

actualmente, radica en la ausencia de un volumen de datos crítico que permita analizar en detalle el comportamiento de un sistema frente a ciclos de vida útil de equipamientos previos. La reducción de costes de los sistemas de sensores y las aplicaciones de big data en la nube están permitiendo una mayor captura de información, y deberán desarrollarse modelos de negocio para el aprovechamiento y explotación de la misma. Por otra parte, se están produciendo avances en la formación del personal de mantenimiento industrial, aspecto clave para la integración y empleo de estas herramientas.

En cuanto al modelado de sistemas y procesos, y desarrollo de gemelos digitales, la situación actual y barreras son similares, ya que el punto de partida (una fuente de datos amplia, heterogénea y fiable) es el mismo.

En sistemas de visión artificial y reconocimiento de fallos, ya existen aplicaciones comerciales centradas en imágenes del espectro visible. La aplicación de cámaras hiperespectrales en los próximos años permitirá registrar información química o física no visible en tiempo real, pudiendo analizar elementos como el estado de alimentos, a través del espectro de luz, infrarroja y ultravioleta, o compuestos químicos mediante espectroscopia de imágenes.

Los sistemas de trazabilidad de producto, si bien son tecnológicamente aplicables y existen modelos en la gestión interna de datos en una empresa, encuentran una barrera a la hora de gestionar información de diferentes partes interesadas, limitando su uso y aplicación. La estandarización de sistemas permitirá el intercambio de información entre empresas y fases de fabricación de bienes para multiplicar funcionalidades y sectores de aplicación.

Proyecto MONSOON (2016-2019) Inteligencia artificial innovadora para mejorar la eficiencia de los recursos y la energía.
https://www.spire2030.eu/monsoon

Proyecto SERENA (2017-2021). Soluciones de mantenimiento basado en la condición con inteligencia artificial predictiva para una fabricación más avanzada. https://www.serena-project.eu/.

Proyecto BAMBOO (2018-2022). Tecnologías innovadoras para la recuperación de calor residual, flexibilidad eléctrica y valorización de flujos de residuos valorización integrado en una herramienta de gestión transversal de la flexibilidad de energía y materias primas. http://bambooproject.eu/.

Proyecto Z-BRE4K (2017-2021) La solución Z-Break comprende la introducción de estrategias escalables a nivel de componente, máquina y sistema para la predicción y prevención de fallo, la detección temprana de fallos existentes o emergentes, la estimación de la vida útil restante de los activos y la gestión de las estrategias antes mencionadas a través de modelado de eventos, monitoreo de indicadores clave (KPIs) y apoyo a la toma de decisiones en tiempo real.
https://www.z-bre4k.eu/

Proyecto SHIP2FAIR (2018-2022) Herramienta de replicación para evaluar la viabilidad técnico-económica de proyectos de solar térmica en procesos industriales y una herramienta de control DSS (soporte a las decisiones de control) para apoyar el funcionamiento del proceso completo.
http://ship2fair-h2020.eu/

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Dada la heterogeneidad de aplicaciones y sectores susceptibles de mejora, se va a analizar y extrapolar datos de un caso y sector concreto.

Por ejemplo, para el proyecto MONSOON, que instaló la tecnología en un sistema de fundición de aluminio para detectar y gestionar los crisoles de comportamiento anómalo y sus posibles causas, se consiguieron ahorros del 9,2% en el consumo eléctrico y del 22,2% en las emisiones de CO_2 asociadas al proceso.

Estos datos, extrapolados a la industria de fundición de aluminio nacional supondrían un ahorro de 67 ktep/año y unas emisiones evitadas de 210.000 tCO_2.

Análisis DAFO

En la siguiente tabla, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología:

La principal debilidad de estos sistemas es la multitud de modelos de comunicación y almacenamiento de datos en cada sistema, así como la presencia de sistemas propietarios con acceso limitado a la información. Esa ausencia de estándares claros aumenta la personalización de cada proyecto y por ende sus costes. La amenaza más importante sería la dificultad de comunicación con equipos legados, dado el elevado coste de implementación de sensórica en determinados sistemas.

Con respecto a las fortalezas, hay que destacar que, la reducción paulatina de los costes de procesamiento y almacenamiento en la nube, hacen que los costes de operación y mantenimiento de estos sistemas sean reducidos en comparación con sus beneficios.

Asimismo, destacar la oportunidad que supone que la integración transversal de datos suponga una clara ventaja en múltiples aspectos para la empresa, por lo que la implementación de estos sistemas se convierte en una prioridad para múltiples departamentos y proporciona ventajas en diferentes campos.

Además, el alto nivel de control integrado de serie en sistemas e instalaciones de nueva compra o diseño permitirá paulatinamente aumentar la información disponible para la caracterización y modelado de los datos industriales.

Debilidades

- Heterogeneidad de fuentes de datos.
- Bajo grado de digitalización en industria.
- Falta de información o fuentes de datos no automatizadas.
- Dependencias entre variables difíciles de identificar durante la sensorización.

Amenazas

- Ausencia de modelos estandarizados en la industria.
- Equipos legados de baja conectividad y alto coste de proyectos brownfield.
- Integración parcial en muchas industrias de los modelos de datos, produciendo sesgos de información que pueden conllevar a conclusiones erróneas.

Fortalezas

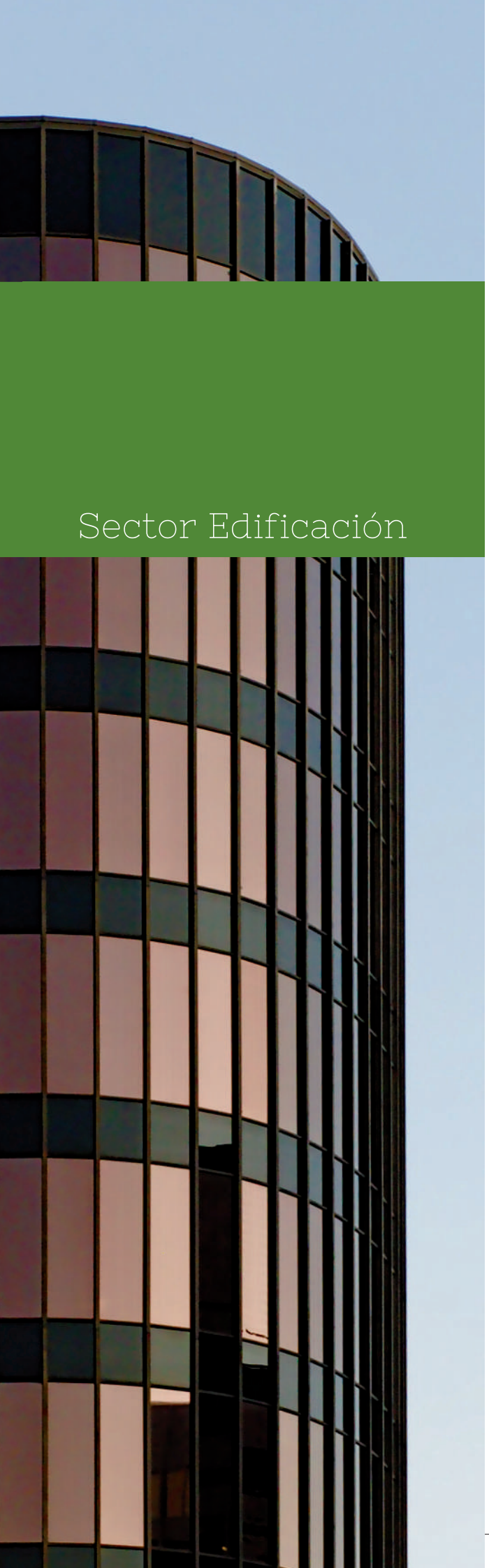
- Bajos costes de operación y mantenimiento.
- Técnicas de tratamiento de datos y modelos de IA han sido desarrollados y validados en otras aplicaciones.
- Integración y análisis de múltiples factores, mayor comprensión de procesos productivos.

Oportunidades

- Beneficios transversales a la industria: tanto energéticos como de calidad de producto.
- Integración de datos generados de nuevos desarrollos e instalaciones.

Tabla 8. Análisis DAFO de la digitalización de procesos.

03 Sector Edificación



Sector Edificación

3.1 Almacenamiento térmico a nivel de vivienda o edificio por calor latente y por reacciones químicas

Descripción

Dentro de los sistemas de almacenamiento de energía térmica (AET) disponibles, se abordan en este informe aquellos que almacenan la energía térmica como calor latente asociado con el cambio de fase o como energía termoquímica asociada con las reacciones químicas.

La figura 11 muestra las alternativas de utilización de sistemas de AET en función de su categoría:

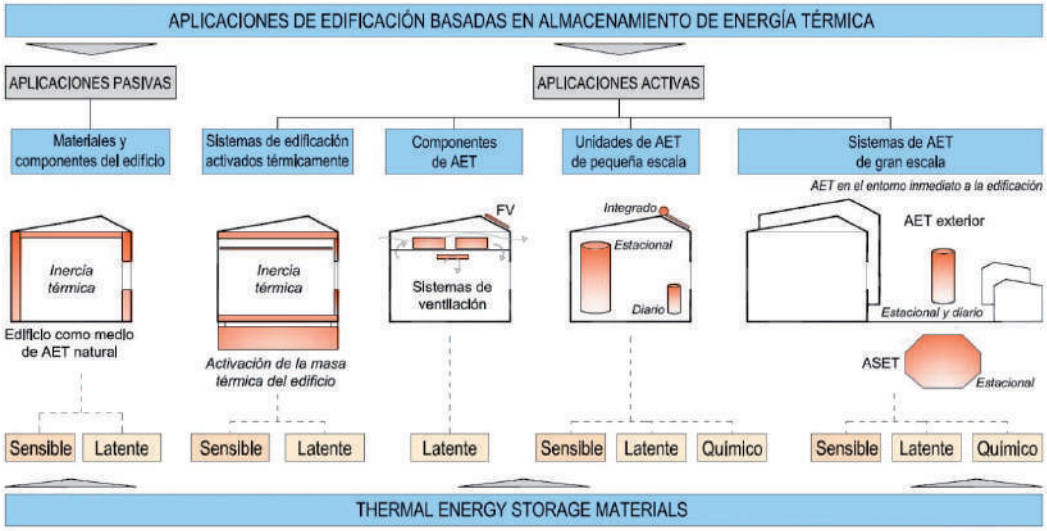


Figura 11. Aplicaciones en edificación basadas en AET en función de la tecnología[58].

Los sistemas de **almacenamiento por calor latente** se basan en el calor latente de fusión de los materiales de cambio de fase (PCM), que es la energía que necesita un cuerpo para cambiar de fase modificando su estructura molecular. Mientras que el PCM cambia de fase, la temperatura se mantiene prácticamente constante. El calor latente es directamente proporcional a la masa y al calor latente de fusión.

Para mejorar la eficiencia de la utilización de la energía, el almacenamiento de calor latente basado en el PCM es bastante útil para la construcción debido a su alta densidad de almacenamiento. Diferentes PCM en el sector de la construcción se han estudiado aplicados de forma pasiva, para suavizar las variaciones de temperatura, y activa, para reducir la demanda energética de calefacción y refrigeración. Por otro lado, en el caso de sistemas de acondicionamiento térmico de edificios, la combinación con intercambiadores de calor resulta una forma atractiva de almacenar una gran cantidad de calor generado durante el funcionamiento discontinuo.

En el caso de los sistemas de almacenamiento térmico por reacciones químicas, éstos proporcionan mayor densidad de energía térmica que los sistemas de calor latente, debido a las reacciones exotérmicas.

Mediante reacciones químicas como la adsorción puede lograrse una mayor densidad de energía, que puede utilizarse para almacenar calor y frío, así como para controlar la humedad. El principio de acumulación termoquímica es la separación de enlaces, que está asociada a la absorción de energía y la recuperación de esta energía por la reacción y contacto de los reactantes previamente separados, asociada con la liberación de energía. Las reacciones pueden ser sólido-sólido, sólido-líquido o sólido-gas, e implican una gran cantidad de calor (entalpía de reacción de cambio alrededor de 0,277kWh/kg[60]). Ejemplos, sílice-agua o bromuro de litio y agua, entre otros. Aunque el desarrollo de estas tecnologías se centra en almacenamiento de energía a medio plazo, los sistemas termoquímicos también tienen la ventaja de almacenar durante periodos largos.

58- J. Lizana, R. Chacartegui, Á. Barrios-Padura, J.M. Valverde, Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación, in: Libro de Actas del 3erCongreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes, 2016.
60- D. Aydin, S.P. Casey, S. Riffat, The latest advancements on thermochemical heat storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41 (2015) 356-367.

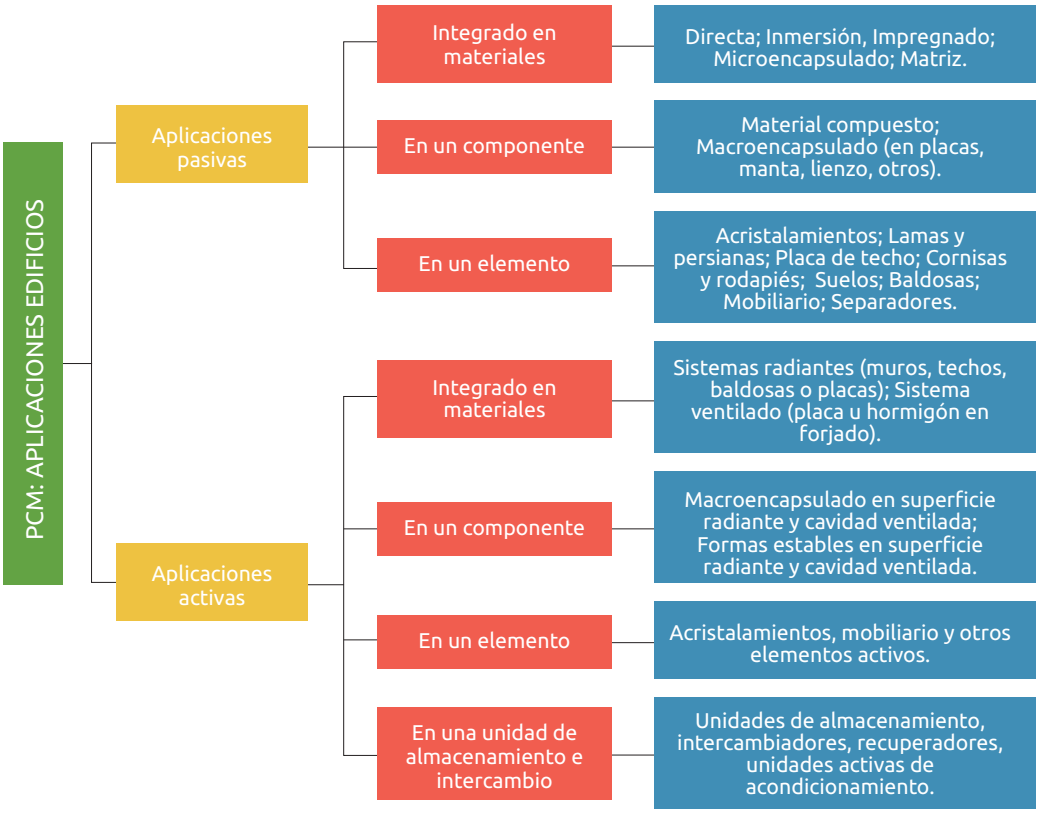


Figura 12. Esquema de aplicaciones de AET pasivas y activas en edificación[59].

Mecanismo de almacenamiento	Medio de almacenamiento	Densidad de almacenamiento (kWh/m^3)
Calor sensible	Agua a 50ºC	29,02
Calor latente	Hidratos (20-150ºC) Fluoruros (500-1000ºC)	≈ 97,22 ≈ 361,11
Reacción química	A temperaturas superiores a 600ºC	≈ 972,22

Tabla 9. Densidad de almacenamiento de energía según tipología.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Almacenamiento por calor latente

El desarrollo de tecnologías de almacenamiento por calor latente es una alternativa que puede reducir el tamaño, cantidad de material asociado y el impacto ambiental, con respecto a los sistemas convencionales. Aunque los materiales de cambio de fase están ya disponibles en el mercado, y algunas de sus aplicaciones también (por ejemplo, en inte-

59- Edwin I.Rodríguez Ubiñas, Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas, in, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2015.

gración con elementos constructivos o tanques de agua caliente), siguen presentando un elevado riesgo técnico debido a la baja conductividad térmica, la estabilidad del material a lo largo de los ciclos, la segregación de fases, el subenfriamiento, etc. Desde 1932, se conocen las primeras pruebas para la implementación de los materiales de cambio de fase en la construcción[61]. Hasta 1948, una investigadora del MIT[62] no logró el primer resultado práctico[63].

A partir del esquema presentado en la descripción de la tecnología, se detallan a continuación algunos ejemplos de aplicación. En sí, el sistema de acumulación por calor latente está bastante desarrollado (TRL 7-8, e incluso TRL 9), pero son algunas de sus aplicaciones las que, en conjunto, están todavía en TRL 7. A continuación se resumen las principales aplicaciones y su nivel de desarrollo actual:

• Gran desarrollo en la incorporación de PCM en componentes de envolvente opaca, como tableros de pared, baldosas de suelo, hormigón, ladrillos, esteras, tejados, tubos e incluso persianas (TRL 9)[64].

• Aplicación de almacenamiento de energía de enfriamiento pasivo o "free-cooling" diseñada para trabajar la diferencia natural entre las temperaturas ambientales más frescas de la noche y las más cálidas del día, y al almacenar la energía fría durante la noche, las ganancias de calor diarias tanto internas como externas pueden manejarse sin ninguna refrigeración mecánica. Consiste en la refrigeración del ambiente de los edificios, industriales o habitáculos mediante el uso de PCM (TRL 8)[65].

• Impregnación de PCM en materiales de construcción porosos, como las placas de yeso, para mejorar el confort térmico (TRL 9).

• Muebles que integran PCM (con cambio de fase entre los 20 y 25 ºC), por ejemplo, una mesa con superficie de madera lisa y una lámina plegada de aluminio anodizado presentada en el Zero Energy Furniture 2015. Según los diseñadores (https://zef-design.tumblr.com/), el uso de esta mesa podría ayudar a reducir en un 60% los costes de calefacción y en un 30% los de aire acondicionado. Esta aplicación está en TRL 7.

• Análisis de envolventes transparentes o de vidrios integrados con diferentes PCM, muestran una reducción de las pérdidas de calor y de las ganancias solares debido a la aplicación de estos materiales. Por ejemplo, la integración de una parafina dentro de la estructura de acristalamiento como fuente de calor durante el invierno mostró una disminución del 20% en el consumo de electricidad[66]. Así pues, esta aplicación está ya en mercado, por lo que tendría un TRL 9, pero su uso no está extendido.

• Métodos de calefacción y refrigeración, en los que se incorporan PCMs, por ejemplo, como parte del suelo radiante. Esta aplicación está en TRL 7-8[67,68]

• Integración en intercambiadores de calor, con varios diseños para climatización por aire y almacenamiento de agua. Como ejemplo un intercambiador

61- A. Oliver, F. Neila y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» Materiales de Construcción, vol. 62, nº 305, pp. 131-140, 2012.
62- Massachusetts Institute of Technology
63- J. Kośny, PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures, Boston, MA. Estados Unidos: Springer, 2015.
64- S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, Energy and Buildings, 94 (2015) 150-176.
65- P. Products, Plus ICE Phase Change Material for Passive Cooling Products, in, 2010.
66- V. Dubovsky, G. Ziskind, R. Letan, Effect of windows on temperature moderation by a phase-change material (PCM) in a structure in winter, Energy Conversion and Management, (2014).
67- V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (2007) 1146-1166.
68- R.L. R. Ansuini, A. Giretti y M. Lemma, Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, Energ Buildings, 43 (2011) 3019-3026.

de calor de aletas y tubos lleno de PCM, cuya temperatura de cambio de fase es de 35-37 °C, como auxiliar de la bomba de calor durante los días más fríos del invierno. La aplicación está más desarrollada en acumulación en tanques (TRL 9), que en su uso en intercambiadores de calor (TRL 8)[69].

• Incorporación de PCM en refrigeradores o congeladores domésticos para lograr una mejora en el rendimiento operativo. Actualmente se alcanzan ahorros de energía de hasta el 12% y una mejora de los COP de hasta el 19%, junto con la consiguiente mitigación de las emisiones. Esta aplicación todavía está en fase de pruebas con TRL 7[70].

A diferencia del almacenamiento térmico convencional, basado en el calor sensible, el calor latente puede ofrecer una mayor densidad de almacenamiento de energía (0,055 kWh/kg), que es más de 3-4 veces mayor que el calor sensible, por lo que aumenta significativamente la capacidad de almacenamiento térmico y reduce el volumen del sistema. Existen numerosos PCM para el rango de temperatura de 0-80˚C, adecuado para las necesidades de calefacción en edificación, y por debajo de los 0˚C para refrigeración. En general, los PCMs tiene valores de conductividad térmica bajos (0,2-1 W/m-K), por lo que se recomienda la adopción de técnicas de mejora de la transferencia de calor para asegurar una mayor eficiencia térmica. El precio actual del PCM a granel para la aplicación de AET cubre una amplia gama, hasta 300 €/kg para PCM metálicos[71] con buenas propiedades; mientras que la mayoría de los PCM orgánicos se comercializan alrededor de 1,5-5 €/kg[72]. Como ejemplo, el coste de una sal de Glauber (material de cloruro de calcio), es bajo (0,10-0,20 €/kg). En este caso, los costes podrían incrementarse, según cantidad de energía almacenada, hasta 70 €/kWh por el coste del contenedor, el intercambiador de calor y otros componentes auxiliares.

Almacenamiento por reacciones químicas

Haciendo revisión de las principales reacciones reversibles, entre los pares de materiales, el gel de sílice/agua, el sulfato de magnesio/agua, el bromuro de litio/agua, el cloruro de litio/agua y el hidróxido de sodio/agua parecen estar en la etapa más avanzada de la investigación. Este tipo tiene la mayor capacidad de almacenamiento; aproximadamente de 8 a 10 veces mayor densidad de almacenamiento que los sistemas de calor sensible, y 2 veces mayor que el calor latente. Pueden almacenar energía térmica por una larga duración con bajas pérdidas de calor, apropiada para el almacenamiento estacional. Sin embargo, el desarrollo está todavía en fases tempranas, y los procesos están restringidos por su novedad (TRL 5) y se ven obstaculizados por reactores complicados, que han mostrado cierta inestabilidad y una débil reversibilidad a largo plazo.

Esta tecnología representa la mejor alternativa debido a la alta densidad energética del material del medio de almacenamiento (100-540 kWh/m^3) con pérdidas de calor insignificantes. Este tipo de sistema de almacenamiento puede ser más compacto que otras alternativas, y la selección de pares de trabajo permite adaptar el AET de acuerdo con los requisitos termodinámicos y las condiciones de funcionamiento. Esta tecnología de almacenamiento puede funcionar a temperatura ambiente o hasta rangos de 400 ˚C. Los materiales utilizados en las reacciones químicas para el almacenamiento tér-

69- Alexis Sevault et al, Latent heat storage for centralized heating system in a ZEB livinglaboratory: integration and design, in: s.N.c.o.Z.E.a.P.E. Buildings (Ed.) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019.
70- R. Elarem, S. Mellouli, E. Abhilash, A. Jemni, Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger, Applied Thermal Engineering, 125 (2017) 1320-1333.
71- H. Nazir, M. Batool, F.J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. 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.
72- H. Nazir, M. Batool, F.J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. 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.

DATOS ENERGÉTICOS				
Propiedad	**Unidad**	**Sensible**	**Termoquímico**	**Latente (PCMs)**
Eficiencia almacenamiento térmico	%	50 - 90	75-100	75-90
Capacidad almacenamiento térmico	kWh / m^3	15 - 200	100 – 540	80 - 110
	kWh / t	10 - 50	120 - 250	50 - 150
DATOS ECONÓMICOS				
Propiedad	**Unidad**	**Sensible**	**Termoquímico**	**Latente (PCMs)**
Coste inversión específico	€ / m^3	1,5 – 2.600	800 – 50.000	800 – 7.700
Coste operación y mantenimiento	€ / kWh	0,1 - 13	8 - 100	10 - 70
	€/kW/año	107	18-53	223

Tabla 10. Resumen de propiedades y características del almacenamiento térmico.

mico tienen un coste alto (10-45 €/kWh)[73] sin considerar el coste derivado de fabricar su aplicación práctica.

En cuanto a centros de referencia, existen tanto a nivel internacional como a nivel nacional. Los proyectos de trabajo promovidos por el Programa de Calefacción y Refrigeración Solar (SHC) y el programa de Conservación de Energía a través del Almacenamiento de Energía (ECES) de la IEA (International Energy Agency) son un referente a nivel internacional. En el caso de España, se incluyen algunos centros de referencia que trabajan en el desarrollo de estas tecnologías, como Fundación CIRCE, Universidad de Zaragoza, GREiA-Universidad de Lleida, CIC energiGUNE, Universidad de Sevilla, CENER, TECNALIA, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Instituto IMDEA Energía, CIEMAT, CSIC, EndeF Solar Solutions, AIDICO o el Centro Tecnológico de Componentes (CTC). En cuanto a proyectos de referencia, que han servido, a lo largo de los últimos años, para desarrollar estas tecnologías, se listan a continuación, tanto proyectos de impacto nacional, como europeo con peso nacional en el consorcio.

Proyecto ECOM4TILE (2011 –2014) - Técnicas avanzadas de almacenamiento de energía térmica con PCM para la climatización de edificios. Material fabricado por la empresa CERACASA S.A., con el que se conseguía un ahorro de más de un 16% en el consumo energético de una vivienda tipo. Financiado por 7th Framework Programme.

Proyecto EMILIE (2013 – 2015) - Mejorar las iniciativas mediterráneas de PYMES hacia la innovación de eficiencia energética en construcción. Desarrollo de la acción conocida como "Glassolating", utilizando PCM en vidrios, consiguiendo ahorros anuales de entre el 5 y el 30%, dependiendo de la localización geográfica y la estación del año. Financiado por Med-Program.
http://www.emilieproject.eu/es/the-project.aspx.

Proyecto TESSe2b (2015 –2019): Uso de PCMs en sistemas de producción de energía para refrigera-

73- H. Nazir, M. Batool, F.J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. 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.

ción, calefacción y producción de agua caliente sanitaria (ACS) de una vivienda unifamiliar para mejorar su rendimiento. El sistema TESSe2b permite reducir el consumo de energía del edificio (15-30%) con un retorno de la inversión de unos nueve años, dependiendo del clima y las características del edificio. Financiado por el H2020 Research Innovation Actions (RIA) de la Comisión Europea, convocatoria EeB – Energy Efficient Buildings.
http://www.tesse2b.eu/;
https://cordis.europa.eu/project/id/680555/es.

Sistemas de calefacción integrados con solar térmica

– MiniStor Project (2019 –2024): En el proyecto MiniStor, desarrollará un sistema de almacenamiento por PCMs integrado en un panel solar híbrido. Para el usuario doméstico, el sistema podría reducir el consumo de energía en un 44%, amortizándose su inversión en 7 años. Para el medio ambiente, si se implementa ampliamente, podría ayudar a reducir cerca de 3.396 t CO_2/año. Se espera que MiniStor tenga una capacidad de almacenamiento térmico 10 veces mayor que los sistemas basados en agua más convencionales. Financiado por el H2020 Innovation Actions (IA) de la Comisión Europea, convocatoria EeB – Energy Efficient Buildings.
https://cordis.europa.eu/project/id/869821/es;
http://ministor.eu/.

Proyecto RESTRUCTURE (2011 –2016). Aplicaciones termoquímicas innovadoras para almacenar energía térmica a temperatura elevada. A fin de incrementar la utilidad de la generación energética solar, es necesario que este tipo de tecnología satisfaga la demanda incluso cuando el sol no brilla. A través de una iniciativa apoyada por la Unión Europea, se introdujo una tecnología mejorada con la que almacenar energía térmica durante las horas de luz diurna. Financiado por 7th Framework Programme– Energy.
https://cordis.europa.eu/article/id/151305-innovative-concept-for-thermochemical-applications-to-store-high-temperature-heat-for-later-u/es.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

A partir de la publicación en mayo 2018 de la Directiva Europea 2018/844/UE, se establecen, para el sector edificación, unos indicadores y objetivos intermedios a los de 2030 y 2040 establecidos en el ERESEE 2020[74], incluyendo también los objetivos de descarbonización del parque inmobiliario para 2050 en el PNIEC. Según la información que recogen estos documentos, los objetivos e indicadores de actuación en el sector edificación se resumen en la siguiente tabla.

Propiedad	Año 2020	Año 2030	Año 2050
Vivienda nueva[75]	70.000 ud/año	180.000 ud/año	180.000 ud/año
Viviendas existentes principales[76]	18,77 millones	+1,24 millones	+3,22 millones
Viviendas existentes principales con calefacción	16,8 millones	--	--
Viviendas por mejorar envolvente térmica	23.402 edificios a rehabilitar[77]	1,2 millones	3,6 millones
Viviendas por mejorar en instalaciones térmicas		3 millones	9 millones
Superficie edificios no residenciales	698 millones m^2	--	--
Superficie edificios públicos (AGE)[78]	11,23 millones m^2	--	--
Superficie a mejorar energéticamente edificios públicos (AGE)	--	2,22 millones m^2	9 millones de m^2

Tabla 11. Objetivos sector edificación en España. Fuente: PNIEC.

La previsión de ahorros viene principalmente de la reducción del consumo de calefacción y ACS[79], en línea con la estrategia de descarbonización del parque inmobiliario para 2050.

Según se establece en el MITMA[80] para el ELP[81] 2050 en el sector residencial:

	2020	2030	2040	2050
Consumo energía final (GWh)	172.419	146.025	124.172	108.264

	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2020-2050
Ahorros energía final (GWh)	26.394	21.853	15.907	64.154
Ahorro emisiones CO_2 (miles toneladas)	6.319	5.871	4.653	16.843
Ahorro en calefacción + ACS (GWh)	21.910	20.160	16.609[82]	58.681

Tabla 12. Evolución de los consumos y ahorros en sector residencial. Fuente: ERESEE

El consumo por vivienda en calefacción + ACS en 2020 está en 5.593kWh (el 60,9% del total), siendo el esperado para 2050 en 2.105kWh (42,8% del total).
Para el sector terciario, según el número de actuaciones previstas (ver tabla "Objetivos sector Edificación en España):

	2020	2030	2040	2050
Consumo energía final (GWh)	131.858	114.788	91.703	84.463

	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2020-2050
Ahorros energía final (GWh)[83]	17.069	23.085	7.240	47.395
Ahorro en calefacción + ACS (GWh)	10.109	17.948	6.465	34.524

Tabla 13. Evolución de los consumos y ahorros en sector terciario. Fuente: ERESEE

74- Actualización 2020 de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. Junio 2020. Secretaría general de Agenda Urbana y Vivienda.
75- ERESEE 2020.
76- ERESEE 2020.
77- Datos del Ministerio de Fomento según registro de licencias municipales de obra (https://apps.fomento.gob.es/BoletinOnline/?nivel=2&orden=10000000)
78- Inventario Energético de los edificios de la Administración General del Estado. Transposición del artículo 5 de la directiva 2012/27/UE. Año 2018.
79- Medidas 2.6 (pag-145) y 2.8 (pag-150) del PNIEC.
80- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
81- Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050.
82- Valor superior al estimado en ahorro final debido a que los datos provienen de distintos métodos de cálculo.
83- MITMA a partir del MITERD. Modelo TIMES-SINERGIA para ELP 2050.

En el sector edificación está previsto, según las directrices de la normativa tanto europea, como nacional, que los usos de calefacción y ACS sean los que van a sufrir mayores reducciones, y, por tanto, las medidas determinadas para llegar a esos objetivos van en la misma línea: renovación de equipamiento de instalaciones térmicas o mejora de la envolvente térmica. Por ello, la aplicación de sistemas de almacenamiento, tanto latente, como por reacciones termoquímicas, proporciona un 50% más de eficiencia que sistemas convencionales, ya sea a través de elementos pasivos aplicables a la envolvente, como mediante elementos activos integrados en las instalaciones de calor y frío. El uso masivo, o el completo despliegue de este tipo de tecnologías en la construcción de nuevos edificios o su rehabilitación, podría ayudar a alcanzar antes los objetivos y, según el número de viviendas y superficie edificada que se ha de abordar, generar ahorros de hasta 48.000 GWh en 2030, y acumulados en 2050 de 139.800 GWh, siendo el escenario más favorable la actuación sobre envolvente e instalaciones de 1,2 y 17,4 millones de viviendas respectivamente.

El coste estimado en la primera década (2020-2030) para la rehabilitación de envolvente está previsto en 13.167 millones de €, y la renovación y cambio de instalaciones, en 28.304 millones de €. Los costes en el periodo 2030-2050, en muchos casos, todavía se desconocen por el bajo nivel de desarrollo que tienen. Por ello, se estima que podrían duplicar el coste de estas acciones.

Análisis DAFO

En la tabla 14, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología:

Los materiales que se emplean, tanto para el almacenamiento por calor latente, como por reacciones termoquímicas, son costosos con respecto a materiales convencionales, y en cuanto a implementar en aplicaciones, depende de cuál sea, el coste aumenta y/o no está actualmente en una fase de desarrollo que facilite su penetración en el sector de la edificación.

A su vez, cabe destacar, que cualquier nueva solución o tecnología innovadora en la construcción, está fuertemente limitada al inicio por la falta de capacitación del personal involucrado. Por otro lado, falta un respaldo regulatorio ante soluciones tanto activas como pasivas que integren este tipo de tecnologías. Actualmente, para el cumplimiento del principal reglamento en edificación, el Código Técnico de la Edificación, tanto en nuevos edificios, como en reformas donde se altere una cierta parte del edificio, es necesario cumplir con las exigencias, en materia de eficiencia energética. El cumplimiento de la limitación del consumo, y de la limitación de la demanda (HE0 y HE1) se lleva a cabo a través de la herramienta de certificación energética (HULC[84]), la cual tendría que adaptarse para incluir este tipo de tecnologías y poder simular el efecto que éstas tendrían en el edificio y determinar los ahorros en demanda y consumo, con la correspondiente calificación energética.

84- Herramienta unificada LIDER-CALENER

Debilidades

- Falta de fabricantes en España que integren estas tecnologías en sus productos.
- Necesidad de desarrollo y perfeccionamiento de las tecnologías y soluciones.
- Costes altos y poco competitivos con respecto a soluciones convencionales.
- Falta de apoyo del marco regulatorio para incluir y potenciar soluciones innovadoras.
- Dificultad para incluir estas soluciones en la certificación y calificación energética.
- Falta de conocimiento en el sector de este tipo de tecnologías.
- Altos costes que dificultan la aplicabilidad en el sector residencial.

Amenazas

- Crisis económica.
- Sector de la construcción muy tradicional y poco innovador en vivienda residencial.
- Falta de financiación para la penetración en mercado.
- Malas experiencias en innovaciones previas llevadas a cabo en el sector.
- Falta de información de las tendencias e innovaciones en el sector.
- Mala ejecución del mantenimiento continuo necesario para su buen funcionamiento.
- Falta de capacitación y cualificación de los trabajadores del sector construcción.

Fortalezas

- Ejemplos y pruebas piloto que demuestran el potencial de este tipo de soluciones.
- Propiedades sustancialmente más eficientes que las soluciones convencionales.
- Los sistemas de almacenamiento térmico se integran en soluciones que se utilizan ya en edificios de manera convencional, por lo que no es necesaria una formación muy específica.
- Existencia de algunos fabricantes y proyectos que pueden servir como referencia.
- Necesidad de renovar el parque edificatorio con medidas de mejora de la envolvente y de instalaciones térmicas donde aplicar este tipo de tecnologías.
- Versatilidad de soluciones y de aplicaciones.

Oportunidades

- Activación del sector industrial relacionado con materiales de la construcción e instalaciones térmicas de edificios.
- Gran potencial y trayectoria en innovación en edificios terciarios.
- En línea con las exigencias de edificios cero emisiones y de descarbonización del parque edificatorio para 2050.
- Especialización y cualificación de los profesionales del sector de la construcción.
- Objetivos de mejora en el parque inmobiliario.
- Exigencias derivadas del cambio climático.
- El uso cada vez más extendido de las certificaciones (LEED y BREEAM).
- Mayor concienciación de los usuarios y requerimientos de eficiencia energética.

Tabla 14. Análisis DAFO del almacenamiento térmico a nivel de vivienda o edificio por calor latente y por reacciones químicas.

3.2 Sistemas de producción de energía integrados en fachada (soluciones activas estáticas y dinámicas)

Descripción

La envolvente activa es aquella capaz de generar electricidad o calor mediante instalaciones productoras de energía integradas en los propios materiales de fachada, que también pueden incluir en su diseño estrategias pasivas para la reducción de la demanda energética. De esta tipología de fachadas, las más habituales son las fotovoltaicas, pero cada vez se está investigando más en nuevas técnicas de producción de energía más eficientes.

Los sistemas activos integrados en edificios pueden incorporarse en todas las partes de la envolvente (cubierta, cerramientos verticales opacos, huecos acristalados, elementos sombreantes, etc.) El inconveniente de los sistemas integrados en cerramientos verticales (fachadas o ventanas) es la menor radiación solar incidente frente a las instalaciones fotovoltaicas convencionales en tejados o cubiertas horizontales, siendo estas últimas las que hasta ahora han tenido mayor cuota de mercado.

Sin embargo, los cerramientos verticales tienen ciertas ventajas. Por un lado, permiten integrar los sistemas productores de energía en los propios componentes de fachada reduciendo así el costo, la energía embebida y el impacto ambiental asociado a instalaciones accesorias. Por otro lado, tienen una captación solar con menores variaciones diurnas y estacionales, por lo que pueden contribuir sustancialmente a la generación local de electricidad de forma más homogénea. Además, la superficie de tejados o cubiertas no son suficientes como para generar toda la energía requerida por los edificios actuales, sobre todo si son de gran altura.

Así, los sistemas activos integrados en fachada van a ser esenciales para satisfacer las demandas requeridas según marca el estándar de edificios de energía casi nula (NZEB), y se espera que ganen importancia en los próximos años debido al impulso del mercado por esta directiva de la UE.

Estos sistemas integrados en fachadas se pueden clasificar en tecnologías activas estáticas o tecnologías activas dinámicas:

- Las **tecnologías activas estáticas** son aquellas soluciones constructivas integradas que permanecen inmóviles en la fachada sin variar su morfología ni interactuar con el entorno durante su producción de energía.

- Las **tecnologías activas dinámicas** son aquellas soluciones que implican cierta adaptación de la fachada a las condiciones del entorno. En muchos casos, requieren de mecanismos de seguimiento solar para maximizar el rendimiento de la producción, el cual puede ser “a un eje” o “a dos ejes”, y se puede realizar mediante control con sensores solares, o bien de forma teórica mediante algoritmos astronómicos programados que calculan la posición del sol según la hora, el día del año, orientación de fachada y latitud del emplazamiento del edificio.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Tecnologías activas estáticas

Hasta ahora, la aceptación en el mercado de la integración de sistemas activos en edificios se ha visto obstaculizada por las dificultades de la industria para proporcionar soluciones que cumplan con las demandas clave como la estética, flexibilidad en el diseño y rentabilidad. Aunque el rápido desarrollo mundial de estas tecnologías ha impulsado la aparición de nuevos fabricantes y arquitectos que incorporan diseños con sistemas integrados en fachadas, los módulos fotovoltaicos actuales siguen siendo una solución poco eficiente que impide el pleno aprovechamiento de un sistema integrador.

Por ello, los estudios e investigaciones actuales están tratando de mejorar el rendimiento de estos sistemas, fundamentalmente fotovoltaicos, buscando nuevos materiales con mayor eficiencia, grado de transparencia, fácil fijación, mayor vida útil y menor impacto ambiental, a unos costes de fabricación competitivos.

A continuación, se listan algunos de los proyectos de innovación que se están llevando a cabo a nivel europeo en esta dirección, junto con su objetivo de desarrollo a alcanzar:

***Proyecto* Tech4Win** (2019 –2022) - Desarrollar prototipos de ventanas fotovoltaicas con notables mejoras en transparencia y calidad visual, aprovechando la región del IR, y a menor coste, empleando polímeros orgánicos semiconductores en lugar de materias primas críticas[85]. Financiado por el H2020 http://www.tech4win.eu/

***Proyecto* CUSTOM-ART** (2020–2024) - Desarrollar la próxima generación de módulos fotovoltaicos integrados en edificios basados en tecnologías de película fina inorgánica rentables basados en materiales de kesterita abundantes en la tierra. Financiado por el H2020
https://cordis.europa.eu/project/id/952982/es

***Proyecto* BIPVBOOST** (2018–2022) - Reducir los costes de integración fotovoltaica en edificios (BIPV) mediante la implementación de planes de trabajo para la reducción de costes a corto y medio plazo a lo largo de toda la cadena de valor. Financiado por el H2020 https://bipvboost.eu/

***Proyecto* Solar-Win** (2019–2021) - Escalado industrial, la validación en condiciones de funcionamiento real y la comercialización de ventanas fotovoltaicas (PV) transparentes y no intrusivas de próxima generación. Financiado por el H2020
https://cordis.europa.eu/project/id/870004/es

***Proyecto* ENVISION** (2017–2022) - Desarrollo de productos que generen energía en todas las superficies de la envolvente (transparentes y opacas) con técnicas híbridas (térmica y eléctrica) que sean estéticas e invisibles, modulares y de fácil colocación con sistemas de posicionamiento click-on. Financiado por el H2020
https://cordis.europa.eu/project/id/869366/es

A continuación, en la siguiente tabla se recogen algunos ejemplos de soluciones estáticas desarrolladas hasta ahora por empresas o start-ups a nivel nacional e internacional que están investigando sobre nuevos productos en este campo.

85- El silicio metalúrgico, principal componente de las células fotovoltaicas actuales, se obtiene a partir de procesos costosos energéticamente a partir de cuarzo ultrapurificado por transformación química a 1900ºC. Por ello, la UE lo tiene recogido en su catálogo de materias primas críticas a controlar por estar en peligro de agotamiento o bien porque su abastecimineto presenta dificultades.

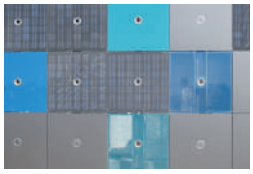
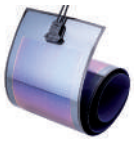
TECNOLOGÍAS ACTIVAS ESTÁTICAS		PROTOTIPOS
Fachadas opacas rígidas de materiales fotovoltaicos o captadores térmicos. ***TRL 7-8*** Eficiencias FV= 10-20% Eficiencias térmicas=40-60% Costes=250-300 €/m^2 [86]	Elementos modulares de fachada que pueden llevar integrados distintos sistemas según la función buscada fotovoltaica (formados por paneles mono o policristalinos) o térmica (formados por captadores solares planos o de tubo de vacío).	Ejemplo de módulos "Biopix[87]"  Incorporados en la Sede de la Agencia Andaluza de la Energía , Sevilla (cubre el 75% de su consumo energético).
Fachadas opacas flexibles de materiales fotovoltaicos orgánicos. ***TRL 6*** Eficiencias FV= 5-8% Costes=150-200 €/m^2 [88]	Paneles solares basados en moléculas orgánicas depositadas sobre finas películas plásticas. Son ultraligeros, ultradelgados y ultraflexibles, adecuados para edificios curvos que no permitan soluciones convencionales, a un bajo coste y rápida instalación, y con materias primas abundantes.	Ejemplo Módulos solares adhesivos HeliaSol[89]  Están investigando en 2 tipos: - módulos solares para rehabilitación de edificios con adhesivo en la parte trasera - soluciones integradas para materiales de construcción para obra nueva.
Fachadas translúcidas fotovoltaicas y térmicas. ***TRL 6-7***	Acristalamiento compuesto por una lámina fotovoltaica y una cámara de agua que aprovechan la parte visible de la radiación solar para la generación eléctrica y la energía infrarroja es absorbida por el agua que es transportada por un sistema cerrado de circulación hasta depósitos de inercia para la climatización integral del edificio. La lámina fotovoltaica transparente produce energía eléctrica para el autoconsumo del edificio o inyección a la red eléctrica.	Ejemplo de producto intelliglass [90] Incorporado en la Facultad de Periodismo UCLM, Cuenca, con ahorros del 80% en climatización. **Imágenes disponibles para consultar en su web** (http://www.intelliglass.com)
Ventanas con acristalamiento fotovoltaico. ***TRL 6-7*** Eficiencias FV = 5-6% Costes=150-200€/m^2 [91]	Tecnología basada líquidos fotovoltaicos orgánicos aplicado en forma de capas ultrafinas como recubrimiento de cualquier superficie transparente (vidrio y plásticos flexibles). Presentan alta transparencia y calidad visual en la región visible, generando eléctricidad aprovechando la región del infrarrojo. Fabricación a bajo costo empleando polímeros orgánicos en lugar de materias primas críticas.	Ejemplo Ventanas SolarWindow [92] Estiman recuperaciones de inversión en plazos cortos. Tecnología pendiente de patente. Lanzamiento a gran escala en los próximos 10 años. **Imágenes disponibles para consultar en su web** https://www.solarwindow.com/)

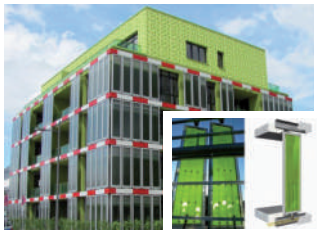
Tabla 15. Tecnologías activas estáticas. Prototipos precursores.

86- Costes medios aproximados proporcionados por el fabricante Onyx Solar https://www.onyxsolar.es/
87- Estudio RLA (Ruiz-Larrea & Asociados) ruizlarrea.com/
88- Costes medios aproximados proporcionados por el fabricante Heliatek https://www.heliatek.com/
89- https://www.heliatek.com/
90- http://www.intelliglass.com
91- Costes medios aproximados según estimaciones del Proyecto Tech4Win de H2020. http://www.tech4win.eu/
92- https://www.solarwindow.com/

Tecnologías activas dinámicas

Como ya se ha comentado, los sistemas activos estáticos tienen limitado el potencial de producción de energía debido a su carácter fijo. Para mejorar su rendimiento, es necesario investigar en soluciones móviles, ya que el seguimiento solar puede mejorar el rendimiento de un módulo fotovoltaico hasta en un 30-40%[93] anual, en comparación con un módulo de orientación fija. Por ello, las investigaciones a medio-largo plazo van a ir dirigidas no sólo a mejorar la eficiencia de los materiales, sino también hacia el empleo de sistemas dinámicos que permitan a las envolventes adaptarse a las condiciones exteriores en tiempo real, controlando la energía que pasa al interior para reducir las demandas de energía y garantizar el control interno, antes de realizar su función de producción.

En la siguiente tabla, a modo de ejemplo, se muestran algunos casos piloto innovadores y técnicas surgidas hasta ahora en esta dirección:

TECNOLOGÍAS ACTIVAS DINÁMICAS		PROTOTIPOS
Fachada de concentración solar integrada (FCSI). ***TRL 6***	Consiste en un muro cortina con receptores fotovoltaicos de concentración en forma de pirámides de vidrio con seguimiento solar. El sistema también aprovecha la energía térmica captada por los prismas de vidrio para su uso en los sistemas de calefacción y refrigeración del edificio mediante intercambiadores de agua o aire. Además de la generación eléctrica y el aprovechamiento de energía térmica, reduce la ganancia solar directa y mejora la iluminación natural difusa. Las investigaciones indican que sus altas eficiencias permitirán retornos de inversión inferiores a los de los sistemas solares existentes[94].	Prototipo de fachada con tecnología de concentración FCSI, en YALE Center for ecosystems in architecture[95] . **Imágenes disponibles para consultar en su web** (https://www.cea.yale.edu/research-solar)
Fachada bioactiva con microalgas . ***TRL 7***	Formadas por paneles con agua y algas en su interior, donde se genera calor y energía mediante un proceso bioquímico, y que además proporciona aislamiento térmico y acústico. El calor generado se envía a un acumulador térmico donde se genera agua caliente para ACS y calefacción del edificio. En verano, la mayor exposición solar hace que las microalgas crezcan oscureciendo los paneles y proporcionando sombra en el interior. Por último, las algas que se van generando como fruto de la radiación solar, se extraen de forma periódica para ser fermentadas en una planta externa dando lugar a biogás empleado en la generación de electricidad.	 Edificio experimental BIQ (Bio Intelligent Quotient, Hamburgo[96]
Fachadas activas con recurso eólico. ***TRL 6***	Este tipo de envolventes utilizan el estímulo del viento exterior como generador de energía, sin necesidad de aerogeneradores difíciles de integrar en fachadas. Estos sistemas se basan en pequeños apéndices móviles que revisten la fachada, cuyo movimiento produce electricidad por efecto piezoeléctrico de los materiales empleados (capacidad de adquirir polaridad eléctrica cuando son sometidos a tensiones mecánicas). Esta nueva tecnología integrada genera electricidad con una leve corriente de aire y puede aplicarse a la mayoría de edificios.	 Prototipo de fachada activa piezoeléctrica. Strawscraper Söder Torn piezoeléctricas[97].

93- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., et al. 2009. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and sustainable energy reviews.
94- Dyson, A. H., Stark, P. R. H. and Jensen, M. K. 2007. Integrated concentrating (IC) solar façade system.
95- YALE Center for ecosystems in architecture, https://www.cea.yale.edu/research-solar
96- ARUP, Firm of designers, planners, engineers and architects, https://www.arup.com/
97- Empresa sueca Belatchew Arkitekter. https://belatchew.com/en/projekt/strawscraper/

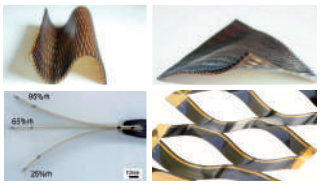
Madera como soporte flexible de seguimiento solar fotovoltaico autónomo. ***TRL 6-7***	La propiedad higroscópica de la madera hace que los paneles de madera tratados de cierta manera se doblen en una forma predeterminada sin el uso de ninguna fuerza mecánica. Esto se puede aplicar para sistemas formados por estructuras de madera combinadas con láminas fotovoltaicas de película delgada como método simple, de bajo costo y ligero para el seguimiento solar, de forma autónoma a lo largo del día en función de los cambios de humedad relativa sin necesidad de motores o controles adicionales, aportando sombreamiento y eficiencia de producción.	 Prototipos de fachada fotovoltaica con actuadores de madera [98,99,100]
Elastómeros dieléctricos como material de seguimiento solar fotovoltaico autónomo. ***TRL 6-7***	Este tipo de tecnología consiste en el uso de un material flexible (elastómero dieléctrico) en forma de entramado que recubre el exterior del edificio. Estos elastómeros van cambiando gradualmente al variar su temperatura, expandiéndose cuando se calientan y contrayéndose al enfriarse sin necesidad de elementos auxiliares. El uso de este tipo de materiales en fachadas junto con materiales fotovoltaicos permite optimizar la generación eléctrica aportando a su vez sombreamiento, adaptándose de forma eficiente según las condiciones interiores y exteriores en cada momento.	Prototipo de fachada homeostática, abierta y cerrada[101] **Imágenes disponibles para consultar en su web** (https://technologyinarchitecture.com/homeostatic-facade/)
Actuadores de silicona para el seguimiento fotovoltaico. ***TRL 7***	Consisten en láminas fotovoltaicas de película delgada adheridas a láminas de aluminio cuyo movimiento es producido por actuadores ligeros de silicona, que se van deformando y cambiando su inclinación en función de la hora del día, al hacer pasar por ellos aire a presión. Estos sistemas se plantean como soluciones simples, de bajo costo y ligeras con buena aplicación para la mayoría de fachadas y obras de rehabilitación, aportando sombreamiento y eficiencia de producción eléctrica.	 Prototipo de fachada fotovoltaica con actuadores de silicona[102]

Tabla 16. Tecnologías activas dinámica. Ejemplos de prototipos precursores.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Dada la gran diversidad de edificios y contextos urbanos que presentan las ciudades españolas (altura, compacidad, sombreamientos entre bloques, fachadas útiles al exterior, orientaciones adecuadas para la captación solar, etc.), resulta complicado realizar una estimación global genérica de producción y ahorro esperables con la incorporación de sistemas integrados activos en el parque de edificios.

Para ello, sería necesario realizar estudios específicos a escala de ciudad o barrio, que permitieran identificar en detalle el potencial de producción energética real de los edificios según las particularidades de cada caso analizado.

De cara a obtener un valor orientativo de ahorros potenciales para el periodo 2030-2050 conseguidos con la generación de energía en superficies de fachada activa incorporada al parque inmobiliario de ese periodo, tanto en el sector residencial como en el sector terciario (público y privado), se ha establecido una serie de supuestos para el cálculo:

En primer lugar, se ha partido de que han sido alcanzados los objetivos establecidos en el PNIEC 2021-

98- Mansoori M., Kalantar N., Creasy T., Rybkowski Z. (2019) Adaptive Wooden Architecture. Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior.
99- Lamoureux, A., Lee, K., Shlian, M., et al. 2015. Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking, Nature communications.
100- ETH Zurich, http://www.honr.ethz.ch/en/the-group/facade/wooden-bilayer.html
101- Architectural material technologists firm Decker Yeadon, https://technologyinarchitecture.com/homeostatic-facade/
102- Arquitectura y sistemas de construcción, ETH Zurich, www.honr.ethz.ch

2030[103] de enero 2020 en materia de rehabilitación energética de edificios residenciales y de sector público, con una tasa de rehabilitación de envolventes térmicas de un total de 120.000 viviendas/año.

A partir de ahí, para la estimación de la superficie de fachada útil en la que integrar envolventes activas en el periodo siguiente 2030-2050, y por tanto poder calcular el potencial de ahorro conseguido con esta medida, se ha continuado con el objetivo del PNIEC de rehabilitación de edificios del periodo anterior empleando a su vez datos publicados en la ERESEE 2020[104] en cuanto a previsión de vivienda de obra nueva construida (180.000 viviendas/año) y de consumos energéticos esperados en el sector residencial para ese periodo.

En la tabla 17 se recoge el resumen de los datos de partida recogidos de fuentes oficiales.

A partir de estos datos, de cara al cálculo de producción eléctrica y costes por incorporación de fachadas activas, se han tomado una serie de supuestos adicionales necesarios:

• **Radiación solar incidente en superficie de fachada (kWh/m²año):** El valor tomado se ha calculado partiendo del valor sobre superficie horizontal (0°) correspondiente a localización geográfica de Madrid (1.787 kWh/m²año) empleando la base de datos del PVGIS[106], y se ha corregido a una inclinación de 90° tomando el promedio de las captaciones recibidas para las orientaciones N, S, E y O.

• **Superficie por vivienda (m²/vivienda):** se ha tomado un valor promedio de 90m² a partir de la consulta de la superficie mayoritaria de las viviendas españolas de la web del INE.[107]

• **Superficie de fachada al exterior útil para la integración de sistemas activos por superficie construida:** se ha tomado un coeficiente medio de 0,75 m² fachada exterior/m² construida considerando que el 40% de éstas son superficies acristaladas y el 60% restante son cerramientos opacos. Para asumir estos datos se han consultados planos de edificios reales de distintos contextos y se han sacado valores promedios.

• **Rendimiento de Conversión Eléctrica (%):** Dada la falta de madurez actual de las tecnologías integradas más novedosas presentadas en este informe (TRL 6), se ha optado por adoptar un escenario conservador y optar por el sistema más consolidado,

	Consumo Residencial (GWh)	Viviendas totales (uds)	Viviendas con fachadas activas integradas (uds)
2020-2030	146.025	20.017.505	-
2030-2040	124.172	21.014.400	3.000.000
2040-2050	108.264	21.993.343	6.000.000
	*Datos tomados del ERESEE 2020 [105]		** Considerando el ratio de 120.000 viviendas rehabilitadas/año del PNIEC y el de 180.000 viviendas nueva/año del ERESEE 2020.*

Tabla 17. Datos recopilados del ERESEE 2020 sobre previsiones para el periodo 2030-2050.

103- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (Enero 2020).
104- Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética del Sector Residencial en España (Junio 2020).
105- Fuente original: MITMA a partir de estadísticas del MITMA, INE, Ageing Report de la Comisión Europea, PNIEC.
106- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis
107- INE, Encuesta Continua de Hogares (ECH). Número de hogares según tamaño de hogar y superficie útil de la vivienda, datos referidos al valor medio del periodo (2013-2019).

como es el fotovoltaico activo estático (TRL 7-8), con un rendimiento medio del 20% (fruto de la mezcla de tecnologías que podrían emplearse película delgada, orgánicas, de silicio policristalinos, etc.). Para las superficies acristaladas se ha tomado un rendimiento del 10%[108].

• **Costes de los sistemas activos integrados:** tanto para fachadas opacas como para superficies acristaladas se ha tomado un coste medio de 150€/m^2 de envolvente con sistema integrado.[109]

• **Factor de corrección (%):** a la producción estimada se le ha aplicado un factor de corrección del 20% asociado a todas las desviaciones inherentes a la hora de hacer estimaciones de este tipo para contextos reales distintos, como son problemas de sombreamiento entre bloques, distintas radiaciones solares según el área geográfica, reducciones en rendimientos de los sistemas de producción a lo largo del tiempo, etc.).

Con todas estas consideraciones se ha obtenido un ratio de generación eléctrica de 150 kWh/m^2 de fachada activa y año. Así, partiendo de este coeficiente se ha pasado a calcular los valores totales acumulados para el periodo 2030-2050 objeto de estudio, que se recogen en la tabla 18.

Según estos resultados, con la incorporación de sistemas activos integrados en fachada a lo largo del periodo 2030-2050 el ahorro de energía final total correspondiente a la generación de estos sistemas sería de unos 91.000 GWh totales acumulados, suponiendo una cobertura del 24,5% del consumo total del sector de residencial durante la década 2030-40, y del 56,2% del consumo total de la década de 2040-50.

En cuanto a los costes de incorporar este tipo de envolvente integrada tanto en las viviendas rehabilitadas como en las de obra nueva, el abordar estas medidas supondría un desembolso total de unos 60.750 millones de € totales a lo largo de todo el periodo.

Sector Residencial (Rehabilitaciones y Obra nueva)				
AÑO	Consumo Total (GWh)	Generación en fachadas activas (GWh)*	% cobertura del Consumo total*	Costes totales por incorporación de fachadas activas (Millones€)*
2030-2040	124.172	30.396	24,5%	30.375
2040-2050	108.264	60.792	56,2%	30.375

Tabla 18. Generación eléctrica de la integración de fachadas activas y costes asociados a rehabilitación del sector residencial en el periodo 2030-2050.

108- Rendimientos tomados de las estimaciones esperables para 2030 aportadas por los fabricantes consultados (Onyx Solar y Heliatek).
109- Coste tomado de las estimaciones esperables para 2030 aportadas por los fabricantes consultados (Onyx Solar y Heliatek).

Análisis DAFO

En la tabla 19, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología.

Actualmente, el principal inconveniente de las fachadas activas para su introducción a gran escala en edificios de energía casi nula (NZEB) son los costes de fabricación, las prestaciones visuales, rendimientos y la facilidad de instalación.

Debilidades

- Necesaria inversión en I+D para perfeccionamiento de estas tecnologías.
- Falta de experiencia y cualificación de los profesionales del sector.
- Altos costes y poco competitivos con respecto a soluciones convencionales.
- Falta de apoyo del marco regulatorio para incluir y potenciar soluciones innovadoras.
- Dificultad para incluir estas soluciones en la certificación y calificación energética.

Amenazas

- Crisis económica.
- Falta de financiación para la penetración en mercado.
- Malas experiencias previas poco eficientes.
- Mala ejecución del mantenimiento continuo necesario para el buen funcionamiento.
- Necesidades de formación y del personal del sector.
- Poca comunicación y trabajo conjunto entre los actores involucrados (fabricantes, arquitectos, constructores, etc.).
- Sector tradicional, con mucha inercia y cambio de tendencia lento.

Fortalezas

- Edificios piloto existentes que demuestran el potencial de estas tecnologías.
- Apoyo institucional para cumplir con los objetivos de NZBE.
- Concienciación por la necesidad de la transición energética en el parque inmobiliario pese a los costes.
- La evolución del clima peninsular, cada vez con más horas de insolación debido al cambio climático hacen más atractivas las tecnologías solares como vías de suministro.

Oportunidades

- Activación del sector industrial con la generación de nuevos productos de alta tecnología.
- Activación del sector de la construcción.
- Aumento de la especialización de los profesionales del sector.
- Mejora de la cualificación del personal.
- Mejora y renovación del parque inmobiliario.
- Generación de nuevos puestos de trabajo en áreas nuevas.
- Reducción de emisiones y consumos energéticos en edificios residenciales y terciarios.

Tabla 19. Análisis DAFO de los sistemas de producción de energía integrados en fachada.

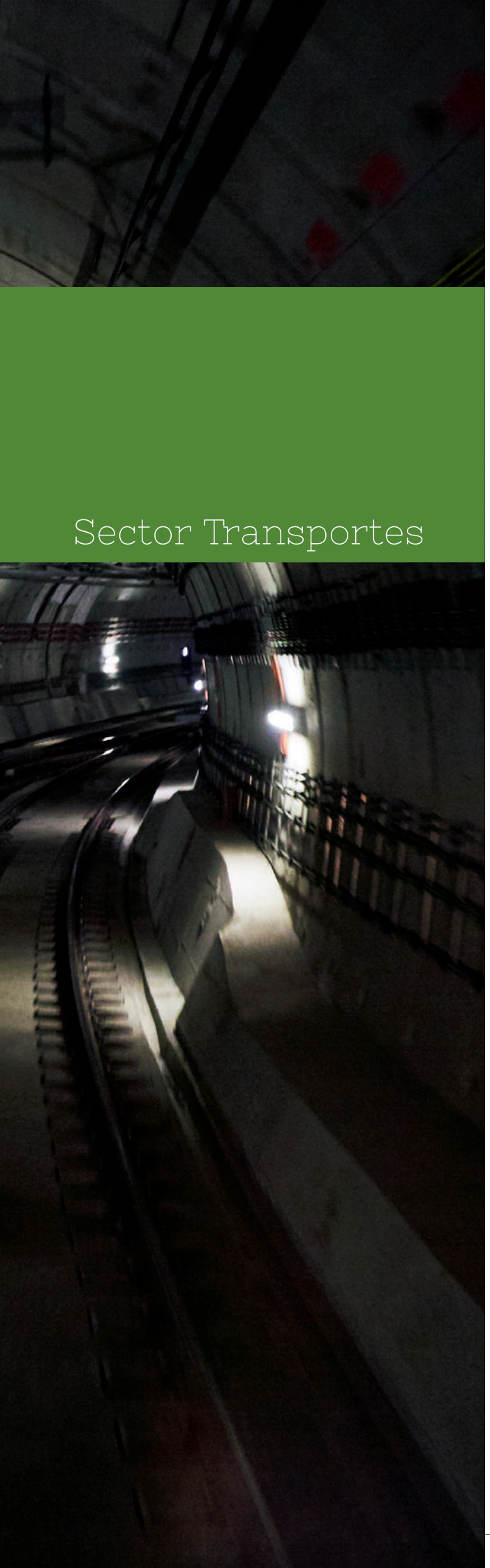
En el caso de las fachadas dinámicas se añade además el inconveniente de la complejidad técnica de los actuadores de seguimiento solar y el mantenimiento requerido debido a su complejidad mecánica[110]. A pesar de la eficacia documentada del seguimiento solar, esos sistemas no se han aplicado ampliamente debido a los altos costos y, a menudo, a las estructuras complejas y engorrosas que añaden un peso sustancial al sistema fotovoltaico inicial.

Aunque esté demostrada la reducción del consumo en edificios con fachadas de este tipo, habrá que esperar unas décadas más para verlas implantadas en todos los edificios de nueva construcción, ya que estas envolventes son más caras que las convencionales, con una inversión inicial elevada, que hace que a día de hoy sea poco asumible en la mayoría de edificios.

Además, hay que señalar que, cualquier tecnología innovadora en la construcción, tiene complicada una rápida penetración si no va acompañada de una capacitación del personal involucrado. También es un problema la falta un respaldo regulatorio ante soluciones que integren este tipo de tecnologías activas en cuanto a la limitación del autoconsumo actual.

110- Team of ETH Zurih. 2016. Chasing the sun. Revue Technique Luxembourgeoise, 2016

04 Sector Transportes



Sector Transportes

4.1 Gemelos Digitales de Movilidad

Descripción

La digitalización está transformando al sector del transporte. No sólo con la aparición de nuevas tecnologías y servicios, como los vehículos conectados y autónomos (CAVs), la infraestructura inteligente, y los modelos de negocio de tipo Mobility-as-a-Service (MaaS), sino también al introducir nuevos patrones de comportamiento basados en el teletrabajo y las compras en línea[111]. La suma de dichos cambios conlleva nuevas tendencias de movilidad urbana que, junto con la necesidad de priorizar el uso de los modos más sostenibles (transporte público, bicicleta y caminar), requieren de la implementación de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) que integren de manera efectiva una perspectiva multimodal, con el fin de asegurar una movilidad fluida e ininterrumpida de pasajeros y mercancías a través de toda la red, de manera optimizada en términos de tráfico, rendimiento energético e impacto ambiental.

En este sentido, los Gemelos Digitales de Movilidad ocupan un papel estelar para hacer realidad, tal y como describe la hoja de ruta a 2050 de la Comisión Europea (CE)[112], "un entorno de transporte en el que una persona o una mercancía puede ser desplazada desde el origen hasta el destino cuando sea necesario, en un tiempo fiable y con un nivel adecuado de confort, sin tener que elegir un medio de transporte específico. Los diferentes medios de transporte no afectarán la calidad del servicio de movilidad, que será adquirido por el usuario como un paquete 'todo incluido', en un entorno sin fisuras y sin múltiples interfaces".

111 - MOMENTUM H2020 (2019) Challenges and opportunities for Transport Planning and Modelling.
112 - TRIMIS (2016) STRIA Roadmap: Network and Traffic Management Systems.

Dicha visión supone la convergencia, dentro del concepto de Gemelos Digitales de Movilidad, de diversos desarrollos del tipo ITS cooperativos (o C-ITS[113]), que en su conjunto permitirían la creación de representaciones digitales del sistema de movilidad urbano que simulen el comportamiento de los flujos de personas y mercancías, inclusive ante eventos disruptivos. Se trata entonces de simulaciones altamente fiables de la red de transporte, a nivel del individuo y su trayectoria, que habiliten, entre otros, la monitorización en tiempo real de todos los modos de transporte y servicios de movilidad, la gestión automatizada del tráfico, la predicción y control automatizados de eventos. En general, esta tecnología hará posible la optimización en tiempo real de la demanda y la oferta bajo criterios de movilidad sostenible, basada en la combinación de modelos tradicionales de transporte y técnicas avanzadas de la Ciencia de Datos que aprovechen el Big Data urbano generado por múltiples agentes de movilidad y de otros sectores afines.

La implementación de Gemelos Digitales de Movilidad significa un cambio en la gestión tradicional del tráfico centrada en la optimización del viaje en vehículo privado, hacia un nuevo paradigma multimodal cada vez más presente en las ciudades y que satisfaga la creciente demanda por sistemas de transporte sostenibles basados en modos limpios y colectivos. Esto implica considerar cada viajero o mercancía a ser transportada, independiente del modo, dentro del modelo. En el futuro, se espera un papel activo del usuario dentro de un sistema altamente conectado que garantice la posibilidad de viajar de forma segura y cibersegura, rápida y eficiente, y con la flexibilidad requerida para moverse entre redes locales, regionales, nacionales e internacionales.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

De manera simplificada, el despliegue de Gemelos Digitales de Movilidad depende del desarrollo paralelo de las diversas tecnologías que habiliten, en tiempo real, las siguientes aplicaciones:

- **Captura de datos:** captura continua de procesos urbanos dinámicos, tanto de los vehículos como de individuos dentro de un sistema intermodal.

- **Comunicación de datos:** se trata del Big Data proveniente de múltiples fuentes, tecnologías y agentes de movilidad que requiere ser transmitida y almacenada para su procesamiento posterior. En este sentido, el desarrollo del 5G jugará un papel principal en el desarrollo de la economía digital de Europa. Su despliegue permitirá la conexión de millones de sensores, dispositivos y sistemas. Se espera que la red 5G otorgue soluciones seguras de tipo Vehículo a vehículo (V2V), Vehículo a Infraestructura (V2I) y de transporte multimodal.

- **Procesamiento de datos:** los algoritmos de la Ciencia de Datos y Big Data aplicados en transporte son cada vez más comunes y presentan mayor capacidad de gestionar modelos sofisticados para el tratamiento de volúmenes de datos masivos con resultados más precisos. Algoritmos de tipo aprendizaje automatizado o inteligencia artificial, presentan diversas aplicaciones útiles para el desarrollo de los ITS, con funcionalidades que van desde la agregación y limpieza de datos de diversas fuentes, hasta la generación de modelos para su aplicación en soluciones como detección de objetos, predicción del nivel del tráfico, planificación de rutas y mejora de la seguridad de los vehículos y vías[114].

113 - El documento STRIA Roadmap: Network and Traffic Management Systems incluye todo el sector transporte (aéreo, ferrocarril, marítimo y carretera). Cuando hace referencia al subsector carretera, dicho documento adopta el término C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) que es el utilizado como referencia para el presente estudio.
114 - L. Zhu, F. R. Yu, Y. Wang, B. Ning and T. Tang (2019), "Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 20, no. 1, pp. 383-398.

• **Modelos de transporte (optimización y simulación):** se trata de la evolución de los modelos tradicionales de transporte para responder a nuevos requerimientos que surgen como consecuencia de nuevos servicios y tecnologías del transporte. Por ejemplo, el despliegue de CAVs requerirá de capacidades para simular la interacción entre vehículos autónomos y vehículos normales, inclusive a nivel de comportamiento de los conductores. Los modelos tradicionales serán cada vez más robustos al ser complementados y mejorados a partir de desarrollos propios de la Ciencia de Datos[115].

Actualmente, existen diversos desarrollos que aplican dichas funcionalidades, pero que aún requieren de mejoras para poder operar un ambiente simulado y predictivo en tiempo real a escala urbana, regional, nacional e internacional. Con esto en consideración, el TRL actual de los Gemelos Digitales de Movilidad se estima a partir del nivel de despliegue actual de cada una de estas funcionalidades, tal y como se presenta en la tabla a continuación. Esta información ha sido contrastada con los expertos que colaboran en el presente estudio.

En cuanto a su evolución futura, se prevé un desarrollo continuo de los C-ITS que culmine con el despliegue de Gemelos Digitales de Movilidad en redes de transporte urbanas, nacionales y a escala europea. De acuerdo con la hoja de ruta de los Sistemas de Gestión de Redes y Transporte (NTM[116]) multimodal de la CE[117], para el año 2025 se esperaría la implementación de proyectos demostradores que aprovechen el alto número de vehículos conectados (55%), mientras que sería entre el año 2030 y el año 2035 cuando se logre alcanzar un nivel de desarrollo tecnológico óptimo para su comercialización a gran escala (TRL 9). Tal y como se presenta a continuación, se espera que para el año 2035 la gran mayoría de vehículos (98%) se encuentren contactos a través de aplicaciones ITS. Esta situación permitiría un despliegue acelerado y constante de los sistemas de gestión de transporte, entre ellos los Gemelos Digitales de Movilidad, para alcanzar un 70% en 2035 y un 100% en 2050.

Funcionalidad	Ejemplo de desarrollos	Ejemplo de aplicaciones actuales con TRL 9	TRL actual a escala urbana y en tiempo real
Captura de datos	Sensores, Cámaras con inteligencia artificial, apps, etc.	Gestión del turismo a escala de distrito	6
Comunicación de datos	Servicios en la nube, 5G	Gestión de logística a escala urbana	9
Procesamiento de datos	Machine learning, Data mining, etc.	Gestión de sistemas controlados como naves de logística	5
Modelo multimodales de transporte	Modelos micro/meso/macro	Planificación de transporte a escala urbana.	7
TRL 2020 - Gemelo digital de movilidad			6

Tabla 20. TRL actual de los Gemelos digitales de Movilidad

115 - Papathanasopoulou, V., Antoniou, C., & Koutsopoulos, H. N. (2019). Data-driven traffic simulation models: Mobility patterns using machine learning techniques. In Mobility Patterns, Big Data and Transport Analytics (pp. 263-295). Elsevier.
116 - NTM: Network and Transport Systems.
117 - TRIMIS (2016) STRIA Roadmap: Network and Traffic Management Systems.

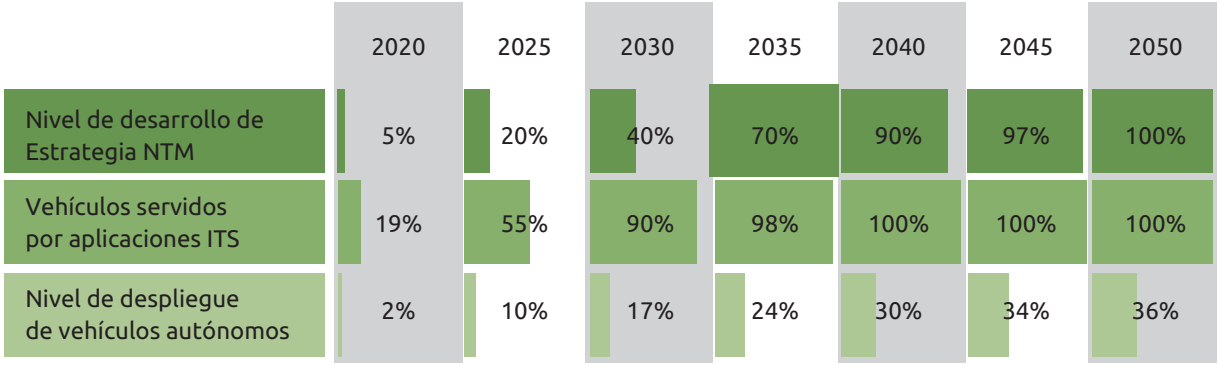


Figura 13. Hoja de ruta estratégica de la EU para el despliegue de sistemas de gestión de redes y transporte multimodal (NTM). Fuente: adaptado de TRIMIS (2016).

Respecto a los costes de desarrollo e implementación de los C-ITS, la hoja de ruta de la CE estima una inversión necesaria entre 1.500 y 2.500 millones de € en I+D+i provenientes de recursos públicos y privados, divididos en 3 fases consecutivas (diseño, optimización y ejecución) hasta 2050. Además, el coste asociado al despliegue de dichos sistemas se estima que podría ser 10 veces más que los costes de inversión en I+D+i[118]. Como contrapartida, la CE espera un impacto positivo, con una ratio coste-beneficio entre 2 y 8 al contabilizar los ahorros en energía, emisiones, tiempo de viajes y accidentes, por ejemplo[119]. En total, si se toma la población urbana de la UE como referencia, los costes de implementación pueden suponer alrededor de 70 € por usuario impactado.

A modo de referencia, el presupuesto total por usuario impactado en el caso de la plataforma *Copenhagen Intelligent Traffic Solution* fue entre 15 € y 35 €[120]. Este proyecto es un caso de éxito que comparte bastantes características incluidas dentro del concepto de los Gemelos Digitales. Se trata de una plataforma que agrega dentro de un cuadro de mando diversas fuentes de información sobre el tráfico en la ciudad de Copenhague. El sistema es capaz de recopilar información sobre las condiciones del tráfico, condiciones climáticas y eventos puntuales, como obras civiles, además de la localización geográfica y anónima de todos los dispositivos móviles que interactúan con la red de puntos de acceso WiFi de la ciudad. Esto permite medir en tiempo real la cantidad de personas y los modos de transporte que transitan en un área específica, útil para la identificación de patrones de movilidad urbana y la proposición de medidas que garanticen una mayor eficiencia y seguridad del sistema de transporte urbano. El cuadro de mando también permite generar modelos para el análisis de dichas medidas, pero carece de funcionalidades como simulaciones predictivas y control automatizado.
Otros proyectos de referencia que están siendo llevados a cabo actualmente son:

Estrategia España Digital 2025. Estrategia nacional para impulsar el proceso de transformación digital.

Proyecto DSS4SharedMobility (2019-2021). Herramientas de Ayuda a la Decisión para la Planificación y Gestión de Sistemas de Movilidad Compartida. FEDER/Comunidad de Madrid.

Proyecto BD4PT (2019-2021). Desarrollar una nueva tecnología capaz de procesar datos de sistemas inteligentes de pago y combinarlos con otras

118 - TRIMIS (2016) STRIA Roadmap: Network and Traffic Management Systems.
119 - Asselin-Miller, N., et al. (2016). Study on the deployment of C-ITS in Europe: Final Report. Report for DG MOVE MOVE/C, 3, 2014-794.
120 - DG ENERGY (2016) Analysing the potential for wide scale roll-out of integrated Smart Cities and Communities solutions.

fuentes de datos (posicionamiento de vehículos, usos del suelo, datos anonimizados de telefonía móvil, etc.), para analizar los patrones de comportamiento de usuarios de transporte público. Financiado por FEDER/MITECO.
www.nommon.es/bigdata4publictransport

Proyecto LEAD (2020-2023) logística de última milla baja en emisiones y flexible ante la economía "bajo demanda" a través de la generación de gemelos digitales urbanos. Proyecto H2020.
https://cordis.europa.eu/project/id/861598

Proyecto MOMENTUM (2019 – 2022) Generación de herramientas de planificación y modelos de transporte para la integración efectiva de las nuevas alternativas emergentes de movilidad urbana. Proyecto H2020.
https://h2020-momentum.eu/

Proyecto HARMONY (2019 - 2022). Su objetivo es desarrollar herramientas para la planificación armonizada del espacio urbano y del transporte útiles para autoridades metropolitanas y regionales. Proyecto H2020. https://harmony-h2020.eu/

Proyecto MORE (2018-2021). Optimización multimodal para el espacio rodado en Europa. El proyecto realizará pruebas en 5 nodos urbanos de la red transeuropea de transporte (TENT-T), para generar herramientas de apoyo para el diseño del espacio rodado por parte de las ciudades. Proyecto H2020. https://www.roadspace.eu/

Proyecto CoEXist (2017-2020) La misión de CoExist es la generación de modelos de transporte y de infraestructura en la vía preparados para la integración de los vehículos autónomos. Proyecto H2020.
https://www.h2020-coexist.eu/

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Los beneficios en materia de Eficiencia Energética vienen dados por la optimización del viaje y del sistema, programación (o reprogramación) inteligente de rutas y horarios para evitar cuellos de botella, por ejemplo, al distribuir la intensidad de los viajes para suavizar el flujo de tráfico y aumentar la eficiencia de toda la red de transporte. No obstante, la cuantificación del potencial ahorro energético de los gemelos digitales no solo depende de factores endógenos, propios del desarrollo tecnológico, sino también de factores exógenos derivados de la demanda de nuevos servicios y funcionalidades por parte de los usuarios.

En términos generales, se estima que la adopción de sistemas NTM podría contribuir aproximadamente en 7% o 10% del objetivo global de descarbonización total del transporte de la UE (60 % para 2050). Se debe tener en cuenta que el desarrollo de sistemas de esta índole no solo se promueve para reducir el impacto ambiental de la movilidad. Se esperan otros beneficios en términos de seguridad y ciberseguridad, optimización de la red y aumento de la rentabilidad del transporte de carga y pasajeros.

En este sentido, y en específico para el transporte terrestre, el despliegue de sistemas basados en C-ITS, como sería el caso de los Gemelos Digitales, supondría una reducción en el consumo de combustible y en la emisión de CO_2 de 1,2% a nivel de la UE. En cuanto a gases contaminantes se estiman menores emisiones de NOx (-0,7%), CO (-0,4%), COV (-0,4%) y Material Particulado (-0,5%). También se esperan beneficios asociados a la reducción en los tiempos de viaje (-3%) y en la tasa de accidentalidad (-7%)[121].

121 - Asselin-Miller, N., et al. (2016). Study on the deployment of C-ITS in Europe: Final Report. Report for DG MOVE MOVE/C, 3, 2014-794.

En el caso de España, si se adopta una mejora de 1,2% en términos de eficiencia energética respecto al consumo final de energía del sector transporte a 2030 (29.059 ktep/año)[122], del cual el 77% corresponde al sector de carretera[123], se podría concluir que los ahorros potenciales en el consumo de energía final para el año 2030 serían alrededor de 270 ktep/año. Igualmente, en términos de emisiones, se podría considerar una reducción anual de 670 kt CO_2 eq, al tomar las emisiones del sector transporte a 2030 (59.895 kt/año) y aplicar el correspondiente porcentaje del sector carretera (93%[124,125]) y la reducción esperada en emisiones (1,2%).

Análisis DAFO

Debilidades

- Ausencia de plataformas o espacios para compartir Información entre agentes.
- Baja tasa de desarrollo de modelos de transporte dentro de los planes de movilidad urbana sostenible.
- Barreras de ciber-seguridad, privacidad de la información y protección de datos.
- Sistema multimodal de complejidad creciente.
- Falta de recursos financieros y humanos necesarios para gestión de Big Data en ciudades pequeñas y medianas.
- El uso de la infraestructura actual se limita a diagnóstico.

Amenazas

- Ausencia de una regulación que garantice el uso colaborativo de los datos.
- Estándares y protocolos para el uso multi-agente y ciber-seguro aún por desarrollar.
- Riesgo de efecto rebote: optimización del tráfico puede aumentar el uso de modos menos eficientes.
- Baja integración de los modos no motorizados, claves dentro de la movilidad sostenible.

Fortalezas

- Interés del sector por avanzar hacia la consolidación de este tipo de sistemas.
- Colaboración público-privada en proyectos de I+D.
- Múltiples aplicaciones reflejadas en mejor calidad de servicios para el usuario.
- Potencial reducción de tiempo de viaje, accidentes, consumo de energía y emisiones.
- El nivel de desarrollo actual de las tecnologías requeridas es prometedor.

Oportunidades

- Marco normativo favorable en términos de movilidad sostenible (Green deal, PNIEC, etc.).
- Demanda social creciente de modos y servicios basados en internet.
- Nuevas capacidades gracias al despliegue de la red 5G.
- Desarrollos del sector de la automoción (CAVs, vehículos eléctricos, etc.) y de infraestructura inteligente (puntos de carga).

Tabla 21. Análisis DAFO de los gemelos digitales de movilidad.

122 - MITECO (2020) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC 2030)
123 - IDAE (2020) Balance de Energía Final 2018.
124 - MITECO (2020) Inventario Nacional GEI.
125 - La diferencia del peso del subsector carretera entre consumo de energía final y emisiones de CO_2 eq se debe a que en la primera se tiene en cuenta el aporte de los vuelos internacionales, y en la segunda no. Se ha comprobado el valor a 2018 entre PNIEC, el balance de energía final de IDAE y el inventario nacional de emisiones para verificar esta diferencia.

En la tabla 21 se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO respecto a los Gemelos Digitales de Movilidad:

El desarrollo de gemelos digitales en movilidad no solo es de interés para el sector, debido a todas las funcionalidades que permitiría aplicar a la gestión del tráfico y la movilidad urbana, sino que también resulta ser una tecnología necesaria para la introducción, bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia, de nuevos modos y servicios de transporte conectados, así como de las nuevas dinámicas de comportamiento asociadas a trabajo y a compras online. Lo anterior requiere superar barreras tecnológicas, legislativas y de colaboración entre los agentes que generan la información y aquellos que gestionan la movilidad en las ciudades.

4.2 Recuperación de energía de frenada, Smart Grids y combustibles alternativos para el subsector Ferrocarril

Descripción

En el sector Ferrocarril, se percibe la descarbonización de la economía como un espacio de oportunidad para la actividad del sector en general. La Red de Infraestructuras de Transporte, por un lado, y la Red Eléctrica, por otro, afrontan la transición bajo claves que presentan puntos de confluencia con este sector.

Además de su naturaleza propia, como infraestructura de transporte, el despliegue existente de la Red de Ferrocarril, y su alto grado de electrificación, ofrece posibilidades de interés para el sector eléctrico en el proceso de transición energética, más allá del propio ámbito de transporte.

Las líneas de trabajo relevantes desde la perspectiva de la eficiencia energética presentan una madurez tecnológica elevada en el ámbito de 'integración con el sistema eléctrico', con un recorrido previo relevante, y un recorrido menor en otros ámbitos energéticos, cuyo sentido es más oportunista y de un menor impacto probable para el propio sector actual.

Almacenamiento de energía en tierra y Smart Grids.

El aprovechamiento de la energía recuperada por frenada es, actualmente, una realidad. Se han propuesto varias tecnologías para poder aprovechar el máximo de esta fuente de energía (subestaciones reversibles, sistemas de almacenamiento de energía en tierra y a bordo, etc.) en función del tipo de instalación ferroviaria (tranvía, metro, cercanías, etc.) y del tipo de alimentación eléctrica que se disponga CA o CC. El objetivo de esta tecnología es evitar que el excedente de energía generada por el frenado regenerativo se disipe, recuperándolo para ser devuelto a la red eléctrica de alta tensión. Esta recuperación tiene diferentes ventajas: ahorro energético, ahorro económico y disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo por lo tanto a la lucha contra el cambio climático. Sin embargo, la energía generada en el frenado solo puede aprovecharse por otros trenes que se encuentren en la misma sección eléctrica. El resto de energía no aprovechada se disipa en las resistencias del propio tren y se pierde. Esta limitación queda solventada con la instalación de un equipo inversor, que habilita la conversión a subestaciones de tracción reversibles en la red convencional, de modo que pueda equiparar su eficiencia energética a la existente en la red de alta velocidad[126].

Es también reseñable que la implementación de esta tecnología lleva intrínseco el desarrollo de redes eléctricas inteligentes o *smart grids*, que suponen uno de los mayores retos en el mundo de la energía eléctrica. Hay que señalar la importancia en cuanto a la eficiencia energética que se conseguiría al implementar estas acciones de forma generalizada.

El objetivo del almacenamiento de energía en tierra es aprovechar la energía regenerada por los trenes a través de la catenaria, en una planta de almacenamiento situada en tierra. Ello permitiría devolverla a dicha línea cuando el sistema ferroviario lo demande. A nivel general, el sistema se compone de tres elementos principales: 1) Módulos de almacenamiento; 2) Electrónica de Potencia; 3) Sistema de Control. Los elementos 2 y 3 pueden considerarse maduros en el momento actual (TRL 9). El módulo de almacenamiento debe ser evaluado para concluir cuál es la mejor tecnología para emplear. En este sentido se prevé analizar la tecnología asociada a Baterías de Ion Litio y de Flujo Redox.

Hidrógeno como combustible alternativo

El objetivo de la tecnología se basa en disponer de vehículos ferroviarios dotados de tracción híbrida. Por una parte, se dispondría de tracción eléctrica pura (similar a la empleada actualmente) para circular en líneas ferroviarias dotadas de electrificación. Por otro lado, se dispondría de tracción basada en pila de hidrógeno que permita circular al tren en líneas sin electrificar, siendo un sustituto natural de la tracción diésel actual.

Los trenes de hidrógeno son competitivos cuando se diseñan para líneas no electrificadas de más de 100 km de longitud. Son especialmente viables para líneas con muy baja utilización (máx. 10 trenes por día) pero también para el transporte de la última milla. Estos trenes se caracterizan por un reabastecimiento de combustible relativamente rápido (menos de 20 minutos) pudiendo funcionar durante más de 18 horas sin reabastecimiento. Los niveles de hibridación (relación entre la pila de combustible y la energía de una batería que se cargaría cuando el tren circula bajo catenaria) son muy flexibles y hacen que los trenes de hidrógeno sean aplicables para una amplia gama de casos de uso: masa de hasta 5.000 t, velocidades de hasta 180 km/h y recorridos de hasta 700 km.

126 - Fuente: Documento de posicionamiento. Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario. Noviembre 2016. Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española.

Talgo, por ejemplo, se encuentra en pleno desarrollo del **tren de hidrogeno** Talgo Vittal-One. A finales de 2021 se realizarán las primeras pruebas en vía, mientras que su puesta en marcha está planificada para 2023[127].

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Almacenamiento de energía en tierra y Smart Grids.

Como se ha comentado, la recuperación de energía de la frenada es una realidad hoy en día, pero no así su almacenamiento en tierra a nivel nacional. En la actualidad, estamos en un TRL7, y se espera que, en el horizonte 2030, la tecnología de almacenamiento ya esté integrada de manera comercial a nivel nacional (TRL9). Cabe tomar como ejemplo la empresa *Japan Railways* East. La crisis energética derivada del accidente de Fukushima llevó al país a un aumento importante de medidas para mejorar la eficiencia energética en las líneas de transporte ferroviario, entre las cuales está el almacenamiento de energía. La tecnología más utilizada en Japón es la de baterías de ión-Litio, conectadas a la catenaria ferroviaria de 1.500 V a través de un convertidor continua-continua para la estabilización de la tensión en catenaria. Según los ingenieros japoneses, la tecnología de baterías en Japón tiene un precio muy competitivo que permite amortizar la inversión en 20 años.[128]

Alineados con esta tecnología, podrían destacarse los siguientes proyectos también relacionados con smart grids:

Proyecto Ferrolinera. Mejora la eficiencia energética del sector ferroviario al recuperar la energía de frenado de los trenes para la recarga de los coches eléctricos. El sistema está protegido mediante patente en España y también por la norma internacional de patentes PCT. http://www.adif.es/en_US/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00072.shtml

Proyecto Train2Car. Desarrollar un innovador sistema de gestión inteligente de la red de continua de los trenes y de los sistemas y dispositivos asociados de Metro de Madrid (subestaciones de tracción, acumuladores fijos, posibles inversores), introduciendo en la red puntos de alimentación a coches eléctricos, de manera que se maximice el aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes en frenadas y la eficiencia global del sistema.
https://www.metromadrid.es/es/quienes-somos/fondos-feder-y-proyectos-idi#panel4

Proyecto Merlin (2016-2019). Basado en la gestión sostenible e inteligente de la energía para sistemas ferroviarios en Europa. Proyecto liderado por la Unión de la Industria Ferroviaria Europea (UNIFE) y con una amplia participación española integrada por Renfe, Adif, CAF. Proyecto financiado dentro del 7º Programa Marco.
https://cordis.europa.eu/project/id/314125

Proyecto E-Lobster (2018-2021) Propone un innovador sistema de gestión de R+G (ferrocarril a red) que, combinado con electrónica de potencia avanzada, podrá reducir las pérdidas de electricidad tanto en la red de distribución de energía como en la red de ferrocarril ligero. Proyecto H2020. http://www.e-lobster.eu/

Proyecto ElecRail. Proyecto basado análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables.
http://www.investigacionffe.es/proyecto_elecrail.asp

127 - Proyecto Talgo Vittal-One. Talgo. https://www.talgo.com/es/-/talgo-tendra-listo-su-tren-de-hidrogeno-en-2023/1.0
http://www.ciemat.es/cargarAplicacionNoticias.do;jsessionid=938657EA9811D933F3989569C1A41506?identificador=632

Hidrógeno como combustible alternativo

La utilización del hidrógeno en el sector ferroviario se encuentra en un TRL 6 a nivel nacional, no así en Europa con el desarrollo de ALSTOM Coradia Ilint[129], en los 65 kilómetros que unen las localidades de Groninga y Leeuwarden en el norte de Países Bajos. Basado en esta experiencia, se calcula que el Coste Total de Propiedad (TCO por sus siglas en inglés) por cada tren al año sería de 6-8 €/km, valor que incluye infraestructura, mantenimiento, operación y depreciación de los trenes[130]. Recientemente, Talgo presentó el que sería el primer prototipo en España de un sistema de propulsión de hidrógeno. Las primeras pruebas de validación en vía están planificadas para finales de 2021[131].

Derivado de que el modelo actual de transporte resulta insostenible, la tendencia es cada vez mayor hacia la descarbonización del sector del transporte. Esto hace que en el escenario 2050, la propulsión diésel pueda tener muy poca presencia en el sector o incluso desaparecer. En este sentido, la primera tendencia se sitúa en apostar por este combustible alternativo en líneas no electrificadas. Actualmente, España cuenta con más de 5.500 km de vías sin electrificar. Para poder circular por ellos, aproximadamente un 13 % de la flota en Renfe es dependiente del diésel, lo que implica un consumo superior a 70 millones de litros de diésel al año. El hidrógeno se plantea como una forma de producir electricidad a bordo del propio tren empleando pilas de combustible, lo que reducirá la dependencia de los combustibles fósiles y eliminará las emisiones contaminantes. De este modo los trenes híbridos que actualmente se emplean en recorridos que no están completamente electrificados se sustituirían por trenes con un único sistema de tracción, el eléctrico, y esta electricidad se produciría a bordo del vehículo mediante pilas de combustible de hidrógeno cuando el tren atraviese tramos de vías no electrificadas.

Se podría afirmar que para el año 2030 se podría disponer de una flota de trenes traccionados por hidrógeno, principalmente en líneas no electrificadas.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Almacenamiento de energía en tierra y Smart Grids.

En esta línea, considerando una subestación energética tipo, podría recuperarse en torno a 1.200.000 kWh/año en todas las líneas electrificadas. En cuanto a la inversión se refiere, una planta de almacenamiento de energía no debería superar el millón de €.[132]

De entre los proyectos alineados con esta línea tecnológica destaca el proyecto europeo RSMES, perteneciente al Programa Tecnológico de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) y en el que participan, además de ADIF, otros administradores ferroviarios europeos. El objetivo del proyecto es identificar la tecnología óptima de almacenamiento para el sector ferroviario. Se plantea un escenario "tipo" consistente en alimentar los servicios auxiliares (eléctricos) de una estación, con la energía almacenada en una planta.

Hidrógeno como combustible alternativo

Sobre la base de las ratios proporcionadas por ALSTOM, considerando un tren, la reducción de emisiones de CO_2 es de 700 t CO_2/año, lo cual equivale a la emisión actual de 400 coches. Por lo tanto, considerando una flota de treinta trenes, la reducción podría ascender a 22.000 t CO_2/año, lo cual es

129 - https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2020/3/el-tren-de-hidrogeno-coradia-ilint-de-alstom-supera-con-exito-sus
130 - Navas, C. (2017) Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) & Roland Berger.
131 - https://www.talgo.com/es/-/talgo-elige-extremadura-para-presentar-su-innovador-sistema-de-propulsi%C3%B3n-de-hidr%C3%B3geno/2.0
132 - Fuente: ADIF: Sección de desarrollo de proyectos I+D.

equivalente a 12.000 coches.

En lo que respecta a proyectos alineados con esta tecnología, destaca el inicio del proyecto europeo FCH2RAIL, recientemente aprobado por la Comisión Europea. El objetivo principal es convertir una unidad de cercanías eléctrica (de RENFE Operadora) en una unidad híbrida dotada de una pila de combustible de Hidrógeno. Posteriormente sería ensayada en la red ferroviaria española (red de ADIF) y en la red ferroviaria portuguesa (red de IP).

Análisis DAFO

A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de estas tecnologías:

El sector del ferrocarril es uno de los sectores más concienciados con la eficiencia energética no solo a nivel nacional, sino también europeo, con alternativas de inversión en función de la tipología de empresa que la impulse (infraestructura ferroviaria o fabricación de trenes) y línea tecnológica a desarrollar.

Debilidades

- Falta de inversiones para la mejora de la red convencional y en la construcción de nuevas infraestructuras y su mantenimiento.
- Normativa actual, en ocasiones, por detrás de los desarrollos tecnológicos.

Amenazas

- Aparición de nuevos medios de transporte sostenibles: autobús eléctrico.
- Mayores exigencias ambientales para el desarrollo de proyectos y presentación de propuestas.

Fortalezas

- Sector muy concienciado con la eficiencia energética y mayoritariamente electrificado.
- Sector cada vez más optimizado a nivel de eficiencia energética.

Oportunidades

- Existe cabida del H2 como combustible en las líneas no electrificadas.
- Desarrollo prometedor en el ámbito del almacenamiento de energía.

Tabla 22. Análisis DAFO de la recuperación de frenada, integración de smart grids y de combustibles alternativos para el subsector del ferrocarril.

4.3 Nuevos materiales y motores más eficientes para el subsector Transporte Aéreo

Descripción

ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation Europe) ha establecido unos objetivos medioambientales muy ambiciosos, recogidos en el Flightpath2050, y un plan para alcanzarlos, recogido en la SRIA (Strategic Research and Innovation Agenda):

- Reducción emisiones CO_2 en un 75 %.
- Reducción emisiones NOx en un 90 %.
- Reducción de la exposición al ruido en un 65 %.
- Cero emisiones en operaciones en tierra.
- Reciclabilidad y uso eficiente de los recursos (diseño, fabricación, mantenimiento y retirada de servicio).
- Uso de combustibles alternativos.
- Comprensión de los efectos de la aviación en el clima.[133]

La asunción por parte del sector aeronáutico de su papel de liderazgo en la reducción del impacto medioambiental de la aviación supone un coste suplementario, tanto en inversiones de I+D+i y coste recurrente, como en industrialización. Este hecho se suma a los compromisos que las empresas aeronáuticas adquieren derivados de la normativa ambiental, dado su carácter transversal y el hecho de ser cada vez más rigurosa y cambiante. Más allá de plantear la necesidad de apoyo para que las industrias puedan cumplir sus requisitos de aplicación ambientales como los relacionados con instalaciones de corrección de la contaminación o eficiencia energética, las organizaciones tienen la necesidad de apoyo para adaptar sus actividades y procesos a los cambios que se producen en dichos requisitos, sin que se vea mermada su competitividad.[134]

En lo que se refiere a eficiencia energética en el sector, derivado de su enorme grado de sensorización, hace que se genere entorno a un terabyte de datos en un vuelo promedio, pero todavía continúa siendo uno de los sectores más contaminantes, derivado del aumento internacional del número de pasajeros hasta 4.000 millones, según "World Bank Group". La planificación de rutas ya puede hacer que los pilotos tomen decisiones en pleno vuelo para reducir el consumo de combustible y, por tanto, las emisiones de CO_2 a la atmósfera, pero lo que posiblemente cambie el futuro de la aviación a nivel nacional e internacional será la automatización completa de las aeronaves (Inteligencia Artificial), la electrificación del sector y la investigación y reciclado de materiales para aligerar el peso de éstas.[135]

A nivel nacional, el aeronáutico siempre ha sido un sector de referencia y de progreso y, en los últimos años, ha disfrutado de un periodo de bonanza. Se trata de una industria que factura cerca de 9.000 millones de € y ofrece puestos de trabajo a 43.000 personas con alta cualificación, y genera 63.000 empleos indirectos.

Su elevado impacto económico y social se debe a que:

- El sector aeronáutico fabrica productos de alto valor añadido y emplea tecnología muy innovadora.

133 - Plataforma Tecnológica Aeroespacial Española.
134 - Retos del Sector Aeronáutico Español. Guía Estratégica. TEDAE. 2015.
135 - LA DIGITALIZACIÓN EN EL SECTOR ENERGÍA TRANSFORMACIÓN TECNOLÓGICA Y ENERGÉTICA. DigitalES, 2019. Asociación Española para la digitalización.

• El nivel de competencia es muy alto, lo que les obliga mantener niveles de competitividad muy exigentes.

• Las demandas del mercado les obligan a realizar fuertes inversiones en I+D+i para estar al día de las nuevas tecnologías y mantener su cuota de mercado.

• Los procesos de fabricación son muy complejos, por lo que la industria aeronáutica demanda trabajadores cualificados y especializados.

• Debido a la gran inversión necesaria para desarrollar este tipo de proyectos, el impacto económico en la zona de influencia es prolongado en el tiempo y garantiza una demanda laboral a largo plazo.

En la actualidad, y derivado de la situación causada por el Covid-19, el sector se ha visto duramente azotado, por lo que se confirma que la I+D+i tiene mucha responsabilidad en el futuro del sector y en hacer frente a sus altos costes energéticos e implicaciones medioambientales.

Materiales metálicos con prestaciones mejoradas

Esta línea tecnológica se basa en la optimización de materiales existentes y en el desarrollo de nuevos materiales y procesos de obtención/fabricación (fundición, forja, conformado, mecanizado, etc.) para mejorar las prestaciones de aleaciones ligeras (fundamentalmente TiAl de segunda generación, titanio y aleaciones base Al) y materiales para alta temperatura (superaleaciones base Ni). Esto incluye materiales estructurales y no estructurales destinados tanto a la aeronave, como a la planta propulsora y los sistemas. Las mejoras en las prestaciones de los materiales permitirán reducir el peso, mejorar la eficiencia, vida y reparabilidad. Todo esto impacta directamente en la reducción de emisiones, consumo de recursos y materias primas.

Materiales poliméricos avanzados

El objetivo de esta tecnología es el desarrollo de materiales compuestos poliméricos multifuncionales y materiales híbridos con propiedades avanzadas para utilización en la aeronave y en los sistemas. Incluye composites de altas prestaciones, composites termoplásticos y termoestables (TPC y TSC), autoreforzados, composites híbridos (polímero-metal y polímero-cerámica), recubrimientos funcionales, etc. La mejora de prestaciones se logrará integrando tecnologías de material, de procesos de obtención y transformación, considerando, además del material, la reducción del impacto ambiental de dichos procesos en todo el ciclo de vida. Las mejoras en las prestaciones de los materiales permitirán reducir el peso, mejorar la eficiencia, vida y reparabilidad. Todo esto impacta directamente en la reducción de emisiones, consumo de recursos y materias primas.

Motores más eficientes, silenciosos y sostenibles

La realidad de esta línea tecnológica pasa por el desarrollo de nuevos sistemas propulsivos y no propulsivos cuyo objetivo sea explotar su potencial en la reducción de peso, ruido y emisiones.

Esto va alineado con el desarrollo de modelos y herramientas de simulación para mejorar la eficiencia y reducir el peso, y nuevos conceptos y funcionalidades de sistemas secundarios de potencia. Cabe destacar, más a largo plazo, la propulsión híbrida con nuevos combustibles.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Nuevos materiales (metálicos y poliméricos)

Algunos de estos desarrollos están en proceso hoy en día, y su horizonte de implementación en el sector se podría estimar de cara a 2030 para cumplir con los objetivos medioambientales establecidos por el sector.

Motores más eficientes, silenciosos y sostenibles

El horizonte de implementación de estas líneas tecnológicas es más amplio y podríamos hablar de 2035 aproximadamente. Como referencia de implementación en el sector y potenciales ahorros, podemos tomar como referencia el nuevo desarrollo de Rolls Royce denominado Ultrafan, cuya versión de última generación será 25 % más eficiente en consumo de combustible que su versión inicial Trent. Este fabricante cree que una aeronave híbrida, más verde y silenciosa, podría estar volando comercialmente en 2030.

Como proyectos de referencia, se pueden nombrar los siguientes:

Proyecto FADO: fabricación aditiva por láser de piezas de grandes dimensiones. Programa FEDER-INNTERCONECTA.
https://www.hydracorte.es/downloads/Fado.pdf

Proyecto EWIRA: EWIRA (External Wing Integration for Regional Aircraft Demonstrator).

La actividad de EWIRA se concentra en la introducción de tecnologías innovadoras de diseño, fabricación y ensamblaje en componentes de ala del demostrador de vuelo FTB#2. El demostrador FTB#2 está liderado por Airbus Defence & Space dentro del consorcio Regional-IADP. El foco de la actividad de innovación se centra en:

- Nuevos conceptos de ensamblaje que reduzcan el tiempo y los costes del proceso.
- Innovación en mecanizado metálico para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.
- Técnicas de diseño innovadoras en fabricación aditiva para piezas críticas.
- Nuevas técnicas de fabricación compuesta centradas en la reducción del número de piezas.
- Tipo de proyecto: Internacional. Comisión Europea - Clean Sky. Horizonte 2020.

Proyecto SINTONIA: Proyecto de I + D del sector aeronáutico dirigido por Boeing Research & Technology Europe S.L. que tiene como objetivo estudiar y desarrollar nuevas tecnologías destinadas a minimizar el impacto ambiental y aumentar la eficiencia de las aeronaves no tripuladas (UAVs) mediante la mejora de su ciclo de vida. Aciturri Composites participa en diversas actividades de proyectos que van desde la investigación de nuevos materiales reciclables y su procesamiento en autoclave (utilizando además técnicas avanzadas de preparación) hasta el desarrollo de herramientas de diseño más eficientes. Para este propósito, Aciturri trabaja en colaboración con una red de otros cuatro centros tecnológicos españoles estrechamente vinculados al sector aeroespacial e industrial: TECNALIA (Guipúzcoa), IMDEA (Madrid), AIMEN (Pontevedra) y CARTIF (Valladolid). Este es un proyecto colaborativo desarrollado por un consorcio nacional fundado y financiado por el CDTI a través del programa CENIT 2009.

Proyecto SUSPIRE: Sustainable Production of Industrial Recovered Energy using Energy Dissipative and Storage Technologies. Proyecto financiado den-

tro del programa marco H2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 680169.
https://cordis.europa.eu/project/id/680169/es.

Proyecto AssAssiNN: Development of a multifunctional system for complex aerostructures ASSembly, ASSisted by Neural Network. Su objetivo es mejorar los ciclos de producción para reducir costes y peso de las aeronaves, mediante el uso de Redes Neuronales, IA, Realidad Mixta y Aumentada y la Robótica Colaborativa. Proyecto financiado dentro del programa Clean Sky 2 y programa marco H2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de n° 886977.
https://cordis.europa.eu/project/id/886977.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

En términos generales, el ahorro en los costes directos de operación para viajes de corta y larga distancia podría oscilar entre 5.000 y 17.000 € por cada kilogramo reducido en el peso de una aeronave. La fuente consultada estima estos valores para un Airbus A320 para vuelos de 600 millas náuticas, en el caso de corta distancia, y de 1.800 millas náuticas, para el de larga distancia[136].

En el marco de la eficiencia en los motores y aligeramiento de aeronaves, Boeing, con el 737 MAX, afirma que el uso de combustible y las emisiones de dióxido de carbono se pueden reducir en un 20 % en comparación con el 737 original y la huella de ruido es un 40 % menor que los aviones de un solo pasillo actuales[137].

Análisis DAFO

El desarrollo de tecnologías asociadas a la eficiencia energética en el sector de la aviación siempre es sinónimo de avance, derivado de los altos costes energéticos del mismo y, actualmente, de la situación delicada que vive a causa de la pandemia COVID-19, cualquier tipo de ahorro es más que significativo. A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de estas tecnologías:

Debilidades

- Situación delicada derivada del COVID-19.
- Transporte de carácter poco sostenible.
- Lograr la combinación "eficiencia-bajo ruido" requiere un alto grado de investigación.
- Los plazos de puesta en el mercado en el sector aeronáutico son largos.

Amenazas

- Entorno socioeconómico actual que no es favorable al transporte aéreo de pasajeros.
- Vehículo eléctrico y, a nivel nacional, TAV (Tren de alta velocidad).

Fortalezas

- Fuertes inversiones anuales en I+D.
- Alto impacto en el resto de los sectores.

Oportunidades

- Amplio rango de mejora de la eficiencia del sector.

Tabla 23. Análisis DAFO de los nuevos materiales y motores más eficientes para el subsector del transporte aéreo.

136 - GILANI, M., & KÖRPE, D. S. (2019) Airline Weight Reduction to Minimize Direct Operating Cost. 4th International Aviation Management Conference (4th INTAVIC).
137 - https://www.boeing.es/productos-y-servicios/commercial-airplanes/737max.page

05 Sector Transversal

Se

5.1 Sistemas de Acumulación eléctrica de gran capacidad y potencia para mejorar la integración y eficiencia de grandes sistemas de cogeneración (industria y grandes edificios terciarios), acumulando excedentes eléctricos transitorios, permitiendo así mejorar su eficiencia global

Descripción

Se conoce por sistemas de cogeneración aquellos que permiten generar energía eléctrica y energía térmica a partir de la misma energía final. Mientras que en las plantas térmicas o nucleares se disipa el calor de las corrientes que han sido necesarias para producir la electricidad, las plantas de cogeneración utilizan esa energía térmica para la generación de calor, agua caliente sanitaria, agua fría, etc., incrementando la eficiencia energética de la tecnología en su conjunto y permitiendo recuperar hasta un 60% de la energía desperdiciada en los sistemas convencionales de producción de electricidad[138]. Además, las plantas de cogeneración tienden a situarse próximas a los puntos de consumo, evitando

138 - https://www.energyavm.es/que-produce-sistemas-cogeneracion-de-electricidad

el transporte de la energía a largas distancias y realizando un mejor aprovechamiento de la energía.

Una planta de cogeneración suele estar constituida por motores alternativos, turbinas de gas o de vapor, que transforman la energía contenida en el combustible en energía mecánica y calor residual o de escape. La energía mecánica suele transformarse en energía eléctrica a través de un alternador (este es el caso más usual), y el calor residual puede recuperarse en forma de vapor de agua, agua caliente, aceites térmicos y gases calientes, como fluidos termoportadores y dispuestos para sus aplicaciones térmicas[139].

Tradicionalmente, las fuentes de energía utilizadas por las plantas de cogeneración eran combustibles fósiles como el gas natural o el gasoil. De hecho, casi un 25% del consumo total de gas natural en España y un 40% del total consumido por la industria se destina a la cogeneración[140]. Sin embargo, en los últimos años, ha aumentado el número de plantas que utilizan biomasa o biogás procedentes de vertederos o plantas de depuración de lodos, incrementando todavía más la sostenibilidad del proceso. En la figura 14 se muestra la distribución de energía neta producida en centrales de cogeneración según el tipo de combustible utilizado.

En España, la cogeneración contaba en el año 2019 con una potencia eléctrica instalada de 5.663 MW en unas 650 instalaciones activas asociadas a fábricas calor-intensivas que producen el 20% del PIB industrial del país. La electricidad registrada en cogeneración alcanza los 30 TWh que suponen el 12% de la electricidad del país[142]. Dentro de su consumo en España, la mayor parte de la energía va destinada al sector industrial (90%). Por su parte, el consumo de la energía de cogeneración que se destina actualmente a usos comerciales y residencial supone en torno al 10% del total (Figura 14).

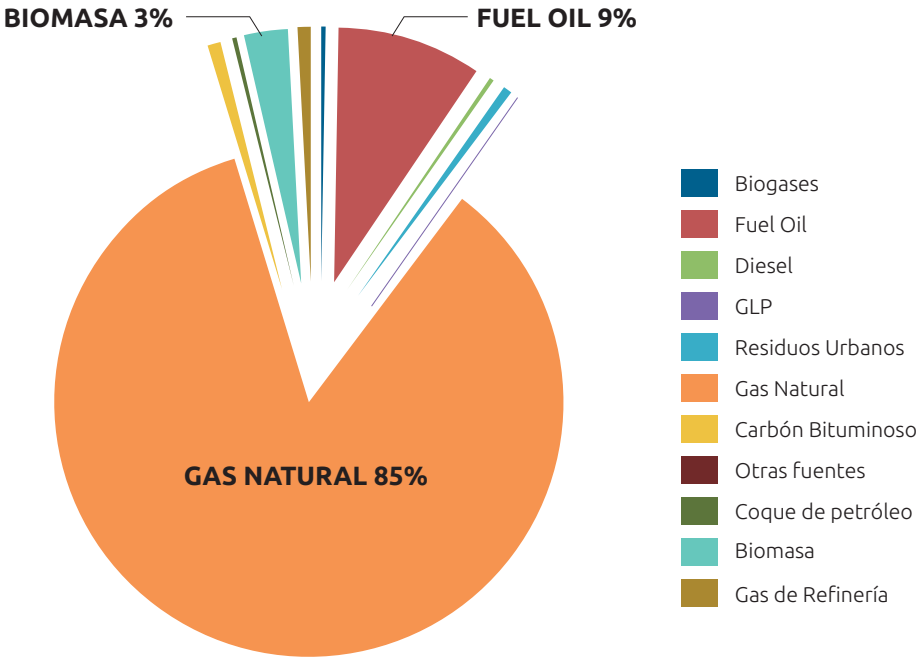


Figura 14. Energía neta producida en centrales de cogeneración según tipo de combustible empleado. Datos de España, 2018.[141]

139 - https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transformacion-de-la-energia/cogeneracion
140 - https://www.unionfenosagas.com/es/Newsletter/NoticiaNewsletter/cogeneracion-gas-industria-nl-mayo-2019?p=MAYO2019
141 - MITECO, "Centrales de cogeneración 2018," 2018.
142 - A. Pérez, "La mejor versión del futuro incluye la cogeneración," Energética, 23-Dec-2019.

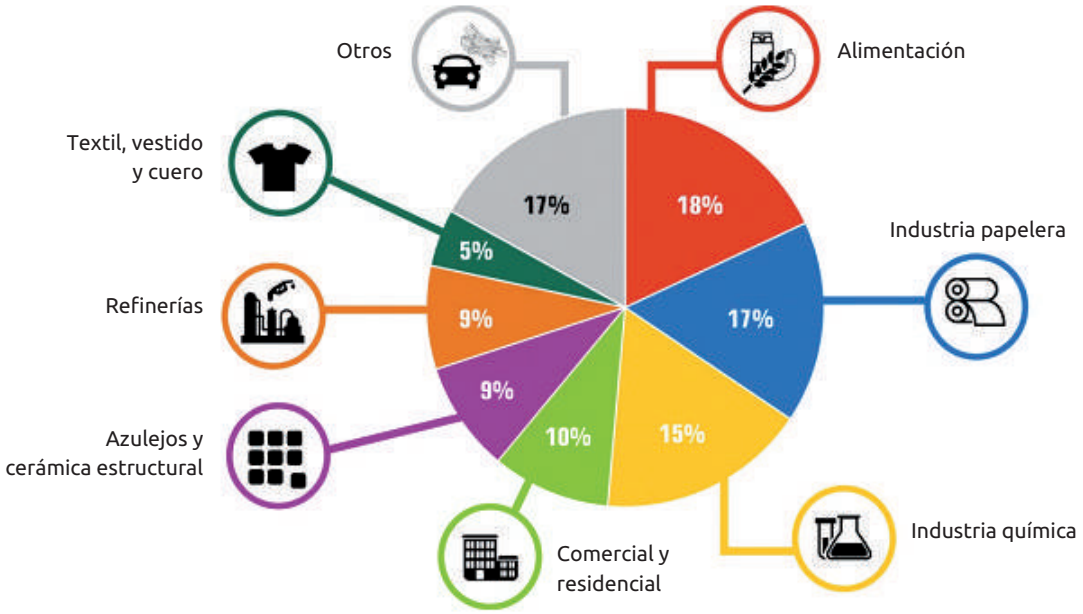


Figura 15. Distribución de la potencia de cogeneración de España por sectores[143].

Según el informe estadístico de cogeneración (2016)[144] las industrias que más cogeneración tienen son los sectores de Industrias Agrícolas, Alimentarias y Tabaco, Industria Química e Industrias del Papel y Cartón, Edición e Imprenta. Dentro de éstas, las tecnologías que más se utilizan son: Motor de combustión (1.436 MW), Ciclo Combinado (1.114 MW) y Turbina de Gas con Recuperación de Calor (658,2 MW). El ciclo combinado muestra una media dentro de estas industrias de 31,6 MW/unidad, siendo la tecnología que tiene mayor potencia eléctrica por unidad.

Los sistemas de cogeneración más importantes en función de los equipos utilizados para la generación de la energía[145] son las plantas de cogeneración con motor de gas o de combustión, las plantas de cogeneración de ciclos combinados, y las plantas de cogeneración con turbina de gas.

El continuo desarrollo de la cogeneración se presenta como un elemento clave para continuar por el camino de la descarbonización de la economía. Algunas de las asociaciones de cogeneradores españoles más importantes (ACOGEN, COGEN), han presentado recientemente una hoja de ruta para el horizonte 2030-2050 en el que se apuesta por lograr una industria con muy alta eficiencia, flexibilidad en la operación, fomento del autoconsumo en las propias industrias y en los polígonos y áreas de proximidad, así como una mayor contribución a la reducción de emisiones de CO_2.

Además, se considera vital el apostar por el uso de combustibles renovables y de bajas emisiones como el biogás, syngas, hidrógeno y la captura de CO_2, con el objetivo de lograr un sistema de cogeneración con cero emisiones netas en el año 2050. Además, la hoja de ruta contempla "acuerdos sectoriales estratégicos con industrias y promotores, disposiciones transitorias para asegurar la continuidad en la transición, procedimientos de concurrencia competitiva para establecer nuevos marcos de actividad y para fomentar el autocon-

143 - http://www.acogen.es/post/informe-encuesta-acogen16-y-hoja-ruta-2017-2020--29-09-2016.pdf
144 - https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/boletin_chp_2016_web_ok_final.xlsx
145 - https://www.energyavm.es/que-produce-sistemas-cogeneracion-de-electricidad

sumo y contribuir al sistema de obligaciones de eficiencia energética, así como promover la alta consideración de la cogeneración en las compras públicas ecológicas"[146].

Además de los propios sistemas de cogeneración, resulta fundamental para su desarrollo la utilización de sistemas de almacenamiento de energía para mitigar los problemas debidos a la pendularidad diaria, estacional o incluso del clima, que afectan en gran medida a algunas fuentes de energía renovables como la radiación solar y la energía eólica. Además, los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser útiles para mejorar las ventajas potenciales proporcionadas por los sistemas de cogeneración, ya que podrían garantizar más ahorros de energía y costes, así como la confiabilidad de la energía, si se dimensionan y operan adecuadamente. Los resultados obtenidos incluyen la cogeneración a gran escala: uso de motores de combustión propulsados por gas natural (150-1.000 kW) en combinación con baterías de litio (0 a 800 kWh)[147]; así como la cogeneración a pequeña escala (microgrid): pila de combustible de óxido sólido (0,5 kW) con una batería de Cloruro de Níquel y Sodio (~4 kWh)[148]. La diferencia entre la ratio de potencia instalada y la cantidad de energía almacenada en el caso de la gran (575 kW/400 kWh) y la pequeña (0,5 kW/4 kWh) escala conlleva que las características del sistema de almacenamiento cobren más importancia cuando este sistema se integra a pequeña escala.

La ventaja de utilizar este sistema a gran escala reside en la experiencia en el dimensionamiento de plantas de cogeneración acorde a la demanda de plantas industriales. De este modo, es habitual gestionar la demanda de electricidad (cogeneración), demanda de calor (almacenamiento de excedentes eléctricos en la batería) y picos de demanda de electricidad (cogeneración y batería). Mientras tanto, la cogeneración más almacenamiento eléctrico para uso doméstico (pequeña escala), contará con sistemas de menor potencia y capacidad, pero con un alto rendimiento y fiabilidad, en especial cuando la vivienda esté en zonas remotas.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Las baterías electroquímicas como sistemas de almacenamiento tienen un alto grado de madurez y su uso en el mercado es común, con niveles de TRL 9 en muchos casos . Sin embargo, la integración de los sistemas de almacenamiento en las plantas de cogeneración se ha abordado en una literatura técnica limitada. En general, su desempeño se encuentra todavía en el rango de TRL 3-4 según el tipo de sistema de almacenamiento considerado.

Entre los últimos estudios realizados en este campo, Aghaei y Alizadeh[150], abordan en su publicación el desarrollo de un sistema de cogeneración en viviendas con un sistema de almacenamiento de energía híbrido equipado con una batería de plomo-ácido y un almacenamiento de energía magnética superconductora para responder de manera efectiva a las fluctuaciones que se producen entre la demanda de energía térmica y eléctrica de los usuarios y el momento de generación de la energía. En otro artículo[151], los autores realizaron un estudio también en viviendas con el fin de analizar, desde el punto de vista del ciclo de vida, las implicaciones de instalar un sistema de cogeneración con integración de energía solar fotovoltaica en complejos residencia-

146 - http://www.acogen.es/prensa.php?id=606
147 - A. Gimelli et al., "Optimal con fi guration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service," Appl. Energy, vol. 242, no. February, pp. 974–993, 2019.
148 - V. Antonucci et al., "Thermal integration of a SOFC power generator and a Na – NiCl 2 battery for CHP domestic application," Appl. Energy, vol. 185, pp. 1256–1267, 2017.
149 - T. Nguyen, V. Martin, A. Malmquist, and C. Silva, "A review on technology maturity of small scale energy storage," Renew. Energy Environ. Sustain., vol. 36, 2017.
150 - J. Aghaei and M. Alizadeh, "Multi-objective self-scheduling of CHP (combined heat and power) - based microgrids considering demand response programs and ESSs (energy storage systems)," Energy, vol. 55, pp. 1044–1054, 2013.

les con almacenamiento de energía en baterías electroquímicas, logrando una reducción de los impactos ambientales de entre el 35-100%. V. Antonucci et al.[152] analizaron el ahorro logrado por un sistema de cogeneración compuesto por una pila de combustible de óxido sólido como generador principal, y una batería electroquímica de cloruro de níquel sódico de alta temperatura como almacenamiento en aplicaciones domésticas. Por otro lado, en otro estudio[153], se analizó el impacto de utilizar una red de cogeneración adaptada con un sistema de generación de energía fotovoltaica y una batería de almacenamiento de energía eléctrica en un hospital, obteniéndose de nuevo importantes ahorros económicos y ambientales.

En todos los casos, los autores consideran crucial realizar un buen dimensionado de la batería para asegurar la viabilidad económica de la instalación, así como seleccionar el tipo de batería adecuado y realizar un estudio detallado de los picos de consumos de energía que se esperan tener que cubrir. Para ello, debe buscarse un equilibrio entre el dimensionado de la instalación, su coste de adquisición y la energía máxima almacenada. Terlouw et al[154], proponen el uso de un modelo de optimización de múltiples objetivos para minimizar los costes de operación y las emisiones de dióxido de carbono de una comunidad residencial que utiliza diferentes tipos de tecnologías de batería, concluyendo que las baterías de litio-ion son las que presentan un mejor desempeño en este tipo de aplicaciones. Además, el estudio contiene el desarrollo de una metodología dirigida a optimizar el diseño de distintas plantas de cogeneración que incorporan diferentes tipos de baterías electroquímicas.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

El hecho de incluir un sistema de almacenamiento de energía eléctrica para optimizar la eficiencia de una planta de cogeneración se presenta como una práctica óptima en la consecución de los objetivos propuestos por la Comisión Europea en la hoja de ruta 2030-2050.

El ahorro logrado por este tipo de sistemas depende del tipo de consumo que vaya a realizarse, así como del tamaño de batería instalada y del precio de la electricidad de red en un determinado país. Pese a no existir en la literatura muchos estudios tecno-económicos que traten este tema, en la publicación de A. Gimelli et al. (2019)[155], se presenta un estudio sobre los ahorros que se obtendrían en un hospital ubicado en el sur de Italia.

Para ello, se analizó el impacto de un sistema de cogeneración con una potencia entre 150-1.000 kW y con un sistema de almacenamiento de energía de batería de litio-ion en el rango de 0 a 800 kWh. Para ello, se plantearon diferentes escenarios. En el primero de los escenarios analizados, se consideró un coste de instalación de almacenamiento de energía eléctrica de 600 € / kWh, mientras que el segundo, se consideró un coste de instalación de 300 € / kWh, en función de su tamaño. Como principal resultado del estudio, ambos escenarios mostraron una clara rentabilidad de la inversión, alcanzándose en el primero de los escenarios un VAN de 2,27 M€.
Por otro lado, además de los ahorros económicos, la posible incorporación de combustibles renovables además del gas natural, que es el combustible

151 - P. Balcombe, D. Rigby, and A. Azapagic, "Environmental impacts of microgeneration: Integrating solar PV , Stirling engine CHP and battery storage," Appl. Energy, vol. 139, pp. 245–259, 2015.
152 - V. Antonucci et al., "Thermal integration of a SOFC power generator and a Na – NiCl 2 battery for CHP domestic application," Appl. Energy, vol. 185, pp. 1256–1267, 2017.
153 - N. Mat, H. Shekhar, C. Wei, and A. H. M. Yatim, "A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic / fuel cell / battery energy system in Malaysia hospital," Energy, vol. 112, pp. 75–90, 2016.
154 - T. Terlouw, T. Alskaif, C. Bauer, and W. Van Sark, "Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using di ff erent battery technologies," Appl. Energy, vol. 239, no. February, pp. 356–372, 2019.
155 - A. Gimelli et al., "Optimal con fi guration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service," Appl. Energy, vol. 242, no. February, pp. 974–993, 2019.

tradicionalmente utilizado, lleva asociados importantes ahorros en las emisiones de CO_2 y coste de las externalidades de la energía generada.

Los ahorros que generaría la integración de este tipo de sistemas se han calculado con base en la situación de la cogeneración en el mix eléctrico del año 2030 predicho por el PNIEC[156]. En ese momento se prevé que la cogeneración suministre 12.122 GWh utilizando gas, productos petrolíferos, productos renovables y residuos. Para hacer el cálculo se han considerado los siguientes factores:

- Todos los sectores menos el de servicios (10% de la cogeneración actualmente) podrán integrar la batería en su sistema. 12.122 GWh*90% = 10.910 GWh.

- Se tienen en cuenta todas las plantas que hoy en día trabajan en un régimen "TODO-TODO". Un 75% del total. 10.910 GWh*75% = 8.182 GWh.

- Se estima que solo el 20% de esas plantas tendrá integrado el almacenamiento eléctrico para el 2030: 8.182 GWh*20% = 1.637 GWh.

Los ahorros generados al integrar la batería en la cogeneración provienen de las "no pérdidas" por el transporte y distribución de la energía eléctrica, ya que esa energía se almacenaría y utilizaría más tarde. Se ha estimado un 5% de pérdidas en la red de distribución y transporte. Por lo tanto, se alcanzarían unos ahorros energéticos aproximados de 82 GWh.
El ahorro medioambiental asociado viene dado por las emisiones de CO_2 debidas a la producción de los 82 GWh ahorrados. Para este cálculo se utiliza el factor de emisión actual de la cogeneración: 0,38 tCO_2-eq/MWh[157]. De este modo, el ahorro ambiental sería 31.093 tCO_2-eq.

Análisis DAFO

Es importante reseñar que ambas tecnologías, las plantas de cogeneración y las baterías electroquímicas, ya son lo suficientemente maduras y confiables. Sin embargo, el sistema planta de cogeneración + batería podría posicionarse en TRLs 3-4. En la tabla 24, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO.

Los problemas que se pueden encontrar al implementar está tecnología están mayoritariamente ligados a los siguientes factores: capacidad de la batería, coste de la batería y retribuciones. En relación con la batería, las baterías de flujo redox de Vanadio parecen la mejor opción, ya que están en TRL 9 y su capacidad se puede modificar fácilmente en función de la cantidad de electrolito. Sin embargo, hay que impulsar también el uso de otras tecnologías como baterías de flujo redox de electrolitos alternativos (moléculas orgánicas o polioxometalatos), para no depender solo del Vanadio. El precio de éstas dependerá de su demanda en los próximos años, y de las inversiones para el desarrollo de los nuevos electrolitos.

En el caso de las retribuciones, el 75% de las plantas de cogeneración españolas son "TODO-TODO", lo cual implica que su rentabilidad está ligada a las retribuciones obtenidas al verter toda energía eléctrica a la red. Para que se comience a almacenar la energía eléctrica en baterías habría que incentivar retributivamente el autoconsumo (actualmente solo el 25% de las plantas españolas trabajan en este régimen).

Además, la batería se podría utilizar no solo para almacenar la energía eléctrica de la cogeneración, sino también para almacenar la energía de otras fuentes renovables (paneles fotovoltaicos, aeroge-

156 - BORRADOR ACTUALIZADO DEL PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030. https://www.miteco.gob.es/images/es/pniec_2021-2030_borradoractualizado_tcm30-506491.pdf
157 - Emisiones de CO_2 asociadas a la generación de la electricidad en España. https://api.esios.ree.es/documents/580/download?locale=es

neradores etc.). Sería muy interesante que las plantas de cogeneración crearan un parque de baterías, ya que, en especial las que se encuentran ubicadas en la industria de calor intensivo, vierten la mayor parte de la energía eléctrica generada a la red. Este parque podría suplir la demanda de suministro de la red cuando las energías renovables no estén activas.

Debilidades

- Alta inversión inicial.
- Es necesario desarrollar el acoplamiento batería más sistema de cogeneración.
- Alto coste de las baterías.
- Baja capacidad de las baterías.
- Baja vida útil de la batería.
- Falta de formación en el ámbito de las baterías y smartgrids.
- Una elevada proporción de las plantas son para vender toda la energía eléctrica generada.

Amenazas

- Marco legislativo no favorable: reducción de la potencia instalada para 2030.
- Competencia con las energías renovables para conseguir subvenciones para los sistemas de almacenamiento.
- Sistema de retribuciones no favorables para el autoconsumo.

Fortalezas

- Conocimiento de la demanda energética de las plantas.
- Softwares de gestión de energía disponibles.
- Desarrollo de marco normativo de impulso del almacenamiento.
- Fuente de generación continua y estable.
- Reducción de vertidos a la red - menos pérdidas.
- Bajada de precio de las baterías en 2025.
- Instalaciones EXISTENTES en puntos estratégicos (polígonos y zonas residenciales).

Oportunidades

- Acoplamiento de tecnologías - cogeneración + batería + energía renovable + vehículo eléctrico.
- Demanda social creciente.
- Utilización de combustibles renovables (biogás o hidrógeno).
- Posibilidad de almacenar para verter – creación de un parque de baterías.
- Integración de nuevas tecnologías para la respuesta a la demanda energética - sistemas más flexibles y óptimos.
- Versatilidad de los sistemas de almacenamiento energético.
- Autoconsumo.
- Incorporación de sistemas de almacenamiento térmico.

Tabla 24. Análisis DAFO de los sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de cogeneración.

Existen otras oportunidades también relacionadas con el uso de biocombustibles, en especial el hidrógeno. Por último, pero no menos importante, estas plantas de cogeneración ya están ubicadas en lugares estratégicos, por lo que el coste para implementar la tecnología se reduciría al coste de la batería y los sistemas eléctricos adecuados.

5.2 Sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de transporte que permitan mejorar la eficiencia respecto a los sistemas de tracción basada en combustibles fósiles

Descripción

Los sistemas de acumulación eléctrica (baterías) se encuentran entre las tecnologías clave para lograr los objetivos de energía y emisiones de la EU para el año 2050[158]. Si bien es cierto que el salto tecnológico hacia sistemas de tracción eléctricos es fundamental para reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en los sistemas de transporte, los desarrollos futuros deberán mantener el rendimiento de las tecnologías de acumulación eléctrica actuales para poder aprovechar sus beneficios de eficiencia energética.

Dentro del almacenamiento electroquímico para aplicaciones en vehículos de transporte, el desarrollo actual y futuro se centra en baterías secundarias, cuyo funcionamiento se basa en conversiones electroquímicas reversibles de reducción y oxidación (redox), que ocurren entre especies electroquímicamente activas. Entre las familias de pares redox más utilizadas actualmente en baterías, destacan:

- **Níquel cadmio (NiCd):** bastante utilizadas en la industria de la automoción. No obstante, se trata

158 - Edström, K. et al (2020) Battery 2030+ Roadmap: Inventing the sustainable batteries of the future. Research needs and future actions. H2020 BATTERY 2030+.

de una tecnología cara y con envejecimiento prematuro ante el calor.

• **Níquel Metal hidruro (NiMH)**: principalmente usadas en híbridos eléctricos (HEVs).

• **Baterías de litio-ion (Li-ion):** tecnología más prometedora para la próxima década debido a su alta eficiencia y baja auto descarga. Dentro de las composiciones químicas usuales se encuentran Ion-Litio (LiCoO2), Ion-litio con cátodo de LiFePO4 y Polímero de Litio (LiPo). Hoy, todos los vehículos híbridos enchufables (PHEVs) y eléctricos de batería (BEVs) utilizan baterías Li-ion y, a partir de 2025, todos los híbridos eléctricos (HEVs) y de pila de combustible (FCEVs) también[159].

Aunque el límite teórico de densidad energética de las celdas Li-ion todavía está por ser alcanzado, los desarrollos futuros de dicha tecnología se esperan más a nivel de materiales y del diseño de los paquetes de baterías. Por un lado, bien para reducir la dependencia de materiales críticos, o bien para reducir el peso de los materiales no activos, y, por otro, para generar diseños específicos que satisfagan las demandas del sector de la automoción[160] y reduzcan el coste actual a menos de 100 €/kWh[161].

De cara a la presente década, además de las baterías Li-ion existentes, se espera avanzar en el desarrollo de baterías de estado sólido que sean competitivas a nivel mercado, ya que su densidad energética es aún baja. Para el horizonte 2030-2050[162], las líneas principales de investigación son (1) el desarrollo de especies electroquímicamente activas con mejores características (menor precio por kWh, uso de materiales no críticos, mayor seguridad, etc.), (2) la incorporación de sensores para la realización de diagnóstico preventivos y dotar a las baterías de funcionalidades de auto-reparación, y (3) avanzar en temáticas transversales como la reciclabilidad de sus materiales. En cuanto a las especies electroquímicamente activas en investigación, se destacan:

• Baterías Litio-aire o Baterías Litio-azufre (generación 5).

• Baterías post-Litio como Sodio-ion, Metal-ion multivalente y Metal-aire.

• Baterías de flujo en las que, a diferencia de las baterías secundarias, el electrolito no se encuentra dentro de la propia celda electroquímica, sino en tanques externos desde los que es bombeado. La cantidad de energía almacenada depende del tipo de electrolito y de su cantidad, mientras que la potencia que suministra depende del número de celdas de la propia batería[163]. Actualmente, existen principalmente en el mercado dos tipos de baterías de flujo: batería de vanadio y batería de zinc-plomo, pero su aplicación en automoción está poco explorada.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Respecto al apartado anterior, la revisión a continuación se realiza a nivel general de las baterías que se están desarrollando para su puesta en mercado posterior a 2030. Es decir, se parte de la suposición de que las baterías Li-ion y de estado sólido serán las que dominen la presente década y que las baterías para el periodo 2030 – 2050 serán aquellas que resulten mejores entre todo lo que se propone desarrollar la actual Plataforma Battery 2030+. Dicha plataforma es una iniciativa de investigación euro-

159 - Element Energy (2020). Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond.
160 - G. Meyer, R. Bucknall, and D. Breuil, "STRIA Roadmap 'Electrification,'" 2016.
161 - Goldie-Scot, L. (2019) BloombergNEF. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/
162 - Edström, K. et al (2020) Battery 2030+ Roadmap: Inventing the sustainable batteries of the future. Research needs and future actions. H2020 BATTERY 2030+.
163 - NANOFLOWCELL: ttps://www.nanoflowcell.com/what-we-do/innovation-research/nanoflowcell

pea a gran escala y a largo plazo para abordar los desafíos a los que se enfrentará el sector de las baterías del futuro. Su objetivo es generar nuevos conceptos para respaldar el desarrollo de una cadena de valor industrial europea de baterías, desde materias primas hasta materiales avanzados, celdas, paquetes y gestión de fin de vida útil, y para adaptar su incorporación en empresas que usan baterías para diferentes aplicaciones.

En términos teóricos, las tecnologías químicas en desarrollo prometen mayores niveles de densidad de energía, incluso doblar el valor de las Li-ion[164], y por ende otorgar más autonomía en vía. Los vehículos eléctricos comercializados actualmente presentan autonomías de alrededor 250 km por carga (con baterías de 200 Wh/kg), cuando los vehículos convencionales logran autonomías de más de 500 km. Para lograr este nivel de autonomía sin entrar en diseños específicos de los paquetes de baterías, se estima que las nuevas generaciones de baterías deben lograr una energía especifica de 550 Wh/kg[165]. No obstante, avances actuales en el diseño de los paquetes de batería con celdas Li-ion podrían alcanzar autonomías de 500 Km por carga, así que tal vez el desarrollo de nuevas tecnologías químicas no solo se centre en la densidad energética, sino en mejorar prestaciones respecto a la potencia, la seguridad de la batería o para reducir el uso de materiales críticos.

En cuanto al coste, un paquete de batería comercial presenta valores de 170 €/kWh, pero uno de los principales objetivos del sector es reducir el coste de la batería a menos de 100 €/kWh para el presente lustro. Como se puede observar en la tabla 25, a partir del 2030 y con reducciones adicionales para 2040, se espera disminuir este valor a menos de 70 €/kWh aun cuando los packs de baterías sean un 20% más grandes que los actuales.

Las baterías Li-ion continuarán siendo la tecnología comercial durante la presente década, probablemente acompañadas con la puesta a punto de baterías de estado sólido para 2025[167]. El desarrollo de nuevas generaciones basadas en litio es aún prematuro. Además, las baterías pos-litio[168], basadas en sodio, calcio, magnesio o aluminio, aún requieren mayor desarrollo para que sean comercialmente atractivas. No sólo su nivel de densidad de energía es menor que el de las baterías Li-ion, característica que podría ser compensada con reducción en los costes de producción, por ejemplo, sino que el estado de la investigación actual no tiene en cuenta factores clave para su puesta en el mercado, como la relación masa/volumen de las baterías. Esta falta de madurez tecnológica hace que sea muy complicado predecir cual será la tecnología emergente que supere la barrera de comercialización de cara al periodo 2030 - 2050[169].

	2020	2030	2040
Tamaño pack (kWh)	90	100	110
Densidad de energía pack (Wh/kg)	150	240	250
Coste pack batería (€/KWh)	170	70	60

Tabla 25. Evolución esperada en coste, tamaño y densidad de energía a 2030 y 2040. Fuente: adaptado de Element Energy.

164 - E. Comission, "Battery 2030+."
165 - Benveniste, G., Rallo, H., Casals, L. C., Merino, A., & Amante, B. (2018). Comparison of the state of Lithium-Sulphur and lithium-ion batteries applied to electromobility. Journal of environmental management, 226, 1-12.
166 - Element Energy (2019) Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond
167 - H2020 Astrabat: All Solid-State Reliable Battery for 2025. http://astrabat.eu/
168 - La estrategia Battery 2030+ considera como tecnologías pos-litio aquellas que no dependen de este material crítico. Es decir, tecnologías diferentes a Li-ion avanzadas, Li-ion de estado sólido, Litio-metal, litio-aire o litio-azufre.
169 - Walter, M., Kovalenko, M. V., & Kravchyk, K. V. (2020). Challenges and benefits of post-lithium-ion batteries. New Journal of Chemistry, 44(5), 1677-1683.

Los proyectos H2020 más recientes, financiados dentro de la estrategia Battery 2030+, como SPARTACUS[170], que pondrá a prueba una solución de batería inteligente basada en sensores mecánicos y acústicos para detectar fallos y niveles de degradación de las baterías, o el proyecto HIDDEN[171], que desarrollará procesos de auto-reparación para mejorar la vida útil y aumentar la densidad de energía de las baterías de Li-metal un 50 % por encima del nivel actual de las batería Li-ion, esperan tener resultados con TRL 4-6 a finales del 2023. De lo anterior, se puede concluir que, si los objetivos de I+D de la estrategia Battery 2030+ se alcanzan, se podrá contar con una nueva generación de baterías para el año 2030.

Otros proyectos de interés en desarrollo son:

Proyecto BIG-MAP (2020-2023). Este proyecto generará la estructura necesaria para acelerar el estudio de nuevos materiales sostenibles y eficientes para el desarrollo de baterías. Proyecto H2020. (http://www.big-map.eu/)

Proyecto SENSIBAT (2020-2023). Desarrollar tecnología basada en sensores para baterías Li-ion que mida en tiempo real la temperatura, presión, impedancia y conductividad de la celda. Proyecto H2020. (https://cordis.europa.eu/project/id/957273)

Proyecto ASTRABAT (2020-2023) Desarrollo de componentes, arquitectura y materiales para la producción en masa de baterías de estado sólido para el sector de la automoción. H2020. Acuerdo: 875029 (https://astrabat.eu/)

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Para su aplicación en vehículos, las características más relevantes de una batería son su densidad energética (Wh/kg) que, cuanto mayor sea, mayor será la autonomía que permite una batería; la potencia (W/kg) que proporciona en el proceso de descarga; su vida útil medido en ciclos completos de carga y descarga; la eficiencia (%), que determina cuanto de la energía de carga es aprovechada durante la descarga; y la autodescarga (%) que sufre en estado de reposo. Como se muestra en laTabla 26, las baterías Li-ion presentan excelentes niveles en cuanto a la autodescarga y la eficiencia, lo que las convierte en el paradigma del sector. Cualquier batería en desarrollo deberá al menos lograr dichos niveles.

Lo anterior significa un desafío para las nuevas generaciones de baterías cuyo desarrollo actual presenta bajos niveles de eficiencia. Por ejemplo, las baterías Metal-aire y Metal-ion poseen una eficiencia cercana al 60%, mismo caso de las baterías Li-aire. Otro tipo de baterías, como Magnesio-ion y baterías de flujo, alcanzan valores cercanos al 80%. En cuanto a la auto-descarga, por ejemplo, algunas de estas tecnologías presentan pérdidas de 10% en un día.

Tipo de Batería	Densidad de energía (Wh/kg)	Potencia (W/Kg)	Ciclos	Eficiencia %	Autodescarga mensual a 25 °C (%)	Coste (€/kWh)
NiCd	50	400	1500	80	20	450
NiMH	90	300	1000	70	30	200
Li-ion	200	400	1500	93	2-3	170

Tabla 26. Datos técnicos de algunas baterías electroquímicas en mercado

170 - H2020 SPARTACUS: Spatially resolved acoustic, mechanical and ultrasonic sensing for smart batteries. https://cordis.europa.eu/project/id/957221/es
171 - H2020 HIDDEN: HINDERING DENDRITE GROWTH IN LITHIUM METAL BATTERIES. https://cordis.europa.eu/project/id/957202/es
172 - Kurzweil, P., & Garche, J. (2017). Overview of batteries for future automobiles. In Lead-Acid Batteries for Future Automobiles (pp. 27-96). Elsevier.

Si se supone que todo desarrollo que supere la barrera de comercialización a 2030 logrará el nivel de eficiencia actual de las baterías Li-ion, se podría concluir entonces que la eficiencia energética de los sistemas de acumulación eléctrica respecto a los sistemas de tracción basada en combustibles fósiles viene dada por la diferencia en el consumo de energía final entre los vehículos de combustión (ICE) y los vehículos eléctricos (VE). En este sentido, se espera que para el año 2030, España cuente con 5.000.000 de VE, entre turismos, furgonetas, autobuses y motos, que equivaldrían a alrededor el 15% del total de la flota[173]. Este valor es similar al escenario de adopción tendencial de VE presentado en figura 18, que además supone que el peso de los VE será del 38% en 2040 y del 74% en 2050 sobre el total de la flota europea.

Ahora bien, los ahorros energéticos para el horizonte 2030-2050 asociados a la adopción de vehículos eléctricos se estiman **en 150 ktep por cada punto porcentual de flota vehicular reemplazada por vehículos eléctricos.** Para calcular este valor, se adopta como referencia el total de km-pasajeros, en autobús, turismo y motocicleta, de España en 2030, que equivale a 583.540 millones de km-pasajero[175], y se calcula el ahorro energético debido a los km-pasajero que se dejan de transitar en ICE para ser reemplazados por EV. Se adopta el factor de consumo de un turismo pequeño ICE (0,06 l/km) y uno EV (155 Wh/km) estimado para Europa para 2050[176]. Además, se corrige el cálculo con los siguientes factores de paso de consumo de energía primaria: 1,11 para el gasóleo y 2,4 para la red eléctrica nacional[177]. El ahorro en emisiones asociado se estima comparando las emisiones generadas por el

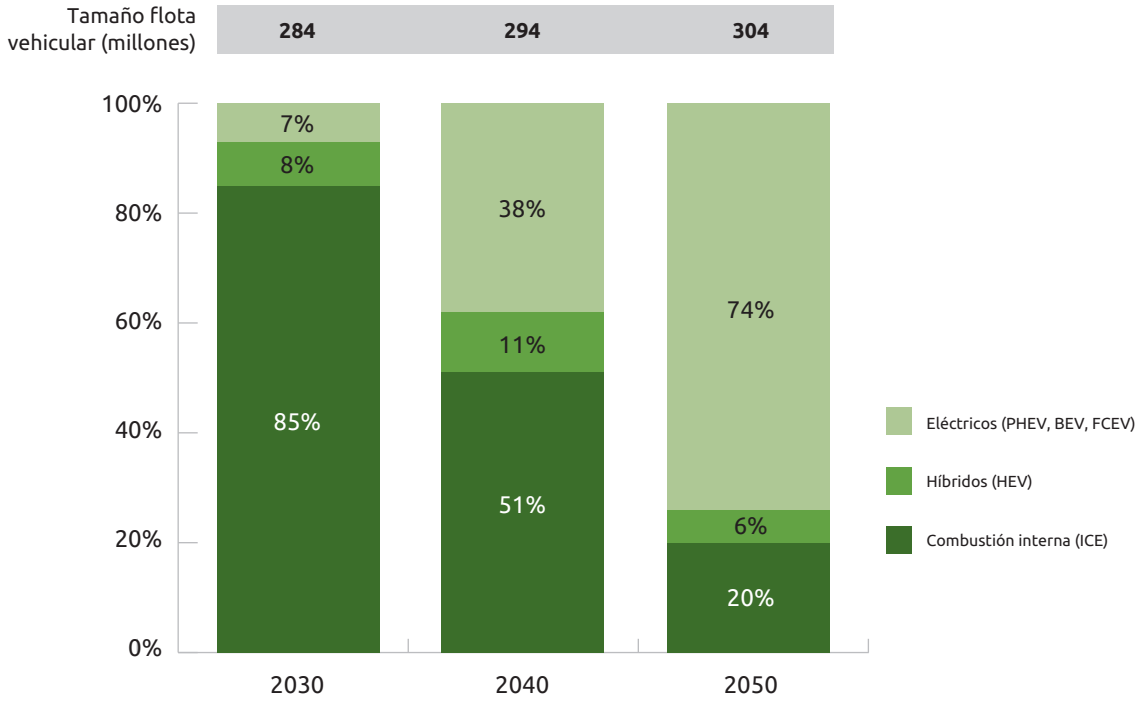


Figura 18. Estructura de la flota vehicular en la EU según el escenario tendencial. Fuente: adaptado de Element Energy174.

173 - MITECO (2020) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC 2030).
174 - Element Energy (2019) Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond.
175 - MITECO (2020) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC 2030).
176 - Krause, J., et al. (2020). EU road vehicle energy consumption and CO_2 emissions by 2050–Expert-based scenarios. Energy Policy, 138, 111224.
177 - IDAE (2019) Guía para la cumplimentación de líneas de actuación en la plataforma MENAE. Anexo I: factores de conversión de unidades de medida de energía.

uso de vehículos de combustión respecto a las emisiones del mix eléctrico esperado para el año 2030. Esta diferencia equivale a 858 Kt CO_2 por cada punto porcentual de flota vehicular reemplazada por vehículos eléctricos.

No obstante, el valor anterior corresponde a un cálculo "del tanque a la rueda" que no corresponde a la eficiencia energética "del pozo a la rueda" que presentan los VE basados en sistemas de acumulación eléctrica. De acuerdo con los expertos consultados, un ICE tiene una eficiencia cercana al 20% mientras que un VE puede alcanzar una eficiencia energética de 45% cuando se alimenta de la red. Incluso, este valor puede aumentar hasta el 75% si la fuente es renovable proveniente de autoconsumo, pero para el siguiente cálculo se considera que la gran mayoría de VE se alimentarán de la red. Entonces, si se tiene en cuenta el aumento de 25% en eficiencia energética se podría hablar de ahorros cercanos a 1.200 ktep por cada punto porcentual de ICE reemplazado por EV desde una perspectiva "del pozo a la rueda".

Análisis DAFO

En la siguiente tabla, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de estas tecnologías:

Debilidades

- Baja vida útil de las baterías respecto a Li-ion.
- Nuevas tecnologías presentan menos eficiencia y mayor auto descarga que Li-ion.
- TRL bajo: proyectos H2020 esperan demostrar TRL4 para 2023.

Amenazas

- Impacto ambiental (extracción materiales y fin de vida).
- Limitado número de fábricas en EU.
- Factores políticos de países con materias primas.
- Efecto rebote: movilidad sostenible.
- Poca infraestructura de carga.

Fortalezas

- Diversas tecnologías en desarrollo de cara a periodo 2030 – 2050 (Li-azufre, Li-aire, Li-ion estado sólido) con mayor Wh/Kg (impacta autonomía 250 km/carga).
- Reducción de coste esperado a partir de 2025. Más atractivo para la movilidad eléctrica.
- Tecnologías en desarrollo independientes de los materiales críticos.
- Gran potencial de EE si se alimenta de Generación Distribuida.

Oportunidades

- Mercado de vehículos eléctricos en crecimiento. El desarrollo está impulsado por el sector de la automoción.
- Desarrollo de marco normativo UE (Green deal, movilidad eléctrica, ODS, etc.) y Estrategia de I+D 2030+.
- Acoplamiento de sectores -cogeneración + batería + energía renovable + vehículo eléctrico.
- Demanda social creciente.
- Restricciones (compra/uso) a los vehículos de combustión.

Tabla 27. Análisis DAFO de los sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de transporte.

Actualmente, una de las principales barreras que afronta la adopción masiva de la movilidad eléctrica es el alto coste de sus sistemas de almacenamiento y la dependencia a materiales críticos para la producción masiva de baterías. Se espera que la puesta en marcha de 'gigafábricas', como la que actualmente construye Tesla en Berlín, pueda reducir costes aprovechando economías de escala. No obstante, actualmente no existe ninguna tecnología pos-litio con un nivel de desarrollo adecuado para su fabricación y comercialización en masa.

5.3 Nuevos combustibles derivados de residuos o producidos a partir de electricidad renovable

Descripción

Los principales gases de síntesis obtenidos a partir de residuos o electricidad renovable que se han identificado son los siguientes:

- Hidrógeno.
- Amoniaco y otros compuestos orgánicos.
- Gas natural sintético o syngas.
- Combustibles a partir de CO_2 como Dimetil éter (DME) y Metanol.

En los siguientes apartados, se procede a detallar la información relativa a cada uno de ellos, así como sus posibles aplicaciones en el marco del camino hacia la descarbonización en el periodo 2030-2050.

Producción de hidrógeno verde

El uso del hidrógeno tiene como ventajas su alto contenido energético PCI (119,93 MJ/kg) y que no genera contaminantes. Sin embargo, como restricciones presenta la dificultad en el sistema de almacenamiento y de seguridad. El hidrógeno verde, o

hidrógeno producido a partir de recursos renovables, puede obtenerse mediante diferentes procesos y materias primas, como la conversión de biomasa, procesos fotobiológicos o por electrólisis de agua mediante suministro eléctrico de fuente renovable. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de estas fuentes de hidrógeno.

Conversión de biomasa

La producción a partir de biomasa se puede clasificar en procesos termoquímicos (reformado, pirólisis y gasificación) y procesos biológicos (fermentación alcohólica y digestión anaeróbica). En el caso de los procesos termoquímicos, el proceso de pirólisis permite obtener productos que dependen de la naturaleza del combustible empleado, de la temperatura y presión de la operación y de los tiempos de permanencia del material en la unidad: gases (combustible gaseoso de bajo PC), sólidos (carbón vegetal) o líquidos (bioaceite). Por ejemplo, la pirolisis de RSU permite obtener líquidos hidrocarbonados que posteriormente pueden ser reformados para obtener hidrógeno. Al igual que en el caso anterior, en la gasificación, el producto final depende del agente gasificador (aire u oxígeno). Desde el punto de vista de la producción de hidrógeno interesan los procesos de gasificación con vapor de agua y oxígeno puro, ya sean a partir de carbón o de biomasa.

Radiación solar y procesos fotobiológicos

Los procesos de obtención de hidrógeno a partir de la radiación solar son procesos fotolíticos que se pueden separar en dos procedimientos: fotobiológicos y fotoelectroquímicos. Cabe destacar que ambos procedimientos se encuentran actualmente bajo foco de estudio y se plantean para una implantación a largo plazo. Algunos organismos como algas verdes, cianobacterias, bacterias fotosintéticas y bacterias de fermentación oscura pueden actuar como catalizadores biológicos para producir hidrógeno a partir de agua y ciertas enzimas como la hidrogenasa y nitrogenasa, de manera que darían lugar a la obtención de H_2 a partir de procesos fotobiológicos. La eficiencia solar de conversión de las algas verdes es del 10% y la de las bacterias fotosintéticas del 6%. Esta tecnología permitirá, por tanto, producir hidrógeno a partir de agua, luz, enzimas y biomasa, aunque a largo plazo.

En los procesos fotoelectroquímicos, se logra la electrólisis del agua utilizando la luz solar mediante semiconductores especializados. Diferentes materiales semiconductores trabajan en diferentes longitudes de onda, de manera que las investigaciones se centran en seleccionar aquellos que disocien el agua y sean estables en ella. El atractivo de este procedimiento radica en que ofrece gran potencial de reducción de costes, que presenta una eficiencia un 30% mayor que la electrólisis realizada con células fotovoltaicas, y que en laboratorio se ha obtenido una eficiencia de conversión sol-H_2 de hasta el 16%.

Eólica y fotovoltaica para producción de energía verde para el electrolizador

A partir de la energía generada por el recurso eólico y/o recurso solar se puede realizar un almacenamiento de hidrógeno: producción en un electrolizador y reconversión a electricidad mediante pilas de combustible.

Amoniaco y Compuestos Orgánicos

Al igual que el hidrógeno, el amoniaco (NH_3) es un producto que puede obtenerse a partir de combustibles fósiles, biomasa u otras fuentes renovables. Algunas ventajas del amoniaco con respecto al hidrógeno son un menor coste por unidad de energía almacenada, una mayor densidad de energía volumétrica comparable a la de la gasolina, una produc-

ción, manipulación y distribución mejor acomodadas con la infraestructura existente y una mejor viabilidad comercial[178]. Además del NH_3 (10,7–12,1 kgH_2/100l), hay otros compuestos líquidos que se han estudiado para almacenar hidrógeno:

- Metil–ciclohexano (C_7H_{14}): densidad de almacenamiento de hidrógeno moderada (4,7 kgH_2/100l) y puede manejarse como un combustible líquido como la gasolina, en condiciones ambientales, lo que es una ventaja para el proceso de transferencia de material. Sin embargo, se forma tolueno en la deshidrogenación.

- Hidracina: resulta ser un candidato para la generación de hidrógeno en condiciones ambientales (8,3 kgH_2/100l).

Por su parte, el amoniaco muestra un valor diez veces superior en cuanto a densidad volumétrica[179] al de las aleaciones de almacenamiento de hidrógeno. Además, la eficiencia teórica de conversión de hidrógeno de NH_3 es del 89,3%, que es un valor cercano al de la aleación convencional de $LaNi_5$ (88,8%).

El amoniaco también se puede quemar sin la emisión de CO_2. De esta forma, se espera que sea utilizado como portador de hidrógeno y de energía renovable en el futuro[180]. Aunque la forma más barata de producir amoniaco en la actualidad es el reformado de gas natural, que produce H_2 y CO_2, este puede ser producido a partir de fuentes renovables como la solar, la eólica, a partir del aire (vía licuefacción de N_2) o mediante electrólisis del agua. Estos métodos no contribuyen a la producción de gases de efecto invernadero y además ofrecen flexibilidad en su utilización, pudiendo ser empleado como fluido de trabajo en ciclos de generación de energía, como vector para almacenamiento de energía, fluido refrigerante, y materia prima química apta para la captura de CO_2. El amoniaco permite un funcionamiento más efectivo de las celdas de combustible usando configuraciones más pequeñas, más seguras y más económicas, logrando una recuperación eficiente y una utilización del H_2 con bajo impacto medioambiental. A pesar de estas ventajas, las celdas de combustibles deben de ser mejoradas desde el punto de vista económico y de su implantación a gran escala. En la actualidad, el uso del amoniaco parece centrarse en sistemas de propulsión pequeños para aplicación en satélites los cuales requieran energía para la ruptura de la molécula de amoniaco en los componentes de H_2 y N_2.

Gas Natural Sintético

El Gas Natural Bio-Sintético (también conocido como Bio-SNG, gas natural renovable (RNG), biometano o metano renovable) se obtiene a través de la purificación de biogás. El biogás es una mezcla de biometano CH_4 (65-70%) y CO_2 (30-35%) y pequeñas cantidades de otros gases. Se crea mediante la digestión anaeróbica de residuos orgánicos como aguas residuales, estiércol, residuos alimentarios, vertederos, etc., que es una tecnología ya establecida. Después de la eliminación de contaminantes, el biometano es el mismo que el gas natural, y se puede utilizar como combustible de transporte en forma de Gas Natural Líquido (GNL) o Gas Natural Comprimido (GNC).

La mayor parte de la producción de biometano proviene de la mejora del biogás, por lo que las materias primas renovables y sostenibles para su obtención, son las utilizadas para la obtención de biogás (residuos de cultivo, estiércol animal, fracción orgánica de desechos, lodos de aguas residua-

178 - Zamfirescu C., Dincer I.. Using ammonia as a sustainable fuel. Journal of POwer Sources (2008). 185(1):459-465.
179 - El NH_3 se licúa con facilidad a 1 MP y 298 ºK y alcanza una densidad de 1,5 veces la del H_2 líquido.
180 - Kojima Y., "Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers", International Journal of Hydrogen Energy 2019, 44(33): 18179–18192.

les). Sin embargo, la ruta de gasificación del biometano puede utilizar la biomasa leñosa (además de los desechos domésticos y agrícolas) como materia prima, que consiste en residuos de tratamientos forestales y la transformación de la madera[181]. Usar biomasa como fuente o recurso en la producción de SNG es muy interesante. Los desafíos de usar biomasa en lugar de carbón surgen por un lado debido a la diferente composición química y al diferente tipo de impurezas en el gas, como el azufre orgánico, y por otro lado debido al menor tamaño de la unidad.

Dimetil éter (DME)

El DME es un gas en condiciones normales, con un punto de ebullición de -25 °C y una presión de vapor de 0,5 MPa a 20 °C. El DME es ligeramente polar, y parcialmente tóxico. Además, su poder calorífico es mayor que el del metanol[182]. El DME se considera uno de los combustibles alternativos renovables más prometedores. Recientemente, el DME se ha señalado como combustible potencial para el transporte, el uso doméstico y la generación de energía debido a sus propiedades físicas y características de combustión. El DME es conocido como posible sustituto del gasóleo, y su obtención se podría realizar a partir de la biomasa. En el caso del biodiésel, su obtención se desarrolla a partir de grasas y aceites vegetales o animales. Esto coloca al biodiesel en competencia directa con la producción de alimentos. Sin embargo, DME puede producirse a partir de gas de síntesis obtenido por la gasificación de biomasa celulósica o carbón, por lo que no es un competidor directo de la producción de alimentos. El gas de síntesis también puede convertirse en gasóleo mediante la síntesis Fischer-Tropsch, pero la síntesis de DME es menos compleja. De esta forma, el DME se considera un combustible limpio ya que tiene bajas emisiones de gases de escape, no produce partículas, produce menores emisiones de CO_2 y tiene una alta eficiencia térmica. Además, puede ser utilizado para diferentes aplicaciones como el transporte, la calefacción residencial y la generación de energía. Asimismo, puede actuar como un combustible dual con GLP y gasolina para reducir los impactos ambientales. El DME es portátil, lo que implica que puede ser almacenado, transportado y utilizado fácilmente siempre y cuando su manejo sea adecuado. Puede ser sintetizado a partir de una variedad de materias primas como la biomasa. El DME obtenido a partir de biomasa también está definido como Bio-DME.

Metanol

Actualmente, el metanol se sintetiza a partir de una reacción catalítica de gas natural a escala industrial. El proceso empieza con el reformado para dar lugar a gas de síntesis y producir metanol a partir de reacciones catalíticas a elevadas presiones y temperaturas. Asimismo, la obtención de metanol se puede llevar a cabo a partir de energía y materias primas renovables (definiéndolo como biometanol). Se puede distinguir entre los procesos que utilizan la biomasa como fuente de carbono y energía simultáneamente y los enfoques basados en la electricidad renovable en forma de energía química de hidrógeno con fuentes de carbono separadas en forma de CO_2 de origen biogénico o fósil. La biomasa puede utilizarse para obtener biogás, que se convierte a su vez en metanol, ya sea catalítica o biológicamente, o mediante gasificación para obtener gas de síntesis de manera similar a los procesos convencionales. Para utilizar la energía renovable y el CO_2, el metanol puede sintetizarse a partir de gas de síntesis intermedio mediante la reacción inversa de desplazamiento de gas del agua o mediante hidrogenación directa. Por ejemplo, en la generación de metanol con energía renovable, a partir de hidró-

181 - https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane
182 - Semelsberger T.A., Borup R. L., Greene H.L. Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. Journal of power source (2006); 156(2,1): 497-511.

geno y dióxido de carbono, el hidrógeno puede proceder de la electrolisis del agua, pirolisis de biomasa o gasificación, mientras que el CO_2 puede proceder de las emisiones industriales.

Nivel de desarrollo tecnológico, recursos y perspectivas de evolución

Relacionado con el sector de la automoción, la incorporación de vehículos híbridos y de batería eléctrica al mercado es una realidad desde hace unos años. La relevancia de estos últimos ha ido en aumento debido a su mayor eficiencia energética y ausencia de emisiones contaminantes. Sin embargo, técnicamente siguen presentando una serie de inconvenientes, principalmente asociados a su modesta autonomía y al tiempo de recarga necesario. Este escenario favorece el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan mejorar las prestaciones actuales de estos vehículos, como es el caso de la pila de combustible de hidrógeno. Este sistema utiliza el mencionado gas para generar la electricidad que impulsa el vehículo en el propio coche, al combinarlo con el oxígeno del aire. Es también, por lo tanto, un vehículo eléctrico, pero con la diferencia de que esa energía se genera a bordo del automóvil. Sin embargo, el uso de hidrógeno en automoción presenta una serie de inconvenientes que hacen que no resulte una tecnología rentable hoy en día. En primer lugar, se trata de una tecnología cara (más que la del vehículo eléctrico), estando valorados los pocos vehículos disponibles en torno a 70.000 €, por lo que su mercado potencial no está desarrollado en la actualidad. Además, el hidrógeno se vende actualmente a 10-12 €/kg[183], siendo el consumo medio de unos 0,9 kgH_2/100 km[184].

Por otro lado, si bien el amoniaco se lleva utilizando desde hace años en diferentes aplicaciones, a nivel comercial, los motores de combustión interna alimentados con amoniaco han atraído el interés de varias compañías y países a lo largo de mundo como una tecnología prometedora que puede contribuir a un futuro sostenible. Existen varios ejemplos como los trabajos realizados por Boothroyd[185], quién propuso el uso de amoniaco para almacenamiento de energía producido a partir de recursos renovables en áreas rurales y generación de energía en grandes ciudades de Australia. Otros como Leighty[186] propuso la producción de amoniaco a partir de recursos renovables y su utilización como combustible para aplicación en motores de combustión interna y/o en celdas de combustible para producción de energía o uso en transporte. Diferentes análisis de viabilidad en el uso de amoniaco como combustible en motores de combustión basados en el análisis de su rendimiento termodinámico, la efectividad del sistema y la compactibilidad del tanque de combustible han sido llevados a cabo hasta la fecha[187,188]. La mayoría de estos estudios llegan a la conclusión de que, para hacer del uso del amoniaco, una opción viable en motores de combustión interna, este necesita ser mezclado con otros combustibles promotores de la combustión debido a su baja velocidad de llama y alta resistencia a la auto-ignición. Esto fue corroborado por estudios previos, en los que un diseño de cámara dual de combustible fue elegido como el sistema más adecuado para el uso del amoniaco como combustible en motores de combustión[189]. De igual forma, otros trabajos reali-

183 - Cuánto cuesta producir y utilizar el hidrógeno para los coches, Álvaro Subías, Autofácil, octubre 2019. https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/2019/10/16/cuesta-producir-utilizar-hidrogeno-coches/52811.html
184 - El hidrógeno en los coches: ventajas e inconvenientes. https://www.motor.es/que-es/hidrogeno
185 - Boothroyd RG. A proposed Australian transition to an anhydrous ammonia fuel transport economy to replace liquid petroleum fuels. WIT Trans Ecol En- viron 2014; 186 :443–56.
186 - Leighty WC. Alaska's renewables-source ammonia fuel energy storage pilot plant: Toward community energy independence. In: Power and energy society general meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE; 2013. p. 1–5.
187 - Zamfirescu C, Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. Fuel Process Technol 2009; 90 :729–37.
188 - Zamfirescu C, Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel. J Power Sources 2008; 185 :459–65.
189 - Reiter AJ, Kong S-C. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions. Energy Fuels. 2008; 22 :2963–71.

zados por Liu et al[190] muestran que los motores de combustión alimentados con amoniaco sufren pocas pérdidas de energía, y que su corrosión y necesidades de lubricación no son mucho mayores que las de los combustibles convencionales. Hasta la fecha, se han llevado a cabo diferentes análisis de viabilidad en el uso de amoniaco en motores de combustión, basados en el análisis de su rendimiento termodinámico, la efectividad del sistema y la compactibilidad del tanque de combustible[191,192].

El desarrollo del uso del biometano para el transporte es el foco de varios proyectos como BIOMASTER, MADEGASCAR, GasHighWay, BioGas Max, Urban Biogas, Green Gas Grids y Baltic Biogas Bus, cuyo objetivo es aumentar su uso en el mercado. BIOSURF es un proyecto financiado con fondos europeos en el marco del programa Horizonte 2020. BIOSURF se centra en aumentar la producción y el uso del biometano (a partir de residuos animales, otros materiales de desecho y biomasa sostenible), para la inyección de red y como combustible de transporte, eliminando las barreras no técnicas y allanando el camino hacia un mercado europeo de biometano.

Entre los combustibles alternativos de automoción, el dimetil éter (DME) está siendo objeto de investigación extensa para su uso como combustible diésel. El DME tiene un alto índice de cetano y, por lo tanto, propiedades antidetonantes (baja temperatura de ignición) similares a las de un gasóleo bueno, por lo que la relación de compresión del motor diésel es la misma[193]. De esta forma, es el sector de la automoción el que ha recibido la focalización de los estudios. En Europa, una agrupación de organizaciones y empresas escandinavas en la que participan la Universidad Técnica de Dinamarca, Haldor Topsoe, Volvo y Statoil han hecho con éxito ensayos con un autobús Volvo propulsado con DME[194].

Por otra parte, los costos de producción del biometanol dependen en gran medida de la materia prima utilizada, la configuración de la planta y las condiciones locales. En la Figura 16 se indican los costes asociados a materias primas renovables como madera, desechos y CO_2, junto con los combustibles fósiles convencionales, gas natural y carbón. Los costos del biometanol basado en biomasa (madera) se estiman entre 160 €/t y 940 €/t. Cuando se utilizan desechos, se estima que los costos de producción son ligeramente inferiores; entre 200 €/t y 500 €/t. Se estima que la producción basada en el CO_2 es muy costosa, entre 510 €/t y 900 €/t. Aunque los datos son escasos, los costos de producción parecen más bajos para las capacidades más altas, con una dispersión menor. Se prevé que hasta que los costos de la gasificación de la biomasa disminuyan, las primeras oportunidades para el biometanol se encontrarán principalmente en la producción integrada con otros procesos industriales (por ejemplo, producción de pulpa, biodiesel y bioetanol). Por último, se observa como la producción de biometanol a partir de CO_2 es el proceso de producción más caro, con cifras que oscilan entre los 510-900 €/t. Los proyectos actuales de biometanol se centran en el uso de corrientes de desechos de otros procesos industriales, lo que sugiere que estos pueden ofrecer la mejor economía. La presencia de otras oportunidades de nicho depende de las condiciones locales específicas, como los precios muy bajos de la electricidad[195].

El reemplazo de queroseno en el sector de la aviación esta aun en los comienzos de su desarrollo. El uso del hidrógeno en el sector de la aviación puede

190 - Liu R, Ting DSK, Checkel MD. Ammonia as a fuel for SI engine. SAE; 2003. Technical paper 2003-01-3095 p. 1–7.
191 - Zamfirescu C, Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. Fuel Process Technol 2009; 90 :729–37.
192 - Zamfirescu C, Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel. J Power Sources 2008; 185 :459–65.
193 - Aga R. El dimetil éter (DME) como nuevo combustible limpio. (2002).
194 - James P. Szybist, Samuel McLaughlin, Suresh Iyer. Emissions and Performance Benchmarking of a Prototype Dimethyl Ether-Fueled Heavy-Duty Truck (2014).
195 - Production of Bio-methanol. ETSAP and IRENA (2013). https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I09IR_Bio-methanol_MB_Jan2013_final_GSOK.pdf

clasificarse en dos rutas principales: la primera es el uso del hidrógeno como sustituto del queroseno para los aviones de gran tamaño, y la segunda es el uso de pilas de combustible en lugar de motores de reacción para aviones pequeños[196]. El uso de la tecnología de pilas de combustible para aviones todavía está desarrollándose, pero cada día recibe mayor atención de los principales fabricantes de aviones. Airbus y Boeing están estudiando actualmente la posibilidad de utilizar la tecnología de pilas de combustible para alimentar las unidades de energía auxiliar (APUs) de sus aviones que antes funcionaban con motores diésel. Además, las pilas de combustible tienen el potencial de utilizarse en lugar de las baterías para alimentar otros dispositivos y sistemas de las aeronaves. Por ejemplo, pueden utilizarse para la presurización de la cabina, el sistema de control ambiental, la iluminación y la instrumentación de la cabina, la protección antihielo de las alas, el accionamiento de la superficie de control y del tren de aterrizaje[197]. Para que el hidrógeno sea viable para la industria de la aviación, debe aumentarse su densidad volumétrica o densidad de energía por unidad de volumen. Comparado con el queroseno, se necesita un volumen cuatro veces mayor de LH_2 (hidrógeno líquido) para entregar la misma cantidad de energía[198]. Sin embargo, a pesar de este inconveniente, las aeronaves propulsadas por hidrógeno son más eficientes en cuanto a su peso e implican menores costos operativos que las aeronaves propulsadas por queroseno.

El amoniaco es una de las opciones de combustible alternativo en el transporte marítimo por sus beneficios. Actualmente, hay dos tipos de dispositivos cero carbono que las investigaciones sugieren que serían viables: uno es el amoniaco y el otro son las células de combustible de hidrógeno. Con la combustión de amoniaco puro o la generación de energía eléctrica en una pila de combustible de hidrógeno, las emisiones se limitan a los vapores de agua y aire caliente en ambos casos, mostrando el amoniaco menores emisiones que el hidrógeno. El amoniaco es más difícil de encender y no es explosivo, en contraste con el hidrógeno, que es altamente explosivo. También tiene una densidad de energía volumétrica más alta que el hidrógeno, y es significativamente más fácil de licuar para su almacenamiento y transporte, haciéndolo más rentable. Al ser almacenado, el amoniaco también tiene la ventaja de que puede descomponerse en nitrógeno e hidrógeno, siendo este último potencialmente utilizado como combustible.

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Por el estado de desarrollo de la tecnología, no se cuenta con información robusta de proyección de implementación de la misma (utilizando residuos o electricidad renovable), por lo que se espera que las principales aplicaciones de los combustibles estudiados en los sectores de la automoción, la aviación y el marítimo, bajo el enfoque temporal de estudio, descritas en el apartado anterior, sirvan de referencia para la definición de los ahorros potenciales en los próximos años.

Existen estudios como el presentado por Ajanovic et al[199], en que se analizaron los costes totales de movilidad de los vehículos de celda de combustible de hidrógeno y los convencionales de combustión en su respectivo escenario actual y a futuro. Su trabajo determina que actualmente el vehículo de hidrógeno no puede competir con los vehículos convencionales en términos económicos. Sin embargo, el escenario a largo plazo equilibra la balanza, con un coste aproximado de 50€/100 km, funda-

196 - Dincer I., Acar C. A review on potential use of hydrogen in aviation applications. Int J Sustain Aviat, 2 (1) (2016), p. 74.
197 - Baroutaji A., Wilberforce T., Ramadan M. and Olabi A.G. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. Renew. Sustain. Energy Rev., 106 (2019), pp. 31-40, 10.1016/j.rser.2019.02.022..
198 - Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications. Int J Hydrog Energy 2014;39(20):10731–47
199 - Ajanovic A, Haas R, Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector, International Journal of Hydrogen Energy, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122

mentalmente por el mayor coste asociado al uso de combustibles fósiles frente a una fuente renovable (prácticamente el doble), lo que supondría un ahorro significativo en combustible en el caso del vehículo de hidrógeno. En lo que respecta al sector de la aviación, en comparación con las aeronaves de queroseno, las de H_2 tienen diferentes costos de combustible e infraestructura ligados, la propia aeronave y las operaciones. En el estudio presentado por Clean Sky 2 JU and Fuel Cells and Hydrogen 2 JU[200], se analizan los costos de combustible que incluyen todos los costos de producción del combustible y la infraestructura necesaria para distribuir, almacenar y reabastecer a los aviones. No incluyen los efectos indirectos de segundo orden que son inciertos y difíciles de estimar hoy en día, como la posible necesidad de adaptar los tamaños de las cajas de embarque de los aeropuertos para acomodar aviones más largos. Para una aeronave de corto alcance en 2035, los costos aumentan alrededor de un 25 por ciento en comparación con una aeronave de queroseno ajustada a la nueva tecnología que provee desarrollarse hasta 2035. Las principales diferencias de costos provienen de los mayores costos de energía, que afectan en un 9%, el mayor CAPEX (es el coste de desarrollo o el suministro de componentes no consumibles para el producto o sistema) de la aeronave (7%), y los costos de mantenimiento (6%) y otros costos (3%).

A pesar de que las nuevas tecnologías basadas en combustibles sostenibles como el H_2 supongan un aumento en los costes y en la demanda de energía, debido a las infraestructuras que son necesarias, el gran impacto que supone en la reducción de emisiones de CO_2 (100% de reducción) y la reducción en el impacto medio ambiental (50-60%) suponen la ventaja y un gran beneficio que hace que estas nuevas tecnologías y combustibles sean rentables. La producción de hidrógeno a partir de biomasa renovable es una opción prometedora a medio plazo, con emisiones netas de carbono muy bajas. Asimismo, desde una perspectiva a largo plazo, la transición al hidrógeno a partir de la energía renovable debería permitir una movilidad con cero emisiones de carbono. Si bien esta tecnología está mejorando rápidamente, el alto costo de los electrolizadores y de la electricidad renovable constituyen barreras clave para una mayor absorción.

El despliegue actual de la infraestructura es limitado, y se centra fundamentalmente en proyectos piloto. Para ello, es necesario elaborar normas y reglamentos comunes relativos a la seguridad de las estaciones de repostaje, mantenimiento, sistemas de pago, etc.

Con los objetivos de la Organización Marítima Internacional de reducir las emisiones totales anuales de GEI en al menos un 50% para 2050 en comparación con 2008 y, finalmente, eliminar por completo las emisiones nocivas, es de suma importancia que la industria marítima mundial analice los combustibles renovables como el hidrógeno, el amoniaco y el metanol.

Por otro lado, una de las tecnologías más ampliamente probadas para la utilización del amoniaco es la de su aplicación en turbinas de gas. Hay que considerar que el desarrollo de turbinas de gas funcionando con NH_3 es un campo todavía inmaduro, con relativamente pocas publicaciones al respecto.

Finalmente, con referencia a planes a nivel español y europeo de apoyo al desarrollo de estos combustibles alternativos, teniendo en cuenta las diferentes convocatorias de financiación en la temática y las publicaciones de referencia, para un escenario a medio-largo plazo se puede ver que el hidrógeno y los llamados e-fuels (combustibles sintéticos a partir de CO_2 capturado + H_2 renovable) son aquellos que tienen un mayor horizonte de apoyo a su desarrollo.

200 - Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 (https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf)

Algunos estudios de referencia se indican a continuación:

- "A roadmap for the sustainable production of fuels and chemicals" https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/roadmap-sustainable-production-fuels-and-chemicals

- "Hoja de Ruta del Hidrógeno" https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/hoja-de-ruta-del-hidrogeno-renovable.aspx

- "A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review)" https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf

Análisis DAFO

El análisis DAFO recoge un resumen no exhaustivo de la información recolectada sobre los combustibles alternativos estudiados. Pretende señalar aquellos aspectos más importantes a tener en cuenta para la implementación de dichas tecnologías. De este modo, en la siguiente tabla, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de estas tecnologías:

Debilidades	Amenazas
Hidrógeno. • Dificultad en el sistema de almacenamiento y de seguridad. • Baja disponibilidad de hidrogeneras en España. • Los depósitos de hidrógeno son muy voluminosos limitando su implementación en vehículos privados. • Para la aviación, baja densidad de energía por unidad de volumen. Además, mayor consumo de combustible. Costo de capital mayor y reduce el espacio de carga. Amoniaco. • Excesiva producción de NOx en los sistemas de generación. • Debido a la naturaleza corrosiva del amoniaco se debe prestar especial atención a los componentes del motor compuestos de cobre y latón. • En el caso del biometano, DME y biometanol el despliegue actual de aplicación es limitado, incluidas las estaciones de repostaje disponibles, centrándose fundamentalmente en proyectos piloto.	• Barreras en cuanto a Demanda, Oferta e Infraestructura por cada una de estas tecnologías. • El uso de hidrógeno en el sector de la aviación requiere modificar el diseño tanto de la aeronave como de los motores. • El despliegue actual de la infraestructura de repostaje es limitado, y se centra fundamentalmente en proyectos piloto. • Aceptación pública considerando aspectos de seguridad (hidrógeno y amoniaco). • Baja viabilidad económica para la integración de tecnologías y producción. • El precio del combustible depende en gran medida del régimen de subvenciones e impuestos en cada país. No existe un enfoque comúnmente utilizado en Europa hasta el momento. • Dependencia de los costos de la gasificación de la biomasa.

Tabla 28. Análisis DAFO de nuevos combustibles derivados de residuos o producidos a partir de electricidad renovable.

Fortalezas	Oportunidades
• En el caso del hidrógeno, alto contenido energético y no generación de contaminantes. • El amoniaco puede ser usado como combustible en motores de combustión interna. • Existencia de una infraestructura considerable para el transporte y almacenamiento de amoniaco. • Posibilidad de aprovechamiento de infraestructuras existentes ya construidas para combustibles líquidos. • El DME no es un competidor directo de la producción de alimentos. • El DME como combustible en un motor diésel proporciona un grado de eficiencia tan alto y un nivel de ruido algo menor en comparación con un motor tradicional. • Aprovechamiento de corrientes de desechos de otros procesos industriales para producción de biometanol.	• La necesidad de mejorar las prestaciones de las baterías de vehículos eléctricos (autonomía y tiempo de descarga) favorece el desarrollo de nuevas tecnologías como las pilas de combustible de hidrógeno. • Actualmente se están adaptando los reglamentos de la Organización Marítima Internacional para prever la futura utilización de pilas de combustible en el transporte marítimo. • Objetivos de la OMI de reducir las emisiones totales anuales de GEI en al menos un 50% para 2050 en comparación con 2008. • Apoyo de diferentes fondos europeos para el desarrollo del uso del biometano para el transporte. • El biometanol se puede utilizar en los motores de ciclo Otto y Diésel. • Los Vehículos con Energía Alternativa son soluciones tecnológicas que ayudarán a cumplir los distintos compromisos exigidos por el marco legislativo y entorno internacional.

Tabla 28. Análisis DAFO de nuevos combustibles derivados de residuos o producidos a partir de electricidad renovable.

5.4 Nuevos materiales que permitan reducir el consumo o mejorar la eficiencia de los sistemas o equipos donde se utilicen (p. e. sensible reducción de peso de equipos de vehículos y naves)

Descripción

Los nuevos materiales son un factor clave a la hora de la fabricación de estructuras más eficientes que ayuden a la descarbonización tanto en el área de la edificación como en el sector transportes. Sin embargo, es estrictamente necesaria la evaluación de estos materiales, especialmente en el sector transporte, donde la alta resistencia mecánica y térmica de los materiales juega un papel muy importante. Además, en el mundo de la edificación hay que buscar nuevos materiales que mejoren la eficiencia de edificios rehabilitados, ya que gran parte de éstos fueron construidos cuando no había ninguna normativa relacionada con la construcción eficiente.

De este modo, a continuación, se presenta una descripción de las tecnologías con mayor potencial de alcanzar ahorros para los sectores de la construcción, aeronáutico y transporte. Cabe señalar que en el apartado de transportes ya se ha hecho mención del potencial de los nuevos materiales en el subsector ferrocarril (**sector 4 - 4.2**) y aéreo (**sector 4 - 4.3**), al igual que se mencionan nuevos materiales para la construcción en el apartado del sector de la edificación (**sector 3 - 3.1**).

Sector de la construcción

En el presente, la eficiencia energética de los edificios es una de las mayores preocupaciones, debido a los altos impactos en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Para reducir la demanda de energía, existen diferentes materiales innovadores (de cambio de fase, paneles de aislamiento de vacío, aerogeles, nuevas espumas de aislamiento, etc.) que pueden ser utilizados en la construcción, combinándolos con los materiales tradicionales[201,202].

Panel de aislamiento a vacío (VIP: Vacuum Insulation Panels)

Recientemente se han considerado los VIP, como una alternativa capaz de mejorar el rendimiento térmico de edificios con un espesor más reducido en comparación con el aislamiento tradicional de lana de roca o poliestireno expandido (EPS). Los VIP pertenecen a la prometedora familia de materiales de super aislamiento (SIM: Super Insulating Materials). El aislamiento térmico se obtiene mediante una carcasa hermética que rodea un núcleo rígido del que se ha evacuado el aire. Gracias a su alta resistencia térmica, su aplicación podría ser interesante en edificios modernos para que sean más eficientes energéticamente. A continuación, se muestra una tabla comparando la conductividad térmica de diferentes materiales aislantes y con la de los VIP[203,204,205].

201 - A. Magrini, G. Lentini, S. Cuman, A. Bodrato, and L. Marenco, "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example," Developments in the Built Environment, vol. 3, no. June, p. 100019, 2020.
202 - Smart Cities Stakeholder Platform, "Advanced Materials for Energy Efficient Buildings".
203 - J. Fricke, U. Heinemann, and H. P. Ebert, "Vacuum insulation panels-From research to market," Vacuum, vol. 82, no. 7, pp. 680–690, 2008.
204 - A. Hashemi, M. Alam, and K. Ip, "Comparative performance analysis of vacuum insulation panels in thermal window shutters," Energy Procedia, vol. 157, no. 2018, pp. 837–843, 2019.

Materiales aislantes	Conductividad térmica k ($W \cdot m^{-1} \cdot {}^{o}K^{-1}$)
Poliestireno expandido	0,058
Fibra de vidrio	0,046
Lana mineral o de roca	0,085
Silicato de calcio	0,058
Silicato de sodio	0,056
Corcho corrugado	0,064
Corcho aglomerado	0,045
Fieltro semirrígido	0,063
Vacuum insulation panels, VIP	0,005-0,008

Tabla 29. Conductividad térmica para diferentes materiales aislantes.

Materiales de cambio de fase

Como se ha descrito en el apartado del sector de la edificación, la incorporación de PCM en elementos construcción tiene sus dos mayores aplicaciones son el almacenaje de energía y el control térmico pasivo. Se pueden utilizar en paredes, techos y/o suelos, desde donde pueden regular la temperatura de edificios terciarios. Los dispositivos free cooling, o free heating, consisten en el confinamiento del PCM en tanques por los que se hace pasar el flujo de aire del edificio. Durante el día, los PCM absorben el calor bajando la temperatura de la sala (free cooling). Por la noche, los PCM devuelven el calor al ambiente (free heating), subiendo la temperatura de la sala y manteniendo así una temperatura estable durante las 24 horas. El uso de estos materiales permite una reducción de las temperaturas extremas y así como grandes fluctuaciones de temperatura, lo que resulta en un ahorro de energía (por ejemplo, de un equipo de aire acondicionado). Por lo tanto, los materiales de cambio de fase se muestran como una tecnología muy prometedora para reducir el alto consumo de energía de los edificios y sus impactos negativos en el medio ambiente[206].

Materiales reciclados

Una de las etapas del ciclo de vida de los materiales de construcción con mayor impacto ambiental es la valorización o depósito de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en vertederos. Tras la demolición o deconstrucción de un edificio, un alto porcentaje de los materiales se convierten en residuos. Su destino, ya sea la reutilización directa, el reciclaje o la deposición en vertedero, hará que su impacto ambiental sea menor o mayor.

Para reducir el impacto de los RCD y también reducir la extracción de materias primas, se está investigando el empleo de materiales reciclados en los nuevos productos de construcción. En la actualidad, en el sector de la edificación se percibe la proliferación de nuevos productos de construcción que in-

205 - Owens Corning, "Thermal conductivity of insulation materials," 2020. [Online]. Available: http://www.owenscorning.com/
206 - S. R. L. da Cunha and J. L. B. de Aguiar, "Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge," Journal of Energy Storage, vol. 27, no. September 2019, 2020.

corporan materiales reciclados (pétreos, plásticos, madera, vidrio, papel, etc.), gestándose lo que se ha venido a denominar una nueva generación de eco-productos que aúnan eficiencia y compromiso medioambiental[207].

Industria aeroespacial

La aeroespacial es una de las industrias pesadas más importantes del mundo. Sin embargo, junto con un valor económico sustancial viene un elevado consumo de recursos, y una de las mayores huellas de carbono en relación con el tamaño del mercado. Por esta razón, los principales impulsos de la I+D aeroespacial actual son hacia materiales estructurales más ligeros y motores más eficientes. El objetivo es frenar el consumo de combustible y las emisiones de carbono asociadas a los viajes aéreos y al transporte de mercancías. Los nanomateriales y la nanoingeniería están ayudando poco a poco a alcanzar estos objetivos, lo que justifica el gran interés de la industria aeroespacial por la nanotecnología.

Metales nanoestructurados

Los metales nanoestructurados, definidos como metales formados por cristales de tamaño nanométrico, presentan propiedades considerablemente mejores en comparación con sus análogos con estructura de macroscópica o de grano más grande. Pueden mejorar propiedades cruciales para aplicaciones aeroespaciales, como son el módulo elástico, la resistencia a la tracción, la resistencia a la corrosión o una menor densidad para facilitar reducciones sustanciales en el peso estructural.

Además, se ha demostrado que los metales nanoestructurados no sólo muestran propiedades mejoradas, sino que también pueden diseñarse para aportar propiedades no características de materiales de tamaño convencional. Un ejemplo de esto son las aleaciones nanoestructuradas de titanio y níquel que tienen gran elasticidad[208].

Nano composites poliméricos

Varios nanomateriales se han utilizado con éxito en la construcción de aeronaves como materiales de relleno (aditivos) en los polímeros, para mejorar las propiedades estructurales y no estructurales. Los nano composites más utilizados incluyen nanotubos de carbono, nanoarcillas, nanofibras y grafeno.

Los nanotubos de carbono (CNTs: Carbon Nanotubes,) se pueden usar como aditivo en diferentes polímeros debido a su excepcional rigidez, dureza y propiedades eléctricas únicas. Las propiedades eléctricas de los CNTs fueron empleadas para la disipación de la carga electrostática y el blindaje de la interferencia electromagnética en el satélite Júpiter lanzado en 2011.

Las nanoarcillas (nanoclays) también se utilizan con frecuencia en la fabricación aeroespacial debido a sus propiedades ignífugas. Esto, combinado con su alta resistencia, bajo peso y costo relativamente bajo, han hecho de los nanocompuestos epoxi/arcilla un sustituto asequible y de alto rendimiento del dióxido de titanio, empleado para atenuar la permeabilidad de los tanques de combustible en la aviación.

Una ventaja excepcional que proporcionan todos los nano composites poliméricos es su estructura intrínseca libre de defectos a nivel de cristal. Como resultado, su resistencia a la deformación es muy superior a la de los polímeros más grandes. Teniendo en cuenta la carga extrema a la que están sometidos los vehículos aeroespaciales, esto tiene el potencial de reducir el tiempo y el costo incurridos en el mantenimiento requerido[209,210].

207 - M. Marrero Meléndez, "Aislamiento y reciclaje para reducir el consumo energético de las viviendas en Andalucía." Jornada Nacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficiente, Sevilla, 2011.
208 - R. Z. Valiev, I. Sabirov, A. P. Zhilyaev, and T. G. Langdon, "Bulk nanostructured metals for innovative applications," Jom, vol. 64, no. 10, pp. 1134–1142, 2012.

Recubrimientos tribológicos y anticorrosivos

Otra tendencia en los materiales de las aeronaves es la utilización de nano recubrimientos sobre las aleaciones de magnesio, para aumentar la durabilidad de los metales. Por un lado, las aleaciones de magnesio son mucho más ligeras que el acero o el aluminio, pero, se ven comprometidas por su susceptibilidad a la corrosión, causada por la alta reactividad química del magnesio.

La solución más común para combatir la corrosión es utilizar un recubrimiento. Sin embargo, los recubrimientos a base de cromo actuales pueden ser cancerígenos. Los nanomateriales utilizados como alternativa al cromo incluyen óxidos de silicio y boro y nano cristales de cobalto y fósforo. Desafortunadamente, todavía no se ha desarrollado un revestimiento adecuado para aluminio, normalmente utilizado en estructuras aeronáuticas, lo que plantea uno de los desafíos más apremiantes para el sector. La superficie heterogénea del aluminio hace que sea particularmente vulnerable a la corrosión. Las investigaciones recientes identifican los nanocompuestos de magnesio como una alternativa prometedora.

Además de utilizarse para prevenir la corrosión, también se pueden aplicar estos recubrimientos a componentes mecánicos sometidos a altas temperaturas y al desgaste por fricción, como las palas de turbina. Estos recubrimientos pueden reducir drásticamente el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia al desgaste, lo que mejora significativamente la eficiencia del motor y ayuda a reducir el consumo de combustible.

A lo largo de los años han aparecido muchos materiales nanoestructurados como posibles agentes modificadores de la fricción, como pueden ser: carburos, nitruros, metales y diversas cerámicas[211,212].

Sector transporte

Además de los nanomateriales - ya comentados en el anterior apartado (nano metales, nano composites poliméricos, etc.) - que se pueden aplicar en este sector, una nueva tendencia interesante y de gran aplicación podrían ser los recubrimientos autorreparables.

Recubrimientos autorreparables de poliuretanos

Los recubrimientos autorreparables están despertando un gran interés en el sector de automoción. El gran valor añadido del que disponen estos recubrimientos reside en su habilidad para remediar, por sí mismos, los daños recibidos. En algunos casos incluso pueden ser capaces de eliminar imperfecciones de forma repetida. De este modo, aumentan el ciclo de vida, y reducen costes de mantenimiento y reparación del vehículo recuperando las prestaciones iniciales.

Por todas estas ventajas, durante los últimos años, el sector del automóvil está desarrollando nuevos recubrimientos autorreparables (self-healing). En este campo de aplicación tan interesante, los poliuretanos destacan por encima de otros materiales poliméricos por sus propiedades amortiguadoras y baja densidad, y sus propiedades de aislamiento térmico, de ruido, resistencia y durabilidad. Su baja densidad desplaza el uso de materiales más pesados, aumentando la eficiencia del vehículo en el uso

209 - V. T. Rathod, J. S. Kumar, and A. Jain, "Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace applications," Applied Nanoscience (Switzerland), vol. 7, no. 8, pp. 519–548, 2017.
210 - NASA Technical Reports, "Graphite Nanoreinforcements for Aerospace Nanocomposites," 2020.
211 - R. D. Davidson, Y. Cubides, J. L. Andrews, C. M. McLain, H. Castaneda, and S. Banerjee, "Magnesium Nanocomposite Coatings for Protection of a Lightweight Al Alloy: Modes of Corrosion Protection, Mechanisms of Failure," Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2019.
212 - S. Dinca, I., Manoliu, V., Stefan, A., Stan, A., & Llina, "Nanocomposites and Nanotechnologies in Aerospace Research," National Institute for aerospace research and development, 2010.

del combustible. Además, estos polímeros destacan por su buena adherencia sobre cualquier tipo de sustrato y por aportar propiedades tales como resistencia al desgaste y a la intemperie. También combinan la dureza con un alto grado de elasticidad y resistencia química frente a diferentes sustancias (ácidos, bases, compuestos orgánicos, etc.). La combinación entre la versatilidad y buenas prestaciones de los poliuretanos, ha llevado a los científicos al empleo de estos materiales poliméricos como candidatos idóneos para el desarrollo de este tipo de recubrimientos inteligentes autorreparables.

La clasificación de los recubrimientos autorreparables se puede hacer en función de la naturaleza del agente reparador intrínseco o extrínseco. Los materiales de autorreparación considerados intrínsecos pueden consistir, por una parte, en polímeros que contienen uniones químicas o físicas, térmica o fotoquímicamente reversibles o, por el contrario, en matrices poliméricas con memoria de forma. La vida útil de este tipo de agentes autorreparables se considera prácticamente infinita. En el caso de los agentes extrínsecos, su aplicación no resulta tan interesante por el hecho de que los materiales autorreparables suelen ir encapsulados. Esto conlleva que la duración del efecto autorreparable esté ligada a la cantidad de material dentro de la cápsula, y su vida útil sea más baja que en el caso de los agentes autorreparables intrínsecos.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

El proyecto E2PBEER (Affordable and Adaptable Public Buildings through Energy Efficient Retrofitting) - un proyecto de investigación financiado parcialmente por "Horizonte 2020" - ha desarrollado una metodología rentable de "modernización energética eficiente" para edificios públicos, aprovechando los VIPs. Sin embargo, las barreras actuales para la aplicación de esta tecnología son: el riesgo de daños durante la instalación; la falta de conocimiento sobre su durabilidad y vida útil; los efectos de puente térmico entre los paneles que, si no se mitigan adecuadamente, pueden comprometer el rendimiento final; y el alto costo inicial en comparación con los materiales aislantes comunes[213,214].

Los VIPs se comercializan actualmente llegando a durabilidades máximas de 60 años de servicio, siendo una de sus más prometedoras aplicaciones los sistemas compuestos de aislamiento térmico externo. Sin embargo, las mayores preocupaciones técnicas son el efecto de puente térmico en el borde del panel y el riesgo de condensación superficial. Además, es necesario que aumente la confianza en estos paneles haciéndolos más atractivos para las constructoras y reduciendo así su coste. Por estos motivos, la tecnología VIP dentro de estas aplicaciones se encuentra hoy en día en torno a un TRL7, a la espera de métodos de validación estándar que promuevan su lanzamiento[215].

Con relación a los PCM como nuevos materiales, todavía hay algunas necesidades de investigación en lo que respecta a las técnicas de incorporación y aplicaciones de estos materiales en los elementos de construcción exteriores[216,217]. Otros elementos clave que se tienen que mejorar son el coste de los materiales debido al desconocimiento de esta tecnología, y su lenta incorporación en el mercado español. Por lo tanto, hay acciones importantes pendientes que sitúan esta tecnología en un TRL 5-

213 - A. Magrini, G. Lentini, S. Cuman, A. Bodrato, and L. Marenco, "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example," Developments in the Built Environment, vol. 3, no. June, p. 100019, 2020.
214 - Smart Cities Stakeholder Platform, "Advanced Materials for Energy Efficient Buildings."
215 - Márcio Gonçalves, Nuno Simões, Catarina Serra, Inês Flores-Colen, "A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems", Applied Energy, Volume 257, 2020, 114028.
216 - Smart Cities Stakeholder Platform, "Advanced Materials for Energy Efficient Buildings".
217 - S. R. L. da Cunha and J. L. B. de Aguiar, "Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge," Journal of Energy Storage, vol. 27, no. September 2019, 2020.

6[218]. Los materiales más esperanzadores para su uso en edificios son las parafinas debido a su larga vida útil trabajando en aplicaciones de baja temperatura (-15 – 100 °C).

Tendencias actuales como la adición de nanocompuestos de grafeno de núcleo cerámico a materiales de construcción se sitúan en TRLs en torno a 3[219]. La tecnología utilizada por suntalphy[220] podría considerar en TRLs en torno al 7-8.

En el sector ferroviario las tendencias actuales se centran en la conformación de grandes piezas utilizando impresoras 3D, pero se podría decir que el uso de nuevos materiales compuestos ultraligeros que cumplen con los requisitos FST más exigentes está avanzando hacía niveles TRL 7[221]. En el mundo automovilístico, los materiales self-healing, en especial elastómeros y polímeros, están ganando mucha atención, pero aún se encuentran en fase experimental (TRL 3 – 4)[222,223].

Por parte de materiales para el sector aeroespacial y aeronáutico, los aerogeles de poliamida se encuentran en fase experimental[224], y la adición de materiales de carbono (nanotubos, fibras, materiales basados en grafito, etc.) se encuentra en TRLs 4-6[225,226].

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Como se ha expuesto anteriormente, dado que estos materiales ya se han explicado en otras secciones, en este epígrafe, el cálculo de los ahorros se va a acotar al sector aeroespacial y a los PCM.

En el caso del sector del transporte nos centramos en el uso de nanomateriales en estructuras plásticas que pueden llegar a reducir el consumo de combustible en una aeronave[227]. En el año 2018, el tráfico aéreo nacional e internacional español consumió 4.473 ktep[228]. El tráfico aéreo previsto para el año 2030 conllevará un consumo de 5.472ktep (233.838 TJ)[229]. Considerando una reducción de combustible igual al 25% para el 20% de los aviones, el ahorro en energía sería igual a 274 ktep (11.694 TJ[230]). Si consideramos que todo el combustible es queroseno, ya que los factores de emisión del queroseno y de la gasolina u otros productos petrolíferos son similares, el factor de emisión utilizado sería 71.500 kg CO_2-eq/TJ. Por lo tanto, los ahorros medioambientales serían 0,836 millones de t CO_2-eq.

218 - Bland, A.; Khzouz, M.; Statheros, T.; Gkanas, E.I. PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development. Buildings 2017, 7, 78.
219 - https://www.lavanguardia.com/local/valencia/20190122/454264100976/desarrollan-nuevo-material-para-la-construccion-que-mejora-la-sostenibilidad.html.
220 - https://sunthalpy.com/en/what-we-do/
221 - https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/302277-Cidetec-desarrolla-materiales-compuestos-ultraligeros-cumplen-requisitos-FST-mas.html
222 - https://www.engineerlive.com/content/self-healing-materials-and-automotive-industry.
223 - Chirag Goyal, Viraj Dhavalkumar Modi, V. Paulson, Stanley Samlal, "Self-healing composites: A review on material characterization and testing methods", Materials Today: Proceedings, 2020.
224 - Yixing Wang, Taijun He, Zheng Cheng, Mengyun Liu, Jianqi Ji, Xinhao Chang, Qiang Xu, Yang Liu, Xiangyang Liu, Jiaqiang Qin, "Mechanically strong and tough polyimide aerogels cross-linked with amine functionalized carbon nanotubes synthesized by fluorine displacement reaction", Composites Science and Technology", Volume 195, 2020, 108204.
225 - https://www.mastro-h2020.eu/
226 - https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-and-sgl-carbon-collaborate-develop-highly-competitive-advanced-carbon-fiber
227 - EA5d. Strategic Plan: Nanotechnology in the plastic sector. http://sudoenanodesk.net/public/docs/deliverables/EA5d.%20Plastic%20Sector%20Strategic%20Plan.pdf
228 - IDAE. Consumo de energía final. http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal01.asp
229 - BORRADOR ACTUALIZADO DEL PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030. https://www.miteco.gob.es/images/es/pniec_2021-2030_borradoractualizado_tcm30-506491.pdf
230 - Huella de carbono del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; NIPO 280-15-142-X. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/hc_magrama_2013_tcm30-178455.pdf

En el caso de los PCM, los ahorros no se pueden cuantificar porque se utilizan como complemento del sistema tradicional de calefacción, refrigeración y ACS. Además, los PCM tienen aplicaciones muy versátiles, lo que no permite obtener un dato de ahorro absoluto. Por ejemplo, en el proyecto CERACASA la introducción de PCM en baldosas significó una reducción de un 16% en el consumo eléctrico. Sin embargo, en el proyecto EMILIE se consiguieron ahorros anuales del 5-30% cuando el PCM se introducía dentro del acristalamiento. La utilización de estos materiales permitiría que los sistemas tradicionales trabajen menos y tengan un dimensionamiento menor, lo que acarreará ahorros energéticos.

Análisis DAFO

El análisis DAFO de esta sección se ha concentrado en el estudio de dos tipos de materiales: PCM para el sector de la construcción y el uso de nanomateriales en estructuras plásticas en la industria aeroespacial. Esta focalización se hace teniendo en cuenta que hay otras secciones en las que ya se hace referencia al sector de la edificación y transportes (**sector 4 - 4.2, sector 4 - 4.3,** y **sector 3 - 3.1**).

En primer lugar, se presenta el análisis DAFO de los PCM.

Debilidades	Amenazas
• Poco conocimiento de estos materiales por parte de los cuadros técnicos. • Rendimiento ligado a la cantidad de material - la cantidad de material determina el coste y la aplicabilidad. • Riesgo de fuego de los PCM orgánicos (ej: parafinas). • Bajo ratio de encapsulamiento. • Ocupan espacio - difícil aplicación en edificios particulares. • No pueden sustituir al sistema de climatización por completo. • Dependencia de las condiciones ambientales. • TRLs bajos: 3-5 en el mercado nacional.	• Coste de los materiales para encapsular. • Vida útil de los materiales utilizados para encapsular. • Cambio en las propiedades reológicas del material en el que se incorporan (morteros, cemento...). • Procesamiento de los PCMs junto otros materiales de construcción: estudio de costes y de optimización de los procesos de aplicación. • Proyectos I+D muy costosos ya que se requiere la construcción de un prototipo.

Tabla 30. Análisis DAFO para los materiales de cambio de fase para el sector de la edificación.

Fortalezas	Oportunidades
• Ahorro energético y ambiental (CO_2) por almacenamiento de energía y control térmico pasivo. • Larga vida útil del material. • Materiales respetuosos con el medio ambiente. • Tecnologías ya desarrolladas en otros países - conocimiento. • Bajo coste de los materiales activos térmicamente. • Fácilmente encapsulable y tipo de encapsulamiento muy versátil. • Integración versátil: ventanas, paredes, techos, suelos.	• Recuperación y almacenamiento de calor en instalaciones industriales. • Integración de PCM en paneles o en suelos radiantes. • Integración en tanques de agua para zonas residenciales o polígonos. • Sinergias construcción - productores de PCM - centros de investigación. • Utilización de sales con mayores calores de fusión que las parafinas - hay que trabajar en el encapsulado. • Los PCMs son una solución pasiva que revaloriza toda la cadena de edificación. • Programas de I+D para optimizar la procesabilidad de los PCMs y posterior MARKETING.

Tabla 30. Análisis DAFO para los materiales de cambio de fase para el sector de la edificación.

En el caso de los PCM, una de las grandes debilidades es el desconocimiento de estos materiales. Arquitectos y constructoras no tienen en cuenta la utilización de estos materiales, a pesar de que son materiales comerciales en otros países como Francia y Estados Unidos. Sin embargo, en España no se han desarrollado, y esto es en gran parte por la falta de validación en prototipos y porque dichos materiales encarecen productos que hoy en día son muy baratos (como el mortero o el cemento). Además, hay que invertir en investigación para los procesos, tanto de encapsulación de los PCMs, como de aplicación de la mezcla [PCM + material construcción]. Hay una necesidad importante de invertir para el desarrollo de un prototipo que incorpore estos materiales, y desde el que se pueda ver la existencia real de un aumento de la eficiencia energética y un ahorro. En contraste con las debilidades, estos materiales ofrecen aplicaciones muy diversas para edificios terciarios, siendo un complemento al sistema térmico tradicional. El precio de éstos no es alto: en este caso hablaríamos de parafinas (1-2€/kg), que, si se encuentran bien encapsuladas, no dan lugar a incendios y tienen una alta vida útil.

En segundo lugar, se presenta el análisis DAFO del uso de materiales avanzados para reducir el peso de las naves utilizadas en aviación.

Las estrategias tecnológicas actuales en las que trabaja la industria aeroespacial son las nuevas arquitecturas del motor y los sistemas de propulsión híbrida. Sin embargo, el uso de materiales más ligeros, pero con las características térmicas y mecánicas adecuadas está en continuo desarrollo. Una de las debilidades de cualquier tecnología que quiera integrarse en este mercado es la escasez de unidades (aviones), y por lo tanto de productores. Por otro lado, todos los nuevos materiales o estructuras que se pretende incorporar han de pasar unas rigurosas pruebas de aceptación en fábrica, lo que retrasa su implementación. El refuerzo de materiales

plásticos con nanomateriales de carbono ya se realiza en otras industrias como la automovilística, por lo que ya hay mucho aprendizaje ganado. Por otro lado, los gobiernos están impulsando la reducción de emisiones de CO_2 en el sector, lo que con la ingeniería actual se traduce en reducir el peso del avión para gastar menos combustibles fósiles. Se prevé que el consumo en combustible baje un 25% si se incorporan estos tipos de materiales.

Debilidades

- Nicho de mercado: menos unidades que en otro tipo de transportes y el coste de implementar una nueva tecnología es alto.
- Su implementación es este sector irá más lenta.
- Rigurosas pruebas de aceptación en fábrica.
- Necesidad de producción a gran escala.

Amenazas

- Riesgos asociados a los procesos de producción de nanomateriales - necesidad de normativa.
- No existen herramientas de predicción y gestión de riesgos, además de equipos de medición para la evaluación de riesgos.
- Desarrollo de la tecnología lento y caro.

Fortalezas

- Materiales desarrollados paralelamente en el mundo de la automoción.
- Mundo globalizado - alto uso de la tecnología aeroespacial.
- Materiales fuertes y ligeros, con muy buenas características físicas, químicas, eléctricas, térmicas y mecánicas.
- Reducción del consumo de combustible y de las emisiones de CO_2.
- Mejora del confort del pasajero (aumento de la presión en la cabina).

Oportunidades

- Solución más inmediata para reducir el peso de los aviones.
- Se prevé (post covid19) que el tráfico aéreo se incremente.
- Gran interés de las empresas - aumento de la competitividad.
- Compromiso medioambiental por parte de muchos países.
- Interés social.
- Nuevas técnicas de simulación.

Tabla 31. Análisis DAFO de los materiales avanzados para la aviación.

5.5 Sistemas fiables de monitorización, control, mantenimiento predictivo, diagnóstico de averías y tele-reparación, basados en Inteligencia Artificial

Descripción

La evolución de la Inteligencia Artificial, unida al aumento de la capacidad de cómputo y almacenamiento al aplicar tecnologías *Big Data*, permiten procesar grandes volúmenes de datos combinando información de múltiples fuentes, verificar el correcto funcionamiento de los equipos, y recomendar las mejores estrategias de actuación de forma automática y en tiempo real. El análisis de estos datos permite estimar diferentes características del estado de operación de las máquinas, pudiendo ayudar a predecir fallos potenciales, diagnosticar las causas de las averías y ayudar en la tele-reparación de los equipos utilizando sistemas por control remoto o drones.
En la actualidad los conocimientos y tecnologías para aplicar estos principios se encuentran en diferentes fases de desarrollo:

• Análisis y predicción de series temporales mediante algoritmos estadísticos o técnicas de aprendizaje automático como *Deep Learning*. Se utilizan para pronosticar la evolución de las variables, haciendo posible anticipar potenciales averías o estados de operación subóptimos o peligrosos.

• Sistemas de clasificación automática que, con base en el aprendizaje de datos históricos, realizan el diagnóstico de las máquinas, pudiendo detectar la fuente de la avería y recomendar acciones para su solución.

• Algoritmos de optimización para planificar los mejores modos de operación de los equipos en función de variables y condicionantes externos. En aquellos casos donde el volumen de información es alto, con relaciones complejas entre las variables analizadas, es posible aplicar algoritmos metaheurísticos, que son capaces de converger a soluciones cercanas al óptimo en aquellos casos que serían imposibles de abordar mediante otros enfoques debido a su alto coste computacional.

• Métodos de aprendizaje por refuerzo para recomendar las acciones más adecuadas según el estado de la máquina observado. Estas técnicas se enmarcan en el área de la inteligencia artificial y son capaces de aprender a interaccionar con el entorno y encontrar la mejor línea de actuación de acuerdo con los objetivos perseguidos.

El comportamiento y alcance de estas tecnologías depende del volumen y calidad de los datos proporcionados, por lo que es necesaria la digitalización de los equipos para poder monitorizarlos de forma adecuada. También se requiere una arquitectura apropiada que permita el flujo de datos masivo y su procesamiento, muchas veces en tiempo real, para ofrecer respuesta automática y en el tiempo estipulado.

Monitorización y control

Los sistemas de monitorización y control permiten sumar datos de múltiples fuentes del proceso para aportar información útil que permita reducir los costes de operación y controlar el desempeño de manera continua.

Las fuentes de información van desde sensores instalados para controlar variables en campo (temperatura, vibración, presión, consumo energético…), pasando por la integración de información de los autómatas de los sistemas actuales, hasta la correlación de estos datos con variables de rendimiento productivo.

Estos sistemas permiten crear *dashboards* o cuadros de mandos de control en tiempo real, observar el estado de las instalaciones frente al esquema del sistema, realizar registros de incidencias o sucesos y aportar funciones de *reporting* y análisis comparativo.

El gran reto en el desarrollo de estos sistemas está en convertirlos en sujetos activos en el mantenimiento de las instalaciones. Mediante sistemas de respuesta automática, la monitorización pasa a no sólo ser una fuente de consulta para el técnico, sino a aportarle información directa para la gestión de las instalaciones.

Las aplicaciones de inteligencia artificial y *machine learning* permitirán detectar situaciones y patrones de fallo mediante el estudio del histórico de datos para predecir y alertar de posibles problemas con anterioridad a que ocurran, reduciendo ostensiblemente los tiempos de parada y permitiendo estudiar en detenimiento estas causas y determinando patrones para evitarlas en la medida de lo posible.

Big Data en la nube

La recopilación de un gran volumen de datos sobre el estado y el funcionamiento de los equipos, unida a la información de otras variables externas, como predicciones meteorológicas, hacen necesarias arquitecturas que permitan procesarlas en un tiempo adecuado para proporcionar respuestas automáticas con rapidez. Los requisitos computacionales y de almacenamiento de estas aplicaciones requieren infraestructuras adecuadas, normalmente distribuidas e interconectadas a través de una red. Las tecnologías Big Data permiten escalar el análisis de estos volúmenes de datos masivos, de modo que sea posible analizarlos de forma distribuida, en sistemas en clúster.

Una ventaja importante de estas arquitecturas es la facilidad de integración en las aplicaciones empresariales, la portabilidad y la seguridad de la información. Además, los sistemas de computación tienen una alta tolerancia a fallos, lo que les permite recuperarse en caso de mal funcionamiento en alguno de los equipos del clúster, o recepción incorrecta de los datos.

Estas tecnologías son idóneas para la monitorización y detección de averías en equipos ya que permiten tratar con datos generados de forma constante y en grandes volúmenes (data streaming) que necesitan ser procesados para extraer y estructurar la información relevante, ya que normalmente no pueden ser almacenados en su totalidad. Los métodos de *data streaming* permiten analizarlos de forma eficiente, proporcionando una respuesta automática que cumpla las restricciones de tiempo establecidas, lo cual resulta indispensable, por ejemplo, en la detección y prevención de averías inminentes.

Mantenimiento predictivo y diagnóstico de averías

Los sistemas de mantenimiento predictivo utilizan los datos del sistema (eficiencia, operación, temperaturas, vibraciones, distorsión de la señal eléctrica,

etc.) y algoritmos de inteligencia artificial para predecir la ocurrencia del fallo al identificar patrones y causas (root-cause analysis), focalizando la atención del personal en los elementos del sistema con probabilidad de fallo y detectando de forma temprana fallos presentes o inminentes.

Estos sistemas son capaces a su vez de estimar la vida útil restante de los sistemas (Remaining Useful Life o RUL). La conjunción de estas funcionalidades, y su sincronización planes de producción y mantenimiento, suponen un importante soporte en tiempo real a la toma de decisiones del personal.

Detección y prevención del fallo

En el mantenimiento predictivo o por condición, se evalúan el estado de los componentes mecánicos o eléctricos mediante técnicas de seguimiento y análisis, permitiendo programar las operaciones de mantenimiento "solamente cuando sean necesarias". Consiste esencialmente en el estudio de ciertas variables o parámetros relacionados con el estado o condición del equipo en cuestión, como la vibración, temperatura, aceites, aislamientos, etc. El estudio de estos parámetros suministra información del estado de sus componentes y, algo también muy importante, del modo en que está funcionando dicho equipo, permitiéndonos no sólo detectar problemas de componentes sino también de diseño y de instalación. El objetivo del mantenimiento predictivo es la reducción de los costes de operación y de mantenimiento incrementando la fiabilidad del equipo.

Una parte importante de un programa de mantenimiento predictivo es tener la capacidad de verificar una avería con más de una tecnología. Esto no sólo asegura la validez del diagnóstico, sino que también ayuda a hacer recomendaciones de reparación más concretas y precisas.

Podemos tomar como ejemplo el fallo en un rodamiento de una bomba, el cual ya tiene un daño severo, de tal manera que hemos detectado mediante análisis de vibraciones dicho fallo, pero para asegurarnos, decidimos completar el estudio mediante otra tecnología, por lo que nos decantamos por el análisis de aceite, con el fin de encontrar partículas metálicas en dicho análisis.

Son muchas y muy variadas las fuentes de datos que se pueden aplicar al campo del mantenimiento predictivo, entre las cuales podemos enumerar: análisis de vibraciones, termografía, inspección visual, análisis de aceite, ultrasonidos o análisis de corrientes de motores.

Mediante la monitorización diferentes datos, tanto de máquinas como de producción, se puede conocer cómo trabaja el sistema para evaluar y detectar problemas antes de que se produzcan. La utilización de Inteligencia Artificial permite una gestión del mantenimiento predictivo más eficaz y rápido.
Todos estos datos, los capturados en tiempo real y los históricos, e incluso datos de equipos semejantes, pueden ser utilizados para mejorar el mantenimiento predictivo, y que las máquinas aprendan y puedan detectar problemas de forma autónoma, mostrando alarmas de fallo indicando cuándo se tiene que cambiar una pieza o incluso, en casos extremos, parar de forma preventiva la producción.

Como ejemplo, el personal de mantenimiento puede utilizar tanto móviles como tabletas los cuales están conectados a sistemas de Deep Learning para obtener las causas de fallo de una máquina a partir de una foto, gracias a los algoritmos de reconocimiento de imágenes. El trabajador recibe una explicación de cómo arreglar dicho fallo, e incluso pueden comunicarse con comandos de voz para habilitar el trabajo en manos remotas.

Estimación de la vida útil restante de los sistemas (Remaining Useful Life o RUL)

Los sistemas de mantenimiento predictivo avanzados pueden llegar a estimar la vida últil restante de los equipos o *Remaining useful life (RUL)*, con dos objetivos principales: predecir roturas evitar paradas o analizar la influencia de variables externas (temperatura, humedad, periodicidad de mantenimiento, etc.) en la vida útil de los equipos para mejorar sus condiciones de trabajo y alargar su vida operativa.

Esta información es clave para la organización del mantenimiento de las instalaciones y optimizar su rendimiento.

Los algoritmos de estimación de la vida útil restante emplean indicadores y variables registradas para buscar patrones de degradación y/o cambios de operación.

Los algoritmos y métodos dependen de la información que haya disponible acerca del sistema:

- Datos de la vida útil de sistemas similares hasta su punto de fallo.

- Los modelos y las distribuciones de probabilidad de los tiempos de falla de los componentes se utilizan para estimar la RUL a partir de datos de vida útil. Un ejemplo es la estimación del tiempo de descarga de una batería en función de los valores anteriores y variables como la temperatura a la que la batería funcionaba y la carga.

- Datos históricos de máquinas similares desde puesta en marcha hasta fallo.

- Si hay una base de datos de puesta en marcha a error de sistemas similares o semejantes, se puede estimar la vida restante utilizando métodos de similitud. Estos métodos capturan perfiles de degradación y los comparan con nuevos datos procedentes de la máquina para determinar qué perfil de los datos de partida coincide más estrechamente con los datos del sistema a evaluar.

- Indicadores de estado conocidos y umbrales a partir de los cuales se evidencia el fallo.

- En muchos casos no se dispone de un histórico tan detallado, pero se dispone de información sobre los valores umbral recomendados de ciertas variables. Por ejemplo, la temperatura de un líquido en una bomba o la presión mínima o una conjunción de varias condiciones. Con este tipo de información, se pueden ajustar los modelos de serie temporal a los indicadores de condición extraídos de los datos del sensor, como la temperatura y la presión, que suben o bajan con el tiempo.

Con unas estimaciones fiables de la vida útil restante podemos integrar la información en la gestión de mantenimiento de los sistemas y los equipos pueden responder a los cambios en el estado del sistema lo antes posible y sin afectar a las operaciones.

Soporte en tiempo real a la toma de decisiones

Con las herramientas GMAO actualmente se comnsigue una gestión de los servicios de mantenimiento bastante completa, pasando desde la gestión de activos hasta la gestión de mantenimientos preventivos y correctivos.

Actualmente, gracias a la inteligencia artificial y machine learning, esto podría ir más allá de lo que se e conoce. Es posible conectar algunos sistemas GMAO con la sensórica de las máquinas de planta, de tal manera que se pueda realizar un mantenimiento basado en condición, el cual podría lanzar órdenes de trabajo según el estado del equipo.

Por ejemplo, una máquina a la que se le ha aplicado esta tecnología podría detectar qué un rodamiento está fallando y directamente mandar una orden de mantenimiento para sustituirlo, evitando así que esta información pase por varias personas, por lo que se reduce el MTTR (tiempo medio de reparación).

Incluso, esta información podría estar conectada con el departamento de almacén, de tal manera que, en el momento que este equipo detecte un fallo, y no exista repuesto, se envíe una orden de pedido de este componente.

En definitiva, la implementación de estos sistemas, permite optimizar los recursos empleados en el mantenimiento e incluso realizar una mejor gestión de inventario o compras.

Tele-reparación y soporte remoto

La monitorización continua del estado de los equipos y sistemas permite su gestión y control en remoto, independientemente de la ubicación geográfica en la que se encuentren.

Estas instalaciones de soporte remoto son especialmente beneficiosas en aplicaciones de alta criticidad y/o con una alta dispersión geográfica. Dos sectores de aplicación de alto potencial son las grandes plantas industriales e instalaciones de generación de energía como parques eólicos o fotovoltaicos. Con estas soluciones, los departamentos de mantenimiento están presentes en cada ubicación y equipo sin necesidad de desplazarse desde su centro de control.

La tecnología de soporte remoto permite recibir alertas e incidencias de los sistemas y equipamiento para proceder a su resolución, mejorando los tiempos de respuesta y reduciendo al mínimo los costes asociados a la intervención. Dependiendo de las características de la falla, esta podrá ser resuelta en remoto en caso de que los sistemas de actuación lo permitan o a través de la coordinación de trabajos con el personal de campo.

En caso de necesitar personal *in situ*, ya sea por necesidad de reparación en local como en caso de averías mecánicas o por acceso a sistemas legados sin control remoto, el centro de soporte puede seguir presente a través de la aplicación de sistemas de visión/realidad aumentada con sensores en manos y gafas, mediante los cuales tienen en tiempo real video y comunicación directa con el personal desplazado, permitiendo que el centro de soporte asista al técnico de campo en directo, permitiendo ver el estado de la instalación e intercambiar información y archivos.

Nivel de desarrollo tecnológico y perspectivas de evolución

Esta medida abarca un abanico amplio de posibles soluciones de inteligencia artificial, a su vez aplicables en múltiples sectores productivos. En conjunto, se considera que el desarrollo actual de la tecnología es TRL 6 teniendo en cuenta el grado de innovación de los sistemas descritos.

A nivel de monitorización y control, el estándar actual es disponer de un control en tiempo real, de mayor o menor calado, de los parámetros de producción a través de un ERP para su estudio posterior. De manera incipiente las aplicaciones de inteligencia artificial y *machine learning* permiten detectar desviaciones y patrones de fallo mediante el estudio del histórico de datos, para predecir y alertar de posibles problemas previamente a que ocurran. Esto convierte a los sistemas en un soporte activo, capaz de procesar volúmenes de información más elevados que el personal de gestión y, por tanto de extraer conclusiones más complejas. Sobre esta base se construyen los sistemas de mantenimiento predictivo y diagnóstico de averías.

En sistemas de tele-reparación, se contempla que en el futuro sea habitual la supervisión y detección de fallos en equipos a través de la supervisión de drones autónomos, como ya sucede en parques fotovoltaicos. Además, aplicar algoritmos de inteligencia artificial podrá favorecer el desarrollo de sistemas multiagente, que podrán operar de forma colaborativa en entornos compartidos con personas.

Por otro lado, la investigación y el desarrollo de drones manipuladores de alta precisión permitirá aumentar sus competencias, pudiendo realizar tareas de mantenimiento y reparación complementarias a la detección y el diagnóstico de las averías. En el futuro es previsible que se produzcan avances significativos en esta línea de investigación, dado que, en algunos entornos, especialmente en aquellos que puedan resultar peligrosos, supondría un ahorro significativo de los costes y reduciría los riesgos laborales para las personas.

Proyecto MONSOON (2016-2019) inteligencia artificial innovadora para mejorar la eficiencia de los recursos y la energía.
https://www.spire2030.eu/monsoon

Proyecto Z-BRE4K (2017-2021) La solución Z-Break comprende la introducción de estrategias escalables a nivel de componente, máquina y sistema para la predicción y prevención de fallas, la detección temprana de fallos actuales o emergentes, la estimación de la vida útil restante de los activos y la gestión de las estrategias antes mencionadas a través de modelado de eventos, monitoreo de KPI y apoyo a la toma de decisiones en tiempo real.
https://www.z-bre4k.eu/

Proyecto DOCTOR PV (2018-2021) aplicación de un mantenimiento predictivo y una operación óptimos para los distintos tipos de plantas fotovoltaicas. El proyecto combina las dos técnicas más prometedoras relacionadas con el mantenimiento predictivo: mantenimiento basado en la condición de todos los elementos de la planta y mantenimiento basado en medidas de electroluminiscencia (EL) y termografía infrarroja (TIR), las cuales se pretenden implementar mediante vuelos con drones.
https://www.fcirce.es/energias-renovables/doctor-pv-desarrollo-de-herramientas-optimizadas-de-operacion-y-mantenimiento-predictivo-de-plantas-fotovoltaicas-redes-electricas

Potencial de ahorros en el horizonte 2030-2050

Dada la heterogeneidad de aplicaciones y sectores susceptibles de mejora vamos a analizar y extrapolar datos de un caso y sector concreto.

Por ejemplo, para el proyecto DOCTOR PV, en plantas de producción fotovoltaica donde se implantó un sistema de mantenimiento predictivo basado en la condición y en medidas de electroluminiscencia y termografía infrarroja, se están consiguiendo mejoras de producción entre el 1 y el 5%.

Tomando una media del 3% y extrapolados a toda la generación fotovoltaica nacional supondrían un ahorro de 276,67 GWh/año y unas emisiones evitadas de 60.591 $TnCO_2$.

Análisis DAFO

En la siguiente tabla, se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis DAFO de esta tecnología de monitorización, mantenimiento predictivo y telereparación a través de inteligencia artificial :

Debilidades	Amenazas
• Ausencia de datos históricos de sistemas. • Heterogeneidad de fuentes de datos. • Fuentes de datos sesgadas, dificultad de obtener datos completos fiables de intervenciones de mantenimiento correctivo en averías en los GMAO actuales (reportes incompletos que generalmente no incluyen microparos o pequeños rearmes que aportarían datos preciosos a la IA). • Actualmente, bajo grado de digitalización por lo que no hay datos suficientes.	• Equipos existentes (de instalaciones anteriores) de baja conectividad y alto coste de proyectos brownfield. • Legislación poco actualizada para entornos compartidos entre humanos y máquinas autónomas.
Fortalezas	**Oportunidades**
• Bajos costes de operación y mantenimiento. • Evita fallos potencialmente críticos en sistemas que requieren disponibilidad muy elevada y con un alto coste de paradas de producción/ averías o incluso de seguridad de personas (Automoción, Petroquímica, Papeleras, Aeronáutica). • Técnicas con alto TRL y ya validadas en otras aplicaciones.	• Beneficios transversales a la industria: tanto energéticos como de calidad de producto. • Necesidad de optimización cada vez mayor de costes de mantenimiento que obliga a buscar propuestas innovadoras en la tecnología. • Extensión del 5G y futuros desarrollos de comunicaciones.

Tabla 32. Análisis DAFO de los sistemas de monitorización, control y mantenimiento predictivo basados en inteligencia artificial.

La principal debilidad es la dificultad de acceder a datos históricos fiables de sistemas similares para modelizar su comportamiento. Cualquier industria media-grande dispone de decenas de miles de señales en sus SCADA, y previamente a ser aplicado cualquier sistema experto hay que filtrar y priorizar por especialistas en la propia instalación (Ingenieros de Mantenimiento Predictivo o Técnicos de Mantenimiento expertos) para "alimentar" correctamente al sistema de Mantenimiento basado en condición (Condition Monitoring), como en sistemas tipo Big Data o basados en Inteligencia Artificial que aporten el análisis de las condiciones que derivan en una avería.

Con respecto a las fortalezas, hay que destacar los bajos costes de operación y mantenimiento de estos sistemas en comparación con sus beneficios. Asimismo, se destacan las implicaciones que estos sistemas pueden tener más allá de la eficiencia energética en la industria, dado que sus implicaciones a nivel de calidad, disponibilidad operativa y alargamiento de vida útil permitirán su incorporación al mercado con mayor velocidad. Un ejemplo es que un aumento significativo del consumo eléctrico de un compresor de aire industrial de tornillo puede indicar el comienzo de un daño en los tornillos o problemas de lubricación, lo que potencialmente es un fallo crítico. Una avería de este tipo se

podría detectar con análisis de vibraciones actualmente, pero en adelante un sistema experto con inteligencia artificial podría detectar con el volumen de datos adecuado los rangos límite reales en cada instalación con parámetros más simples y económicos de obtener, para después aplicar esos límites para definir alarmas de mantenimiento basado en condición y prevenir las averías.

Estos sistemas permiten a su vez obtener información muy valiosa para aplicar un análisis RCM (Reliability Centered Maintenance) exitoso en instalaciones críticas. Por ejemplo, las causas raíz de avería principales y las variables que tienen influencia en ellas son un parámetro muy importante a analizar en el estudio FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) del análisis de Mantenimiento Basado en Fiabilidad.

Índice de figuras

Figura 1. Fases del proyecto. 14
Figura 2. Metodología de cálculo para la evaluación de ahorros y reducción de emisiones esperadas tras la implementación de las tecnologías. 15
Figura 3. Principio de operación de un ciclo de compresión simple. 18
Figura 4. Esquema de revalorización de calor en un AHT. Fuente: Tecnalia. 21
Figura 5. Módulo de una membrana de fibra hueca. Fuente: MEDALTM, Air Liquide. 24
Figura 6. Membranas de fibra hueca (izq.) y módulos de membrana (dcha.). Fuente: TECNALIA. 26
Figura 7. Esquema de un reactor de membrana para producción de H_2 de alta pureza. Fuente: Palladium based membranes and membrane reactors for hydrogen production and purification: An overview of research activities at Tecnalia and TU/e. Elsevier, 2017. 27
Figura 8. Esquema básico de la ósmosis directa. Fuente: CIRCE. 39
Figura 9. Combustión de mezcla gas natural/ hidrógeno con diferentes ratios aire/combustible. Fuente: Effects of hydrogen and primary air in a commercial partially-premixed atmospheric gas burner by means of optical and supervised machine learning techniques. Elsevier, 2020. 44
Figura 10. Curva de consumo real de un sistema de monitorizado de energía identificando desviaciones sobre consumo teórico. Fuente: ÖKOTEC EnEffCo. 49
Figura 11. Aplicaciones en edificación basadas en AET en función de la tecnología. 56
Figura 12. Esquema de aplicaciones de AET pasivas y activas en edificación. 57
Figura 13. Hoja de ruta estratégica de la EU para el despliegue de sistemas de gestión de redes y transporte multimodal (NTM). Fuente: adaptado de TRIMIS (2016). 78
Figura 14. Energía neta producida en centrales de cogeneración según tipo de combustible empleado. Datos de España, 2018. 92
Figura 15. Distribución de la potencia de cogeneración de España por sectores. 93
Figura 18. Estructura de la flota vehicular en la EU según el escenario tendencial. Fuente: adaptado de Element Energy. 102

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis DAFO de las bombas de calor de alta temperatura. 20
Tabla 2. Análisis DAFO de los transformadores de calor por absorción (AHT). 23
Tabla 3. Análisis DAFO de la separación mediante membranas. 30
Tabla 4. Análisis DAFO de la reducción de clínker en el cemento. 33
Tabla 5. Análisis DAFO de las nuevas tecnologías para la pasteurización/esterilización de alimentos. 38
Tabla 6. Análisis DAFO de la concentración de efluentes mediante membranas. 42
Tabla 7. Análisis DAFO del diagnóstico y optimización de la combustión mediante visualización de la llama. 47
Tabla 8. Análisis DAFO de la digitalización de procesos. 53
Tabla 9. Densidad de almacenamiento de energía según tipología. 57
Tabla 10. Resumen de propiedades y características del almacenamiento térmico. 60
Tabla 11. Objetivos sector edificación en España. Fuente: PNIEC. 61
Tabla 12. Evolución de los consumos y ahorros en sector residencial. Fuente: ERESEE. 62
Tabla 13. Evolución de los consumos y ahorros en sector terciario. Fuente: ERESEE. 62
Tabla 14. Análisis DAFO del almacenamiento térmico a nivel de vivienda o edificio por calor latente y por reacciones químicas. 64
Tabla 15. Tecnologías activas estáticas. Prototipos precursores. 67
Tabla 16. Tecnologías activas dinámica. Ejemplos de prototipos precursores. 68
Tabla 17. Datos recopilados del ERESEE 2020 sobre previsiones para el periodo 2030-2050. 70
Tabla 18. Generación eléctrica de la integración de fachadas activas y costes asociados a rehabilitación del sector residencial en el periodo 2030-2050. 71
Tabla 19. Análisis DAFO de los sistemas de producción de energía integrados en fachada. 72
Tabla 20. TRL actual de los Gemelos digitales de Movilidad. 77
Tabla 21. Análisis DAFO de los gemelos digitales de movilidad. 80
Tabla 22. Análisis DAFO de la recuperación de frenada, integración de smart grids y de combustibles alternativos para el subsector del ferrocarril. 85
Tabla 23. Análisis DAFO de los nuevos materiales y motores más eficientes para el subsector del transporte aéreo. 89

Índice de tablas

Tabla 24. Análisis DAFO de los sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de cogeneración. **97**
Tabla 25. Evolución esperada en coste, tamaño y densidad de energía a 2030 y 2040. Fuente: adaptado de Element Energy. **100**
Tabla 26. Datos técnicos de algunas baterías electroquímicas en mercado. **101**
Tabla 27. Análisis DAFO de los sistemas de acumulación eléctrica para sistemas de transporte. **103**
Tabla 28. Análisis DAFO de nuevos combustibles derivados de residuos o producidos a partir de electricidad renovable. **112**
Tabla 29. Conductividad térmica, k, para diferentes materiales aislantes. **115**
Tabla 30. Análisis DAFO para los materiales de cambio de fase para el sector de la edificación. **120**
Tabla 31. Análisis DAFO de los materiales avanzados para la aviación. **122**
Tabla 32. Análisis DAFO de los sistemas de monitorización, control y mantenimiento predictivo basados en inteligencia artificial. **129**

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:

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

PTR 2018-001043

Plataforma tecnológica española de eficiencia energética

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