

CUADERNOS ORKESTRA  
02/2021  
ISSN 2340-7638

# EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL

**Jorge Fernández Gómez**

2021

Cuadernos Orkestra, núm. 02/2021

© Jorge Fernández Gómez

© Instituto Vasco de Competitividad – Fundación Deusto

[www.orquestra.deusto.es](http://www.orquestra.deusto.es)

Las opiniones, análisis y comentarios recogidos en este documento reflejan la opinión del autor y no necesariamente de la institución a la que pertenece. Cualquier error es únicamente atribuible al autor.

El autor agradece a Joan Manuel Fernández Mendoza y a Salvador Acha Izquierdo su colaboración y los comentarios y sugerencias enviados tras la revisión de un borrador del documento.

## RESUMEN

Este trabajo revisa las principales tendencias tecnológicas y regulatorias en materia de eficiencia energética en el sector industrial. Además, identifica las tecnologías más maduras y viables en el corto plazo y analiza los retos que deberán resolverse para impulsar las inversiones en eficiencia energética, superando el llamado *energy efficiency gap*, y avanzar en la descarbonización en los distintos sectores industriales en los próximos años. En la parte final del trabajo se presentan conclusiones y reflexiones orientadas a facilitar el debate y la toma de decisiones por parte de los distintos agentes (administración, reguladores y empresas industriales) en relación con la eficiencia energética.

## LABURPENA

Lan honetan, energia efizientziari lotutako teknologia eta araudi joera nagusiak ditugu aztergai, industria sektorerako. Gainera, epe laburreko teknologia helduenak eta bideragarrienak identifikatu ditugu eta energia efizientziako inbertsioak bultzatzeko erantzun behar ditugun erronkak aztertu ditugu, energy efficiency gap hori gainditzeko eta datozen urteetan industria sektoreetan karbonoa gutxitzen joateko. Lanaren azken zatian, ondorio nagusiak bildu ditugu eta gogoetak proposatu, energia efizientziaren esparruan zeresana duten eragileen (administrazioa, arautzaileak eta industria enpresak) arteko eztabaidari laguntzeko.

## ABSTRACT

This report reviews the main technological and regulatory trends in energy efficiency in the industrial sector. It also identifies the most mature and viable technologies in the short term and analyzes the challenges that must be resolved to foster investments in energy efficiency, overcoming the so-called energy efficiency gap and advancing in the decarbonization process in the different industrial sectors. The final part of the report presents conclusions and reflections aimed at facilitating the debate and decision making by the different agents (administration, regulators and industrial companies) in relation to energy efficiency.

## RESUMEN EJECUTIVO

*La eficiencia energética será una palanca clave en los próximos años para impulsar la transición energética y la descarbonización del sector industrial*

La necesidad de alcanzar ambiciosos objetivos en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo en el medio plazo aumenta el protagonismo de la **eficiencia energética como una palanca clave para alcanzar un sistema energético sostenible en el largo plazo** y, en particular, para avanzar en la descarbonización del sector industrial, especialmente allí donde alternativas como la electrificación del consumo energético tengan un menor recorrido.

De este modo, la eficiencia energética ha pasado de ser el “combustible escondido” a ser el **“primer combustible” de la transición energética** y existe un cierto consenso en torno a la idea de que la descarbonización del sector industrial requerirá la combinación de tres tipos de soluciones: (a) un incremento generalizado de la eficiencia energética; (b) un aumento de la penetración de las energías renovables; y (c) el desarrollo de nuevas tecnologías limpias (p. ej., baterías eléctricas avanzadas, soluciones de captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub>, tecnologías del hidrógeno, combustibles sintéticos y bioenergía).

*El concepto de eficiencia energética incluye la eficiencia técnica y económica, el impacto medioambiental y otros beneficios no energéticos*

Tradicionalmente, el concepto de eficiencia energética se ha interpretado desde el punto de vista técnico (relación entre *inputs* y *output*) o bien económico (utilización de la energía de la manera más coste-eficiente para producir bienes y servicios). Sin embargo, en los últimos tiempos se tiende a **entender este concepto desde un punto de vista más general, incorporando en el análisis el impacto medioambiental** (reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero) o la mejora en la seguridad de suministro.

La eficiencia energética se entiende, entonces, como un instrumento más para alcanzar **ventajas competitivas (ligadas a ganancias en productividad)** y, al mismo tiempo, como una herramienta para **avanzar en el proceso de descarbonización** del sector industrial.

*Las inversiones en eficiencia energética en la industria generan múltiples beneficios económicos y medioambientales*

Las mejoras en eficiencia energética en el sector industrial generarán un **impacto positivo sobre el medio ambiente y sobre la economía** (tanto macroeconómicos como microeconómicos), además de diversos **beneficios “no energéticos” adicionales**, incluyendo impactos sociales positivos relacionados con la reducción de la pobreza energética y la mejora en el acceso a la energía:

- En el **ámbito medioambiental**, la evidencia empírica disponible sugiere que el potencial ahorro energético y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> puede situarse por encima del 10 % (e incluso del 20 %) en la mayor parte de los sectores industriales.
- En el **plano macroeconómico**, la evidencia disponible (en el ámbito académico y en instituciones internacionales en el sector de la energía) sugiere que el impacto de inversiones en eficiencia energética en términos de PIB y empleo será significativo a medio plazo (horizonte 2030). Esto motiva que la mejora en la eficiencia energética en la industria sea uno de los objetivos y pilares del Pacto Verde Europeo y de la estrategia de recuperación económica de la Unión Europea (UE) post-Covid 19.
- En el **plano microeconómico**, existe un impacto sobre la productividad de las empresas industriales, especialmente en los sectores más intensivos en energía, como el sector del hierro y el acero. Las mejoras en competitividad están relacionadas con la innovación tecnológica, la implementación de soluciones digitales, la utilización de nuevos materiales en los procesos productivos y la innovación no tecnológica.
- Finalmente, entre los **beneficios no energéticos** cabe destacar la mejora de las condiciones de confort y seguridad laboral, las implicaciones (positivas) sobre la salud o beneficios reputacionales y menores riesgos legales y comerciales para las empresas.

*Además, existen soluciones tecnológicas maduras que pueden permitir mejorar la eficiencia energética de forma significativa en el sector industrial en los próximos años*

Las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial pueden centrarse en la sustitución o adaptación de equipamientos físicos, el desarrollo de nuevos procesos de producción y operativos, nuevas fuentes de energía o una mejor utilización de los materiales en los procesos productivos. En todas estas áreas **existen tecnologías y soluciones tecnológicas maduras y en fase de comercialización** que pueden facilitar la captura de niveles significativos de ganancias en la eficiencia energética.

Entre las tecnologías que pueden ofrecer la mayor rentabilidad (relación entre ganancias de eficiencia y tiempo de recuperación de la inversión) se encuentran los sistemas de control integral de procesos y los contadores por intervalos, que facilitan la optimización del uso de la energía, los sistemas de monitorización de gases y los quemadores de alta eficiencia.

Resultan también rentables las inversiones en sistemas de gestión de energía y los equipamientos que optimizan los procesos de combustión, de utilización de calor y de recuperación de gases. Otras inversiones, como sistemas de control avanzados con ajustes de velocidad automáticos (en bombas, ventiladores, motores, etc.) generan también ganancias de eficiencia significativas en distintos sectores industriales, aunque requieren mayores periodos de recuperación de las inversiones.

*Sin embargo, pese a las alternativas tecnológicas y los beneficios económicos y medioambientales, los niveles de inversión en eficiencia energética en la industria son más bajos que lo esperado*

Pese a la existencia de tecnologías maduras y disponibles en el mercado, **no se observa un nivel suficiente de inversión en eficiencia energética por parte de las empresas industriales** más intensivas en energía y en emisiones de GEI, pese a que en muchos casos las inversiones pueden ser financieramente viables. La diferencia entre el nivel de inversión efectivo en eficiencia energética y el nivel óptimo teórico estimado se denomina “hueco de eficiencia energética” (*energy efficiency gap*, en inglés).

Las **causas del *energy efficiency gap* y de una menor tasa de adopción de tecnologías más eficientes son variadas**. Entre ellas, se pueden citar: (1) fallos de mercado (p. ej., información asimétrica, externalidades, precios basados en costes medios, restricciones de liquidez o fallos en los mercados de innovación ligados a la difusión de información, etc.); (2) factores relacionados con el comportamiento de los agentes (falta de atención, miopía, racionalidad acotada, métodos de decisión heurísticos, sesgos sistemáticos en la visión sobre mercados y tecnologías, etc.); (3) errores de modelización y de medidas (p. ej., supuestos incorrectos sobre costes, perfiles de uso, atributos de los productos o características de los consumidores, uso de tasas de descuento incorrectas, irreversibilidad, el valor de la opción de esperar, etc.).

*Para superar el llamado “energy efficiency gap” deberán resolverse 4 retos tecnológicos, financieros y regulatorios en los próximos años*

### ***Reto 1. Impulso de las actividades de I+D+i relacionadas con nuevos combustibles y nuevas tecnologías limpias y eficientes***

La descarbonización del sector industrial requerirá desarrollos tecnológicos e innovación (tecnológica y no tecnológica) que faciliten las transformaciones requeridas en los procesos productivos. Para entender dónde deben centrarse los esfuerzos de innovación, deberá tenerse en cuenta que:

- La **mayor parte de las emisiones en el sector industrias se concentran en unos pocos sectores intensivos en energía** (hierro y acero, metales no ferrosos –e.g., aluminio—, químico y petroquímico y minerales no metálicos, como el cemento).
- Las **soluciones más rentables ya se han implementado en muchos sectores** (p. ej., sistemas de control de procesos, sistemas de gestión de energía, optimización de los procesos de calor con baja y media temperatura).
- Las **soluciones de eficiencia energética en el sector industrial son muy específicas para cada sector**, debido a la heterogeneidad en los procesos productivos.

- La **sustitución de combustibles fósiles, la captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub> y la reutilización de calor residual de alta temperatura** son las vías más prometedoras para reducir las emisiones en los sectores más intensivos en energía.
- Otras soluciones prometedoras son el **desarrollo de nuevos materiales** (p. ej., en el sector del cemento), el uso de **hidrógeno renovable** (en el sector químico y petroquímico y en la industria pesada), **nuevos equipamientos eléctricos** (p. ej., hornos de arco eléctrico) o la utilización de **biocombustibles** (en todos los sectores).
- Los **procesos de combustión** que dan lugar a calor de proceso, los **procesos industriales específicos** u otras actividades **durante el ciclo de vida de los productos industriales** (p. ej., emisiones fugitivas de disolventes, lubricantes, incineración de plásticos, etc.) son además fuentes de reducciones de emisiones.

### ***Reto 2: Desarrollo de nuevos esquemas y nuevos productos de financiación de inversiones en eficiencia energética***

Superar el “*energy efficiency gap*” requiere **asegurar que las empresas industriales puedan acceder a recursos e instrumentos de financiación** para llevar a cabo las inversiones en proyectos y actividades energéticamente más eficientes. Crear un **contexto de financiación favorable** para estas inversiones puede lograrse por varias vías:

- Un marco adecuado para la **evaluación del impacto de los proyectos de eficiencia energética** contribuirá a movilizar recursos públicos y privados, ya que se podrán identificar y valorar mejor las implicaciones de los proyectos de inversión.
- La **mitigación o reducción del riesgo de crédito de las empresas** ayudará a impulsar las inversiones, mediante nuevos esquemas de garantías (p. ej., garantías ofrecidas por las Administraciones Públicas o por instituciones especializadas, como Elkargi, en la CAPV), nuevos esquemas de seguros que cubren determinados niveles de ganancias en eficiencia energética o nuevos instrumentos de cobertura de riesgos.
- Unas **soluciones innovadoras de financiación basadas en esquemas de agregación** pueden facilitar el cruce (*matching*) entre la demanda y la oferta de financiación de proyectos de eficiencia energética. Esto puede ocurrir a través de agregadores de proyectos o de entidades que centralicen la información sobre la oferta y la demanda en distintos ámbitos (mercados regionales, nacionales...).
- La **innovación en los instrumentos de financiación** (nuevos productos y servicios financieros) en el área de las inversiones sostenibles o verdes está creciendo muy rápidamente en los últimos años y será también un factor impulsor de las inversiones.

### ***Reto 3: Actualización de los marcos normativos y regulatorios***

Las medidas normativas y regulatorias tradicionales (p. ej., relativas a auditorías energéticas, contadores inteligentes, sistemas de gestión de energía, incentivos económicos y fiscales,

certificados blancos, ecoetiquetado, etc.) **no serán suficientes descarbonizar el sector industrial** a la velocidad necesaria.

Los nuevos programas de fomento de las inversiones deberán **aprovechar los elementos que funcionan en los esquemas actuales e innovar en los esquemas de incentivos**: (1) ampliando de forma significativa los programas existentes para maximizar el impacto en el corto plazo; (2) incentivando la adopción de tecnologías y soluciones comercialmente maduras y fácilmente implementables (e. g., *plug-and-play*); (3) estandarizando contratos y soluciones tecnológicas, (4) reduciendo barreras administrativas; o (5) impulsando las soluciones de economía circular (reducción de residuos, reutilización de materiales, etc.).

Además, resultará óptimo **utilizar un conjunto de instrumentos variados** que tenga en cuenta la heterogeneidad de procesos y tecnologías en el sector industrial, como incentivos fiscales, subastas, programas de renovación de equipamientos, estándares de eficiencia, etc., y **alinear las estrategias de I+D+i con los objetivos energéticos y medioambientales, teniendo en cuenta la realidad local**.

Por otro lado, deberá asegurarse la efectividad de los programas y la eficiencia en términos de costes. Así, **la priorización y asignación de los recursos disponibles, públicos y privados, debe tener en cuenta la rentabilidad esperada** (económica y medioambiental) de las inversiones.

Finalmente, **existen sinergias con otras nuevas tecnologías, especialmente las TIC**, tanto en el plano tecnológico (soluciones de automatización, IA, etc.) como en el plano normativo-regulatorio (p. ej., el uso de *blockchain* puede incrementar la eficiencia de los esquemas de certificados blancos y reducir sus costes de implementación).

#### ***Reto 4: Innovación no tecnológica, nuevos procesos y nuevos modelos de negocio***

Las inversiones en eficiencia energética (tecnologías limpias y energías renovables, soluciones digitales para optimizar procesos y un uso eficiente de materiales y energía) abren la puerta a la **adaptación de las propuestas de valor y de los modelos de negocio en múltiples dimensiones**, incluyendo: (1) el desarrollo de procesos industriales más circulares y nuevas formas de organización de las empresas; (2) la reordenación de cadenas de valor y nuevos esquemas de cooperación B2B y B2C; (3) la servitización de activos (p. ej., alquiler de máquinas industriales operadas y mantenidas por terceros); (4) la innovación en productos y servicios relacionada con el uso masivo de datos y de herramientas analíticas y con una mayor sostenibilidad (o menor huella medioambiental); o (5) la generación de nuevo conocimiento y nuevas capacidades ligadas al desarrollo de la "industria 4.0" (introducción de automatización, inteligencia artificial, etc.).

Todas estas áreas de innovación ofrecen vías para el **desarrollo de ventajas competitivas para las empresas industriales** relacionadas con formas de operación más eficientes y con productos y servicios más sostenibles, en línea con la estrategia industrial europea aprobada en el marco del Pacto Verde Europeo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>X</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD.....</b>	<b>10</b>
2.1. Definición general .....	10
2.1.1. <i>Eficiencia y consumo de energía.....</i>	<i>10</i>
2.1.2. <i>Eficiencia energética e intensidad energética en la UE.....</i>	<i>11</i>
2.1.3. <i>Eficiencia energética en la CAPV.....</i>	<i>14</i>
2.2. Análisis de las inversiones en eficiencia energética.....	17
2.2.1. <i>Valoración tradicional .....</i>	<i>17</i>
2.2.2. <i>Eficiencia energética y sostenibilidad .....</i>	<i>18</i>
<b>3. INVERSIONES EN EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL.....</b>	<b>25</b>
3.1. Potencial de eficiencia energética en la industria .....	25
3.1.1. <i>Rentabilidad de inversiones en equipamientos concretos.....</i>	<i>27</i>
3.1.2. <i>Tecnologías alternativas para el suministro y gestión de la energía en las empresas industriales.....</i>	<i>29</i>
3.1.3. <i>Tecnologías de almacenamiento de energía.....</i>	<i>39</i>
3.1.4. <i>Captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub> .....</i>	<i>44</i>
3.2. Impacto de las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial....	47
3.2.1. <i>Impactos energéticos y medioambientales.....</i>	<i>47</i>
3.2.2. <i>Impactos macroeconómicos.....</i>	<i>49</i>
3.2.3. <i>Impactos microeconómicos .....</i>	<i>51</i>
3.2.4. <i>Otros impactos.....</i>	<i>51</i>
3.3. El efecto rebote .....	52
3.4. El <i>energy efficiency gap</i> o hueco de eficiencia energética.....	55
3.5. Barreras a la inversión en eficiencia energética.....	56

<b>4. ESTRATEGIA Y POLÍTICAS SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL .....</b>	<b>61</b>
4.1. Estrategia de eficiencia energética en el sector industrial en la Unión Europea .....	61
4.1.1. <i>Directivas de eficiencia energética y otras directivas.....</i>	<i>61</i>
4.1.2. <i>El Pacto Verde Europeo.....</i>	<i>62</i>
4.2. Estrategias de eficiencia energética en algunos países europeos.....	63
4.2.1. <i>España.....</i>	<i>64</i>
4.2.2. <i>Reino Unido .....</i>	<i>66</i>
4.2.3. <i>Francia .....</i>	<i>67</i>
4.2.4. <i>Alemania.....</i>	<i>70</i>
<b>5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
<b>AUTORES .....</b>	<b>102</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

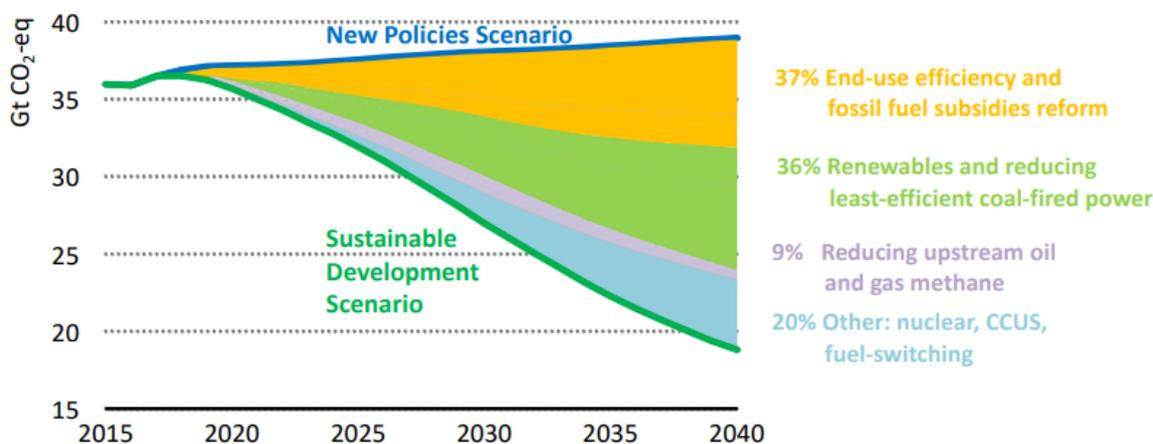
### *La eficiencia energética como palanca clave para impulsar la transición energética*

La necesidad de alcanzar ambiciosos objetivos en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo está incrementando el protagonismo de la eficiencia energética como palanca para alcanzar un sistema energético sostenible en el largo plazo.

La visión sobre la eficiencia energética como vía para alcanzar los objetivos energéticos y medioambientales ha cambiado en los últimos años. Así, la eficiencia energética ha pasado de ser el “combustible escondido” (medido como una cantidad de energía no utilizada) a ser uno de los “combustibles relevantes” de la transición energética (IEA, 2015)<sup>1</sup>.

Los escenarios a largo plazo de reducción de emisiones de GEI que desarrolla la Agencia Internacional de la Energía (AIE), por ejemplo, ilustran la relevancia de la eficiencia energética como herramienta para conseguir la transformación requerida del sistema energético, junto con el desarrollo de las energías renovables.

**Figura 1. Evolución de las emisiones de GEI en los escenarios “Desarrollo Sostenible” y “Nuevas Políticas” de la AIE**



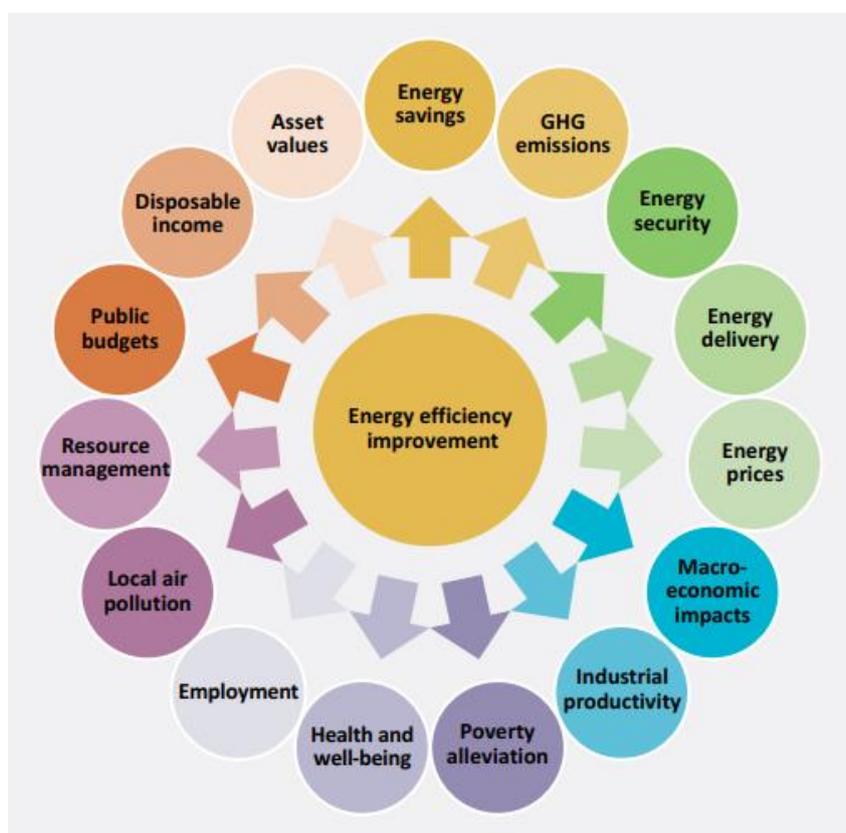
Fuente: Prag (2018).

<sup>1</sup> En 2010, por ejemplo, el consumo energético evitado por el conjunto de los países miembros de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) por inversiones realizadas durante el periodo 1974-2010 superó la demanda de energía cubierta con cualquier otro combustible. Esta situación ha cambiado en los últimos años, a medida que avanza el peso de la electricidad en las matrices energéticas, aunque se mantiene la relevancia de la eficiencia energética como instrumento para cuadrar los balances energéticos de forma sostenible.

En el Escenario de Desarrollo Sostenible (EDS), por ejemplo, en el que se alcanzan las cero emisiones netas en 2070<sup>2</sup>, la eficiencia energética (junto con la reforma de los subsidios a los combustibles fósiles) contribuye en un 37% a reducir las emisiones de GEI en 2040 respecto de la senda prevista en el Escenario de Nuevas Políticas, que recoge el efecto de las políticas anunciadas tras la firma del Acuerdo de París (Figura 1).

Además, en el EDS la demanda de energía global podría reducirse un 15 % en 2040 mediante la adopción de medidas coste-efectivas en la actualidad, con ahorros significativos en los costes energéticos (IEA, 2020b). A esta reducción en el consumo de energía contribuirían todos los sectores, incluyendo el sector del transporte (38 %), seguido del sector de edificios y equipos y electrodomésticos (33 %) y de la industria (incluyendo la energía) (29 %).

**Figura 2. Beneficios relacionados con una mejora en la eficiencia energética**



Fuente: IEA (2015).

<sup>2</sup> En el EDS el incremento de la temperatura media se limita a 1,65 °C (con un 50 % de probabilidad). En un escenario más restrictivo, consistente con un incremento de la temperatura media del planeta de 1,5 °C y cero emisiones netas en 2050 (Escenario Cero Emisiones Netas 2050), las emisiones de GEI del sector energético y de los procesos industriales deberían caer un 39 % en los próximos 10 años, desde unos 33 Gt en 2020 hasta 20,1 Gt en 2030 (frente la reducción del 19 % que contempla el EDS) (IEA, 2020a).

Los beneficios económicos, medioambientales y sociales de incrementar la eficiencia energética en todos los sectores son múltiples y abarcan desde impactos macroeconómicos positivos (crecimiento, empleo, incremento de los recursos financieros disponibles, públicos y privados) hasta beneficios medioambientales (caída de las emisiones de GEI y los índices de contaminación, especialmente en espacios urbanos), energéticos (incremento en la seguridad energética) o sociales (mejor acceso a la energía, reducción en la pobreza energética) (Linares y Labandeira, 2010; IEA, 2015; EPA, 2018) (Figura 2).

Además, se esperan beneficios en términos de competitividad, tanto de la economía en conjunto como de las empresas, relacionados tanto con la reducción del coste del consumo energético<sup>3</sup> y la liberación de recursos asociada a ello como con la innovación en tecnologías eficientes y con bajas emisiones, el avance en la implementación de soluciones digitales y el desarrollo de nuevos modelos de negocio (European Commission, 2020b).

### *Eficiencia energética, descarbonización del sector industrial y competitividad*

La necesidad de mejorar la eficiencia energética de los sectores industriales europeos responde a varios objetivos. Por un lado, la estrategia de energía y clima de la Unión Europea establece, desde hace más de una década, objetivos concretos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de mejora de la eficiencia energética en la economía. Por otro lado, el Pacto Verde Europeo, anunciado en diciembre 2019, incluye entre sus objetivos alcanzar una industria sostenible y competitiva en el medio y largo plazo mediante una transformación “verde”, digital y circular que, además, sirve como base para una estrategia de crecimiento y de generación de valor económico y empleo<sup>4</sup>.

En concreto, el Paquete Energía-Clima 2020<sup>5</sup> fijó en 2007 (con entrada en vigor en 2009) una serie de objetivos vinculantes para la UE para 2020. Entre los llamados “objetivos 20-20-20” se incluían alcanzar un 20 % de reducción de emisiones de GEI respecto de los niveles de 1990, un 20 % de mejora en la eficiencia energética (respecto de valores de referencia estimados en 2007) y un 20 % de energías renovables en el consumo final. Las medidas para aumentar la eficiencia energética quedaron establecidas, principalmente, en la Directiva de eficiencia energética de 2012 (European Parliament y European Council, 2012) y en el Plan de Eficiencia Energética de 2011 (European Commission, 2011).

---

<sup>3</sup> Como referencia del potencial valor del ahorro energético en la industria, de acuerdo con la última Encuesta de Consumos Energéticos del Instituto Nacional de Estadística de España (INE), publicada en junio de 2019, el gasto total en energía en el sector industrial en España se situó en 10.522 M€ (frente a 10.957 M€ en 2015 y 11.086 M€ en 2013) (INE, 2019). Un 1 % de reducción en el consumo energético, *ceteris paribus*, daría lugar en promedio a un ahorro de unos 100 M€.

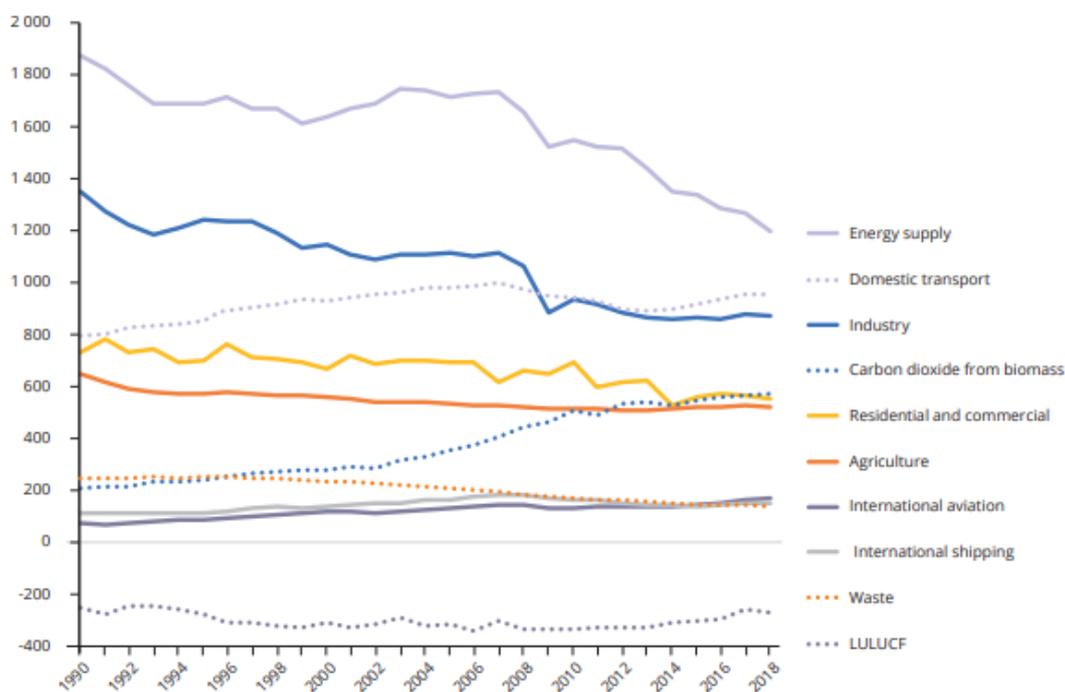
<sup>4</sup> Las estimaciones disponibles indican que, pese al elevado coste de la transición sostenible en términos de inversiones y costes de transformación sectorial y de las capacidades de las personas y de la economía, puede haber impactos macroeconómicos agregados positivos en el escenario de mayor ambición climática (reducción de emisiones de GEI de un 55 % en 2030). Las proyecciones de la UE indican que este impacto podría ser mayor todavía si se tiene en cuenta la capacidad no utilizada en la economía europea en la actualidad (European Commission, 2020a).

<sup>5</sup> Ver [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en).

La UE va camino de cumplir, en conjunto, con los objetivos 20-20-20 relativos a las emisiones de GEI y al incremento de las energías renovables, especialmente teniendo en cuenta el impacto de la pandemia del coronavirus sobre las emisiones de GEI y sobre el consumo de energía en 2020. Así, las emisiones de GEI se redujeron un 24 % entre 1990 y 2019 y los países UE-27 alcanzaron una cuota de energías renovables del 19,4 % en 2019. Pese a ello, hay grandes variaciones entre Estados miembros y varios países podrían no llegar a alcanzar el objetivo de energía renovable, como Austria (con estimación para 2019 de un *gap* de -0,1 % del consumo final), Bélgica (-3,1 %), Francia (-5,8 %), Alemania (-0,9 %), Países Bajos (-5,6 %), Polonia (-3,4 %), Portugal (-0,6 %) o España (-2,0 %), entre otros, según datos de la Agencia Medioambiental Europea (EEA, 2020a, 2020b).

Las mejoras en eficiencia energética pueden jugar un papel muy relevante en el proceso de descarbonización del sector industrial europeo, al que se atribuye algo menos de un quinto de las emisiones totales de GEI en la Unión Europea (Figura 3).

**Figura 3. Emisiones de GEI en la UE-27 + R.U. por sector de actividad (MtCO<sub>2</sub>eq)**



*Fuente: EEA (2020a). Nota: las emisiones asignadas a la industria recogen los epígrafes CRF 1A2 (manufacturas y construcción) y CRF 2 (procesos industriales y uso de materiales).*

Sin embargo, pese a la tendencia decreciente en las emisiones de GEI totales en la industria europea desde 1990, la evolución de las emisiones en la industria se ha estabilizado en los últimos años, lo que sugiere que las “frutas de las ramas más bajas” se han recogido ya y que en los próximos años se afrontará el gran reto de conseguir que la industria contribuya al

objetivo planteado por la propuesta de Ley del Clima Europea de alcanzar en 2030 un 55 % de reducción de emisiones respecto de 1990<sup>6</sup>.

Respecto del objetivo de reducción del consumo de energía del 20 % para 2020, solo 9 de los 27 Estados miembros iban camino de cumplirlo a finales de 2019 (Finlandia, Grecia, Italia, Letonia, Países Bajos, Portugal, Rumanía, Eslovenia y España) (EEA, 2020a, 2020b). El resto de Estados miembros estaban alejados de los objetivos, especialmente algunas de las economías más relevantes de la UE: Austria (-10,8 % respecto del objetivo), Bélgica (-7,9 %), Francia (-7,9 %), Alemania (-9,4 %), Polonia (-2,7 %) o Suecia (-4,8 %), por ejemplo.

Al igual que en el caso de las emisiones de GEI, esto sugiere que los avances necesarios en los próximos años para alcanzar los objetivos de mejora de la eficiencia energética que establece la estrategia de energía y clima europea (un 32,5 % en 2030, revisable al alza en 2023, respecto del nivel de referencia establecido en 2007, de acuerdo con la Directiva 2018/2002 de eficiencia energética) y reflejados en los Planes Nacionales Integrados de Energía y Clima 2021-2030<sup>7</sup> serán más costosos.

Además de contribuir a la consecución de los objetivos de energía y clima fijados por la Unión Europea para las próximas décadas, la mejora en la eficiencia energética (y en el uso de materiales) en todas las fases de los procesos de producción, logísticos y comerciales permitirá incrementar la competitividad de las empresas industriales a través de un incremento de la productividad.

Esto puede llevarse a cabo a través de medidas y estrategias muy variadas y que diferirán entre los distintos sectores industriales y entre empresas, debido a la diversidad de procesos y tecnologías utilizadas en la industria, incluso dentro de un mismo subsector, y a los requerimientos y demandas de sus clientes.

Entre ellas, pueden citarse el cambio de combustibles, la electrificación de procesos, el uso de nuevas tecnologías y herramientas digitales (IA, IoT, virtualización, fabricación aditiva, *blockchain*...) para optimizar los procesos productivos, logísticos y comerciales, la implementación de estrategias basadas en principios de economía circular (ecodiseño, reutilización de materiales, remanufactura y manufactura avanzada, reparación avanzada, *retrofitting* y reingeniería) o el despliegue de nuevos modelos de negocio en torno a la servitización de activos.

---

<sup>6</sup> Ver la propuesta de Reglamento “Ley del Clima Europea” en Comisión Europea (2020a). El objetivo vigente en el momento de escribir este informe es del 40 %, fijado en el Consejo Europeo celebrado los días 23 y 24 de octubre de 2014.

<sup>7</sup> En el caso de España, por ejemplo, el borrador actualizado del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), enviado a la UE en enero de 2020, presenta una hoja de ruta para alcanzar los siguientes objetivos para 2030 coherentes con una trayectoria de descarbonización que alcance la neutralidad de emisiones en 2050 (MITECO, 2020):

- 23 % de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990;
- 42 % de energías renovables sobre el consumo total de energía final;
- 39,5 % de mejora de la eficiencia energética respecto del valor de referencia fijado;
- 74% de energías renovables en la generación eléctrica.

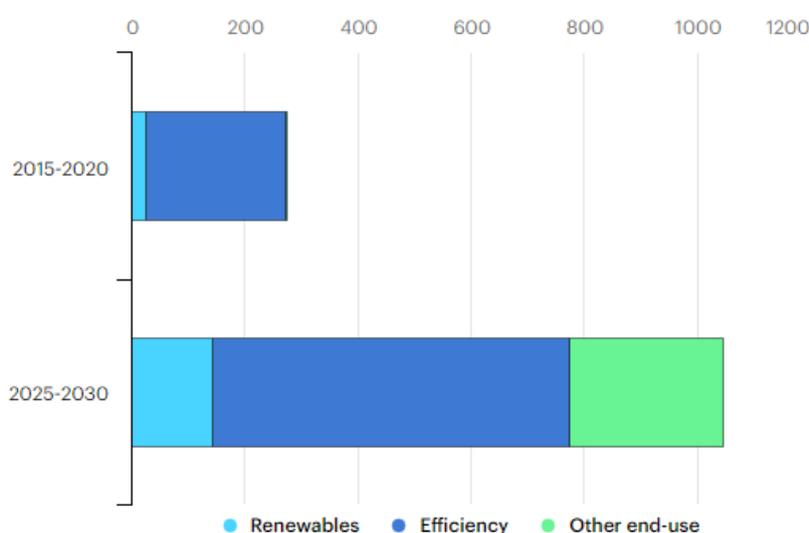
Todas estas vías para avanzar en la eficiencia energética requerirán importantes inversiones en la adaptación o modificación de los equipamientos y las tecnologías industriales y, en muchos casos, en actividades de I+D+i que permitan desarrollar en el medio plazo soluciones innovadoras basada en tecnologías aún no maduras (o conocidas).

### *El doble reto de la financiación y la tecnología*

La consecución de todos los beneficios señalados anteriormente y de los ahorros en términos de energía y costes energéticos dependerá de superar el doble reto financiero y tecnológico.

Por un lado, existe la necesidad de realizar cuantiosas inversiones en eficiencia energética. Aunque las inversiones públicas en eficiencia energética han aumentado de manera constante en los últimos años (IEA, 2020c), el esfuerzo inversor deberá crecer significativamente en los próximos años. La AIE estima, por ejemplo, que las inversiones anuales en esta área deberán aumentar hasta unos 630 billones de dólares al año en 2025-2030 para seguir la senda prevista en el Escenario de Desarrollo Sostenible (IEA, 2020d) (Figura 4). Esto supondría aumentar el volumen de inversiones un 255 % respecto del periodo 2015-2020.

**Figura 4. Inversiones en eficiencia energética<sup>8</sup> previstas en el EDS\* (miles de M\$)**



Fuente: IEA (2020d). \*=- Escenario de Desarrollo Sostenible.

La crisis del coronavirus ha abierto una ventana de incertidumbre en el corto plazo acerca de la evolución de las inversiones en eficiencia energética. Estimaciones recientes sugieren que

<sup>8</sup> La AIE define inversión en eficiencia energética como "...the incremental spending on new energy-efficient equipment or the full cost of refurbishments that reduce energy use..." (IEA, 2020j). Desde el punto de vista de la contabilidad convencional, una parte de este gasto es consumo (en vez de inversión).

las inversiones en eficiencia energética caerán en 2020 un 9 % (IEA, 2020e). Esto está relacionado con la caída en la actividad económica como consecuencia de la crisis del coronavirus y la caída de los precios de la energía, que tienden a extender los periodos de retorno de las inversiones –entre un 10 % y un 40 %, según IEA (2020e)—, haciéndolas menos atractivas.

Por otro lado, la dificultad de reducir las emisiones de GEI con las tecnologías actuales en sectores como el sector del transporte con vehículos pesados, la aviación o industrias intensivas en energía como las del acero, el cemento o los productos químicos, será clave continuar desarrollando nuevas tecnologías innovadoras y eficientes desde el punto de vista energético (IEA 2020c).

### *La eficiencia energética, en el centro de los programas de recuperación económica post-Covid 19*

En el contexto actual de crisis derivada de la pandemia del coronavirus SARS-CoV-2 la apuesta por la eficiencia energética está relacionada, además de los beneficios medioambientales esperados que se derivan de impulsar la eficiencia energética (p. ej., contribución a alcanzar los objetivos en materia de emisiones de gases de efecto invernadero), con su capacidad para generar actividad económica, valor añadido y empleo e impulsar nuevas tecnologías bajas en carbono.

Además de ser intensivas en empleo, muchas de las actividades relacionadas con la eficiencia energética se llevan a cabo en pymes (IEA, 2020e). Se estima que en EE.UU., por ejemplo, se estima que en 2019 existían 2,4 millones de empleos en actividades cuyo principal objetivo es reducir el consumo de energía (NASEO y EFI, 2020). En la Unión Europea, se estima que en 2010 hasta 2,4 millones de empleos estaban relacionados directa o indirectamente con la eficiencia energética (Cambridge Econometrics, 2015a, 2015b).

Esta capacidad de generación de empleo de las inversiones en nuevas tecnologías limpias y en eficiencia energética es uno de los factores que puede impulsar la recuperación económica en los próximos años en sectores clave de la economía, como la construcción, muchos sectores industriales manufactureros o el sector del transporte.

La llamada “transición verde” (y, con ella, el incremento de la eficiencia energética en todos los sectores de la economía) se sitúa en el centro de los programas de recuperación económica que están empezando a implementar los gobiernos de países y regiones de todo el mundo:

- En la Unión Europea, por ejemplo, el programa de recuperación económica para los próximos años (2021-2027), con un presupuesto total de 1,825 billones de € (1,075 billones aportados por el Marco Financiero Plurianual<sup>9</sup> y 0,75 billones dentro del programa *ad hoc* Next Generation EU), dedicará un 30 % de los recursos disponibles a

---

<sup>9</sup> Ver [https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe\\_es](https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_es).

la lucha contra el cambio climático. El Pacto Verde Europeo, publicado en diciembre de 2019, se sitúa en este contexto como el eje de la estrategia de crecimiento y sostenibilidad de la economía de la UE a corto, medio y largo plazo.

El Pacto Verde Europeo apuesta por impulsar el principio de política energética “lo primero, la eficiencia energética” a través de múltiples iniciativas legislativas, estrategias y planes de acción en áreas como la integración del sistema energético, la economía circular, el ecodiseño y la industria inteligente, la renovación de edificios (programa “Renovation Wave”), la movilidad sostenible y muchas otras. Entre estas iniciativas se incluye una actualización de la Directiva 2012/27/UE sobre Eficiencia Energética.

- En España, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (Presidencia del Gobierno, 2020) guiará la ejecución de cerca de 72.000 M€ en 2021-2023 (el 50 % de los recursos con los que cuenta España a través de Next Generation EU). Este plan identifica la eficiencia energética como una herramienta, junto con la transformación digital, que impulsará la competitividad de las empresas industriales y de las pymes, apoyará el crecimiento del sector de equipamientos y servicios relacionados con la eficiencia energética y contribuirá a la consecución de los objetivos energéticos y climáticos establecidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (MITECO, 2020).
- En la CAPV, por su parte, el Programa de Reconstrucción Económica y Social de Euskadi (Berpiztu) dedicará 13.250 M€ (adicionales a los fondos asociados al programa Next Generation EU) en 2020-2024 a impulsar avances en la economía vasca en torno a las “tres transiciones” globales en marcha (tecnológico-digital, energético-climática y sanitaria y social) (Gobierno Vasco, 2020). El programa Berpiztu centra en el uso eficiente de la energía y los recursos uno de los pilares de las estrategias energética, ambiental y circular de Euskadi.

Con los programas de estímulos económicos y financieros anunciados hasta diciembre de 2020 y directamente relacionados con eficiencia energética, la AIE estima que se podrían generar hasta 1,8 millones de empleos entre 2021 y 2023 en todo el mundo (un 80 % en Europa), de los cuales el 16 % se producirían en el sector industrial (IEA, 2020f).

### *Objetivo y estructura del informe*

En este estudio se revisan las principales tendencias en materia de eficiencia energética en el sector industrial, se identifican las tecnologías más maduras y viables en el corto plazo y se analizan los retos que deberán resolverse para impulsar las inversiones en eficiencia energética y avanzar en la descarbonización en los distintos sectores industriales en los próximos años.

En el segundo capítulo, se analiza el concepto de eficiencia energética y se revisan las principales cifras relativas a la eficiencia y la intensidad energética en la Unión Europea y en

la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), con un foco especial en los sectores industriales. Además, se describen las distintas metodologías para valorar las inversiones en eficiencia energética.

Tradicionalmente, se tenía en cuenta el ahorro energético esperado respecto de una referencia, valorándose en función de los precios de la energía. En la actualidad, se tienen en cuenta también “beneficios no energéticos” derivados de las inversiones, p. ej., ligados a las emisiones de GEI y otros productos contaminantes, otros beneficios operativos, bienestar de las personas en el trabajo, etc.

Al incluir en el análisis de rentabilidad de las inversiones el coste (privado o social, en función del tipo de análisis) del impacto medioambiental, incorporándose la sostenibilidad medioambiental como una dimensión más de la eficiencia energética (p. ej., a través de precios de las emisiones de CO<sub>2</sub>), pueden resultar rentables inversiones que, con el marco de análisis tradicional, no resultaban deseables desde el punto de vista privado. Esto puede llevarse a cabo con herramientas como el análisis del ciclo de vida de las inversiones.

El tercer capítulo revisa el potencial técnico de ahorro energético de las inversiones en equipamientos en eficiencia energética en el sector industrial, analizándose la evidencia disponible en la literatura académica. Además, se revisan diversas alternativas tecnológicas para alcanzar un suministro de energía con menores emisiones, incluyendo la cogeneración de alta eficiencia, las bombas de calor y la electrificación de consumos, el uso del hidrógeno y distintas tecnologías de almacenamiento (en forma de electricidad, calor e hidrógeno).

En este capítulo se analizan también el impacto del llamado efecto rebote (potencial incremento del consumo de energía inducido por una mayor eficiencia energética) y el problema del “huevo de eficiencia energética” (*energy efficiency gap*) o nivel de inversión en eficiencia energética menor que el esperado (o subóptimo) si se tienen en cuenta los beneficios económico-financieros, medioambientales y sociales para las empresas y la economía en conjunto. El capítulo se cierra con una revisión de las principales barreras a las inversiones en eficiencia energética, con especial énfasis en el sector industrial.

En el cuarto capítulo, se revisan las políticas y estrategias que se están implementando en la actualidad para impulsar la eficiencia energética en el sector industrial en la Unión Europea (directivas de eficiencia energética e iniciativas dentro del Pacto Verde Europeo) y en varios países, incluyendo España, el Reino Unido, Francia y Alemania. La evidencia disponible sobre el potencial técnico de ahorro energético y sobre los insuficientes niveles de inversión (*energy efficiency gap*) sugieren que la adaptación y actualización de estas políticas será necesaria para cumplir con los objetivos en materia de ahorro energético y reducción de emisiones de GEI en la industria en los próximos años.

Finalmente, el último capítulo resume las principales ideas del trabajo y presenta una serie de conclusiones y reflexiones orientadas a motivar el debate y facilitar la toma de decisiones de los distintos tipos de agentes (administración, reguladores y empresas) sobre las estrategias de ahorro energético y las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial en los próximos años.

## 2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD

### 2.1. Definición general

#### 2.1.1. Eficiencia y consumo de energía

Eficiencia energética es un término que, como su nombre indica, relaciona los conceptos de eficiencia y energía. Puede aplicarse tanto a consumos de energía como a procesos productivos, empresas e instituciones, cadenas de valor, sectores económicos o territorios o economías.

Se debe distinguir entre eficiencia energética técnica y eficiencia energética económica (Gillingham et al., 2009; Gillingham y Palmer, 2014). La primera es un concepto físico que relaciona *inputs* (p. ej., materiales y energía) y *output* (p. ej., nivel de producción de una empresa). Desde el punto de vista económico, la eficiencia energética implica maximizar el beneficio neto (bien privado, bien social) del uso de determinados *inputs* para producir un *output*.

En esencia, la eficiencia energética implica la utilización de la energía de la manera más coste-eficiente para ejecutar un proceso productivo o proveer un servicio, minimizando las pérdidas de energía y el consumo de energía y otras materias primas.

En el ámbito de los procesos productivos, puede aplicarse el concepto de eficiencia energética a una situación en la que se maximiza la producción (u *output*) por unidad de energía utilizada o bien a una situación en la que se minimiza el consumo de energía por unidad de *output* producido. Estas dos formas de aproximarse a la eficiencia energética son dos caras de la misma moneda.

En la medida en que los precios de la energía reflejen adecuadamente el valor económico de la misma, el coste de la energía ahorrada como consecuencia de la inversión en equipamientos y activos, en cambios de procesos, en la reconfiguración de activos o en la implementación de una política concreta permitirá evaluar las ganancias en eficiencia energética derivadas de los cambios introducidos.

Desde un punto de vista más general, el término “eficiencia energética” puede incorporar otros conceptos distintos del uso eficiente de la energía, incorporando, por ejemplo, objetivos como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o la mejora en la seguridad de suministro. Así, en cierto sentido existe una falta de claridad sobre el alcance del mismo y puede significar cosas distintas en distintos contextos (Marchi et al., 2019).

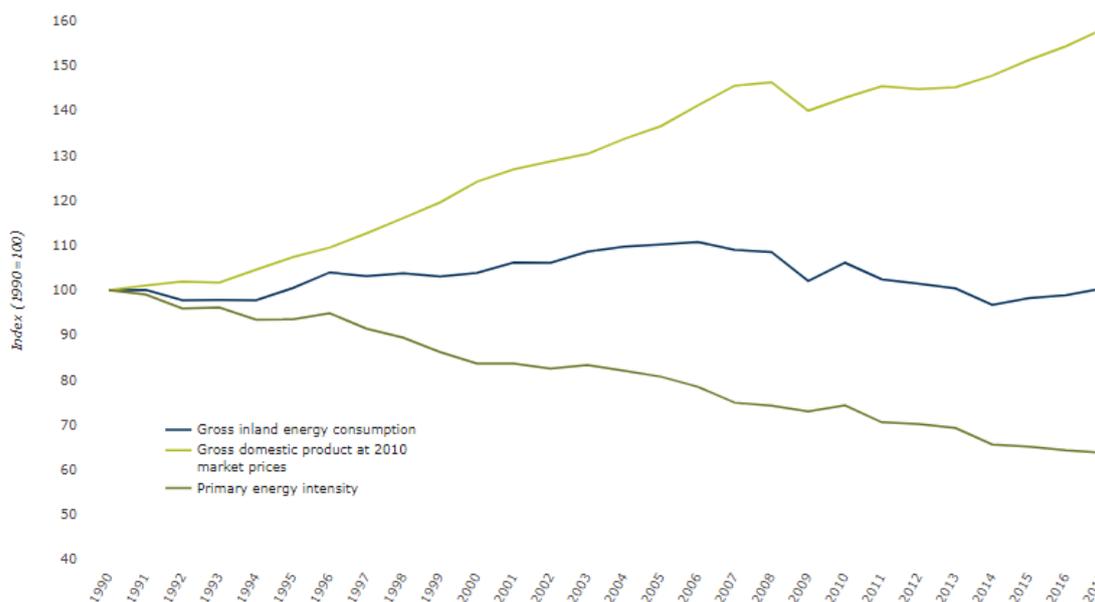
### 2.1.2. Eficiencia energética e intensidad energética en la UE

En el ámbito de un sector económico o de una economía, pueden medirse los cambios en la eficiencia energética como las variaciones en la intensidad energética o cantidad de energía consumida por unidad de PIB o valor añadido bruto (VAB).

De hecho, la Agencia Internacional de la Energía define eficiencia energética, de una manera un tanto imprecisa<sup>10</sup>, como *“la ratio entre la energía consumida y el output generado o el servicio provisto”* (IEA, 2014).

Por su parte, la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE define *“eficiencia energética”* como la relación entre la producción de un rendimiento, servicio, bien o energía, y el gasto de energía.

**Figura 1. Consumo de energía primaria, PIB e intensidad energética en la UE-28**



Fuente: EEA (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/total-primary-energy-intensity-4/assessment-1>).

Los últimos datos oficiales publicados por la Unión Europea indican, por ejemplo, que la intensidad energética cayó un 37 % entre 1990 y 2017 (una caída anual media del 1,7 %) (Figura 1). Aunque el consumo total de energía no cambió sustancialmente a lo largo del periodo,

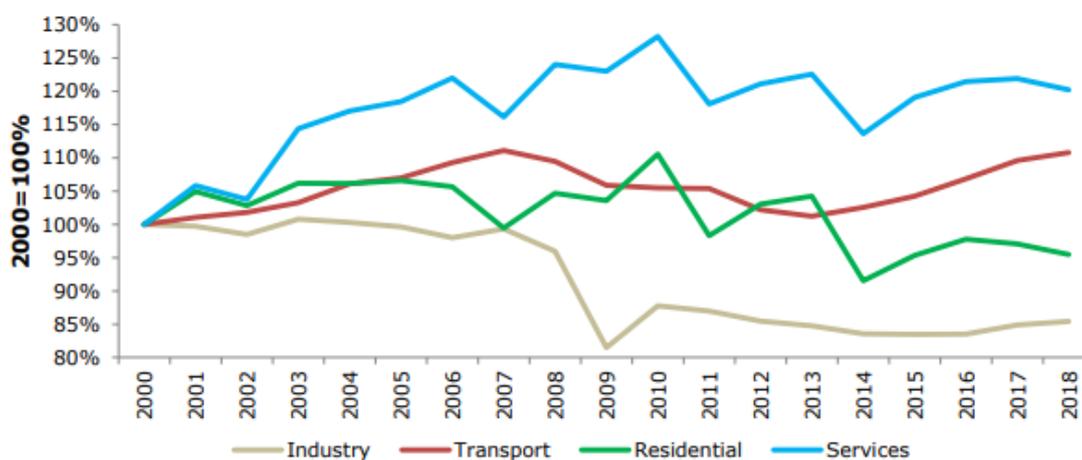
<sup>10</sup> En realidad, esa definición se ajusta mejor al concepto de intensidad energética. Hay que tener en cuenta que este indicador puede variar tanto si se reduce el consumo de energía como si aumenta el valor añadido de los bienes producidos y los servicios prestados.

aumentó el output (medido en términos del PIB) por unidad de energía consumida. Esto se debió a incrementos en la eficiencia energética y a cambios en la estructura de la economía, con una reorientación de las actividad industrial hacia sectores menos intensivos en energía y con mayor valor añadido.

Aunque la industria europea tiene una cuota del 25 % del consumo total de energía en la Unión Europea (siendo el primer sector en consumo de electricidad y el segundo en consumo de gas natural) (Tsemekidi Tzeiranaki et al., 2020), el comportamiento en términos de eficiencia energética y de intensidad energética puede calificarse como positivo, aunque queda mucho camino por recorrer para alcanzar los objetivos fijados para 2030.

El consumo energético en la industria europea evolucionó a la baja entre 2000 y 2015, con una caída acumulada del consumo de aproximadamente el 15 % desde el año 2000, reflejando una tendencia ligeramente ascendente en el periodo 2015-2018 (Gráfico 1). Este comportamiento del consumo agregado en la industria (en parte relacionado con una menor producción) contrasta con la menor caída en el sector residencial y con un consumo estable en el sector de servicios (en torno a un nivel un 20 % superior al del año 2000) y la relativa estabilidad en el consumo de energía en el sector del transporte.

**Gráfico 1. Evolución del consumo de energía en la UE-28 por sector**



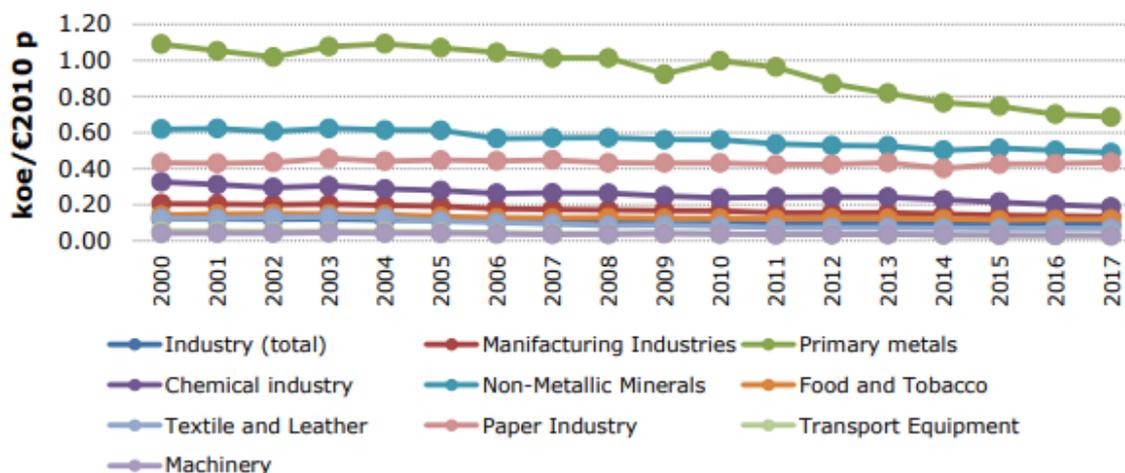
Fuente: Tsemekidi Tzeiranaki et al. (2020).

La evolución del consumo industrial no fue uniforme en los distintos Estados miembros de la UE. Entre los países con tasas de crecimiento positivas en 2000-2018 se encuentran Alemania<sup>11</sup>, Austria y Hungría, por ejemplo. Por el contrario, países como España, Francia y,

<sup>11</sup> El consumo industrial cayó en Alemania entre 2000 y 2009, para crecer en el periodo 2009-2018, dando lugar a un crecimiento en 2000-2018 en torno al 10 %.

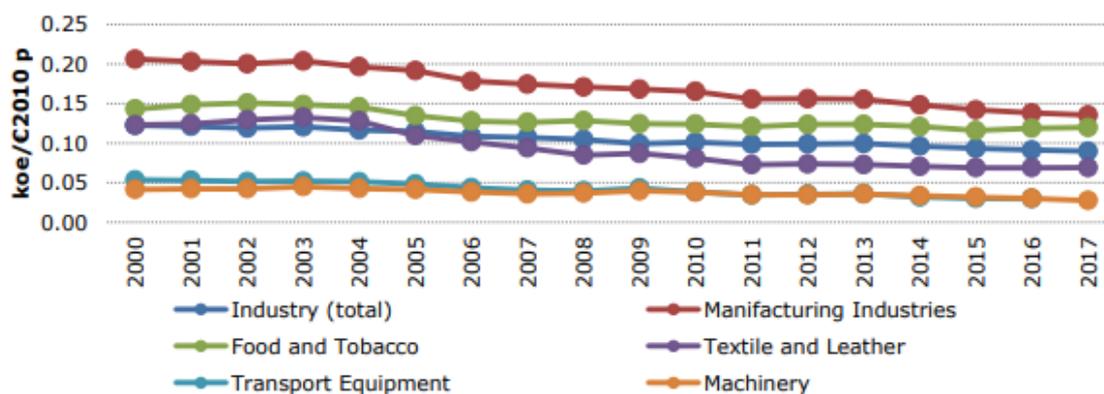
de manera significativa en Italia y el Reino Unido, disminuyó el consumo de energía en el sector industrial (Tsemekidi Tzeiranaki et al., 2020).

**Gráfico 2. Intensidad energética en la industria europea (I)**



Fuente: Tsemekidi Tzeiranaki et al. (2020).

**Gráfico 3. Intensidad energética en la industria europea (II) (detalle)**



Fuente: Tsemekidi Tzeiranaki et al. (2020).

Por sectores, las caídas más importantes en el consumo de energía en el periodo 2000-2018 se produjeron en los subsectores textil y cuero (-61 %), otras industrias (caucho y plásticos) (-38 %), hierro y acero (-27 %) y minerales no metálicos (-19 %). En conjunto, el consumo en el sector de manufacturas cayó un 16 %. Por el contrario, el consumo energético aumentó en el sector de la construcción (+47 %) y el sector maderero (+35 %).

La caída en el consumo energético se complementa con el incremento en el valor de la producción. Así, la intensidad energética cayó en el sector industrial en la Unión Europea en

conjunto un 27 % en el periodo entre 2000 y 2017, observándose un descenso generalizado en la inmensa mayoría de los subsectores y siendo los sectores de textiles y cuero y equipamientos de transporte los que registraron las mayores caídas en la intensidad energética, un 44 % y un 45 %, respectivamente (Tsemekidi Tzeiranaki et al., 2020).

Los datos relativos a los distintos subsectores (Tabla 1) indican que el sector manufacturero incrementó, en el periodo 2000-2017 y en media, tanto la producción (+10 %) como el valor añadido (+28 %), destacando la contribución de industrias como la industria química, la del equipamiento de transporte o la de maquinaria y, en menor medida, la industria de alimentación y tabaco. En el lado negativo, destacan los retrocesos de las industrias de textil y cuero, minerales no metálicos y madera, entre las manufacturas, y la industria de la minería.

**Tabla 1. Evolución del IPI y el VAB en 2000-2017 por subsector industria.**

	<b>Cambio IPI 2000-2017</b>	<b>Cuota VAB 2017</b>	<b>Cambio VAB 2000-2017</b>
<b>Manufacturas</b>	<b>9,80 %</b>	<b>63,66 %</b>	<b>28,10 %</b>
Metales primarios	-4,90 %	2,80 %	22,60 %
Química	40,60 %	8,88 %	53,80 %
Minerales no metálicos	-17,40 %	2,22 %	-3,30 %
Alimentación y tabaco	12,70 %	7,91 %	15,70 %
Textil y cuero	-49,20 %	1,94 %	-30,60 %
Diseño gráfico e impresión	-8,10 %	2,50 %	-2,70 %
Equipamiento de transporte	41,70 %	9,28 %	65,60 %
Maquinaria	13,10 %	22,44 %	50,30 %
Madera	-9,90 %	1,12 %	-4,30 %
Papel y pulpa	7,60 %	1,39 %	12,30 %
Caucho y plásticos	n/d	2,91 %	30,00 %
Otras industrias manufactureras	13,60 %	5,38 %	9,90 %
<b>Minería</b>	<b>-44,20 %</b>	<b>2,43 %</b>	<b>-43,40 %</b>
<b>Construcción</b>	<b>-0,70 %</b>	<b>20,90 %</b>	<b>-0,40 %</b>
<b>Total</b>	<b>7,30 %</b>	<b>100,00 %</b>	<b>16,10 %</b>

*Fuente: Tsemekidi Tzeiranaki et al. (2020) y elaboración propia. IPI=Índice de Producción Industrial; VAB=Valor Añadido Bruto.*

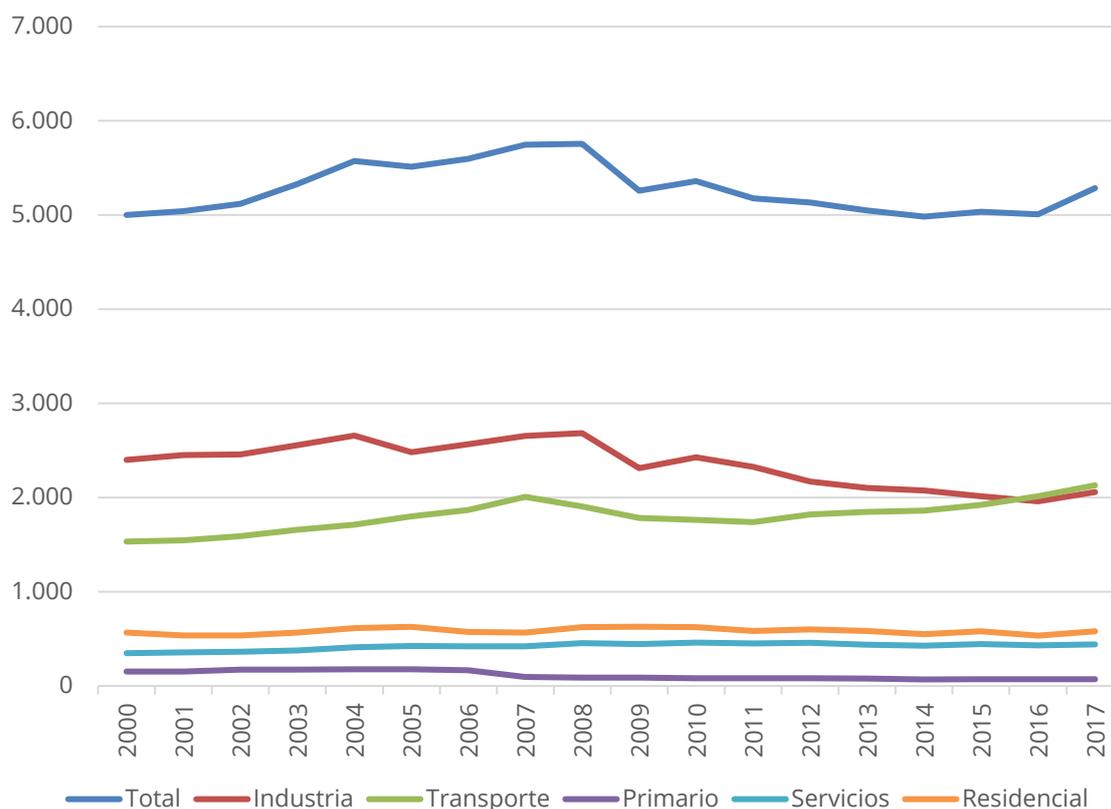
### 2.1.3. Eficiencia energética en la CAPV

El consumo de energía en la CAPV muestra una evolución en el periodo 2000-2017 estrechamente ligada a la evolución de la actividad económica (Gráfico 4).

El comportamiento del consumo agregado de energía está muy influenciado por el consumo industrial (coeficiente de correlación de consumos anuales igual a 0,77), como muestran las caídas observadas en 2005 y 2009 y la sendas de recuperación en años posteriores. Por el contrario, la evolución del consumo en el sector del transporte parece ser creciente y se

observa estabilidad en los sectores primario, residencial y de servicios a lo largo del periodo 2000-2017, la evolución descendente del consumo en el sector industrial

**Gráfico 4. Evolución del consumo de energía en la CAPV (ktep)**

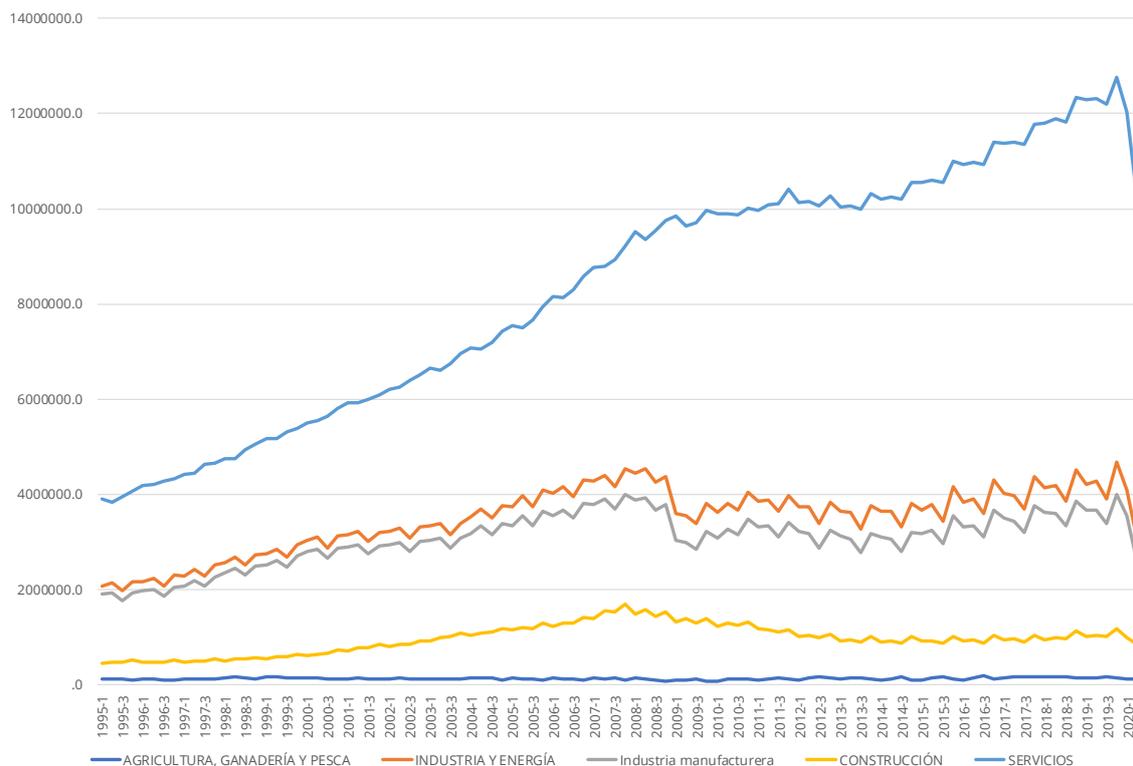


Fuente: Eustat ([https://www.eustat.eus/elementos/ele0000300/consumo-final-de-energia-de-la-ca-de-euskadi-por-sectores-ktep/tbl0000396\\_c.html](https://www.eustat.eus/elementos/ele0000300/consumo-final-de-energia-de-la-ca-de-euskadi-por-sectores-ktep/tbl0000396_c.html); accedido el 19 de noviembre de 2020).

La evolución del consumo de energía desde el comienzo de la crisis de 2008 fue negativa en casi todos los subsectores industriales (Gobierno Vasco, 2016). Exceptuando el sector de alimentación, bebidas y tabaco, en el resto de los subsectores la reducción de consumo se situó entre el 15 % y el 35 % en el periodo 2011-2014. Pese a ello, la intensidad energética del sector industrial cayó únicamente un 5,5 % en ese periodo, debido a la caída en la producción (y, por tanto, en el valor añadido).

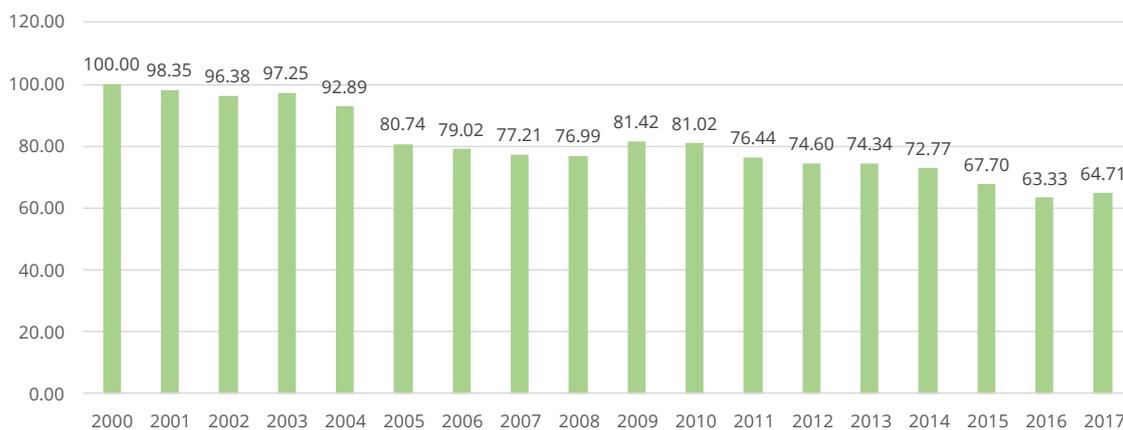
La recuperación posterior de la actividad industrial, a partir del inicio de 2015 (Gráfico 5), ha permitido mejorar la intensidad energética del sector industrial vasco, cayendo un 20,5 % en el periodo 2009-2017 (Gráfico 6).

**Gráfico 5. PIB (oferta) por sector en la CAPV (precios corrientes, €)**



Fuente: Eustat ([https://www.eustat.eus/bankupx/pxweb/es/spanish/-/PX\\_3422\\_cet01tb.px](https://www.eustat.eus/bankupx/pxweb/es/spanish/-/PX_3422_cet01tb.px); accedido el 19 de noviembre de 2020).

**Gráfico 6. Intensidad energética en el sector industrial en la CAPV (año 2000=100)**

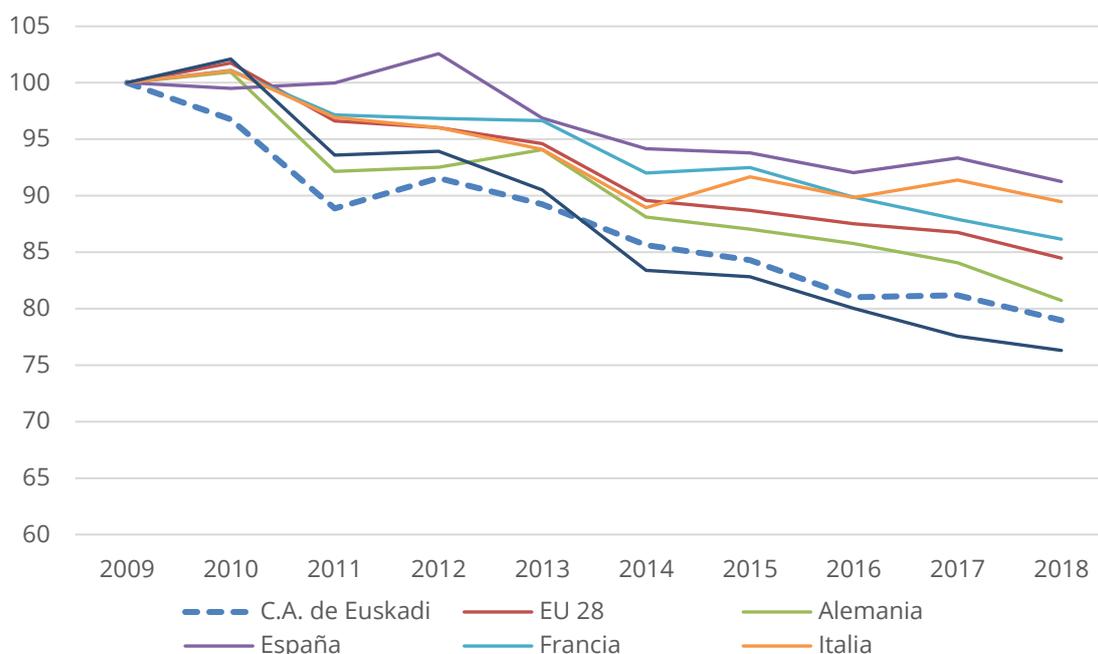


Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eustat. Nota: se define la intensidad energética como la ratio entre el consumo total de energía y el PIB del sector industrial.

El comportamiento de la intensidad energética en el sector industrial vasco ha contribuido a la mejora en la intensidad energética en el conjunto de la economía vasca (-21 % entre 2009 y

2018, por encima de la media de la UE-28 y de los valores registrados en España, Francia, Alemania o Italia y únicamente por debajo del Reino Unido en la muestra de las principales economías de Europa).

**Gráfico 7. Intensidad energética en la CAPV y en varios países europeos (año 2009=100)**



Fuente: *Eustat* y *elaboración propia* ([https://www.eustat.eus/elementos/ele0006200/Intensidad\\_energetica\\_por\\_paises/tbl0006211\\_c.html](https://www.eustat.eus/elementos/ele0006200/Intensidad_energetica_por_paises/tbl0006211_c.html); accedido el 19 de noviembre de 2020).

## 2.2. Análisis de las inversiones en eficiencia energética

### 2.2.1. Valoración tradicional

Desde el punto de vista económico, las inversiones en eficiencia energética de una empresa implican un *trade off* entre destinar a una inversión una cantidad conocida (cierta) de recursos de capital y alcanzar costes operativos más bajos en el futuro, sujetos a un determinado nivel de incertidumbre.

Tradicionalmente, las inversiones en eficiencia energética se han valorado en función del ahorro energético esperado respecto de una referencia o *benchmark* y la evolución esperada del precio de la energía durante un periodo determinado (p. ej., la vida útil total de las inversiones o bien periodos de recuperación de la inversión más reducidos). Si el valor de la energía ahorrada durante la vida del activo, convenientemente descontado en cada año, es inferior a los costes de inversión, la inversión es rentable (Gillingham et al., 2009; Gillingham y Palmer, 2014).

Además de la incertidumbre sobre el valor de la energía, cuya evolución puede dar lugar a que inversiones que eran rentables *ex ante* dejen de serlo *ex post*, existe incertidumbre sobre el consumo de energía a lo largo de la vida útil de los equipamientos energéticamente eficientes en los que invierte una empresa. Esto puede deberse tanto al impacto de los precios sobre la demanda de energía (la Tabla 2 muestra estimaciones de la elasticidad-precio en distintos tipos de industrias para una muestra de 20 países y 16 sectores industriales en el periodo 1978-2013, observándose una ligera mayor elasticidad-precio de la demanda en las industrias menos intensivas en energía<sup>12</sup>) como al “efecto rebote” o mayor consumo ligado a la liberación de recursos que induce la mayor eficiencia energética (ver la Sección 3.3).

**Tabla 2. Elasticidad-precio de la demanda de energía en distintos tipos de industrias**

	<b>Todas las industrias</b>	<b>Intensivas en energía</b>	<b>Menos intensivas en energía</b>
<b>Elasticidad de corto plazo</b>	Entre -0,037 y -0,151	Entre -0,096 y -0,200	Entre -0,079 y -0,165
<b>Elasticidad de largo plazo</b>	Entre -0,146 y -0,234	Entre -0,206 y -0,529	Entre -0,210 y -0,594

Fuente: Chang et al. (2019).

Por otro lado, puede resultar complicado distinguir el impacto de distintos factores sobre el consumo de energía. Así, este puede estar ligado al nivel de actividad que genera la demanda de energía, a la estructura de actividades (de una empresa o sector) o a la eficiencia técnica per se, inducida por el tipo de tecnología, el diseño de procesos, los protocolos operativos en las empresas, etc. (IEA, 2019a).

La incertidumbre sobre la evolución del mercado energético y sobre el rendimiento real de las inversiones puede, junto con otras restricciones a las que se enfrentan las empresas (p. ej., financieras) sesgar las valoraciones de potenciales inversiones en eficiencia energética.

## 2.2.2. Eficiencia energética y sostenibilidad

### *Beneficios no energéticos*

Uno de los factores que pueden dificultar la valoración de las inversiones en eficiencia energética y que pueden dar lugar a niveles subóptimos de inversión desde el punto de vista social (ver la discusión sobre el “*energy efficiency gap*” en la Sección 3.4) es la dificultad de incluir en el análisis otros factores que pueden considerarse “beneficios no energéticos” derivados de inversiones en eficiencia energética.

<sup>12</sup> Según Chang et al. (2019), esto se debería a que las industrias más intensivas en energía no tienen tanta capacidad de responder a cambios en los precios de la energía, ya que ésta es un input esencial en sus procesos productivos y las alternativas tecnológicas son limitadas.

**Tabla 3. Tipos de beneficios no energéticos de inversiones en eficiencia energética**

<b>Ambiente de trabajo</b> •Menor ruido •Mayor seguridad laboral •Mejores condiciones de luz, temperatura y calidad del aire •Mayor confort •Mejora de la salud	<b>Residuos</b> •Reducción en residuos de materiales, agua, productos, sustancias peligrosas •Menor coste de gestión de los residuos •Mayor eficiencia
<b>Producción</b> •Mayor productividad y calidad del producto •Mayor fiabilidad •Mejora en el rendimiento de equipos y procesos •Mayor eficiencia	<b>Emisiones/medio ambiente</b> •Menores emisiones de gases de efecto invernadero, partículas •Menor coste de cumplimiento de normativa
<b>Operación y mantenimiento</b> •Menores costes •Menor desgaste y mayor durabilidad de equipos •Menores procesos auxiliares •Mejor control de la climatización	<b>Otros</b> •Mejora de la moral •Menor responsabilidad civil •Imagen pública •Mayor competitividad •Menores riesgos legales y comerciales

Fuente: Worrell et al. (2003), Rasmussen (2017).

Entre ellos, pueden citarse los beneficios ligados a: (1) el ambiente en los lugares de trabajo (p. ej., salubridad, nivel de ruido, etc.); (2) la producción y la productividad; (3) la operación y el mantenimiento de activos; (4) la generación de residuos; (5) las emisiones y el medioambiente; y (6) otros beneficios (Rasmussen, 2017) (Tabla 3).

### *Análisis incluyendo la variable sostenibilidad*

Tener en cuenta los beneficios no energéticos durante el proceso de análisis de las inversiones en eficiencia energética tenderá a incrementar la probabilidad de que las empresas adopten decisiones positivas sobre las inversiones.

La consultora McKinsey lleva años analizando el impacto de las inversiones en equipamientos y tecnologías energéticamente eficientes, tanto desde el punto de vista del valor de la energía ahorrada como del coste evitado para la economía ligado a las emisiones evitadas de GEI.

Los análisis realizados por McKinsey muestran que, si bien muchas de las inversiones en eficiencia energética pueden ser rentables desde el punto de vista privado (de la empresa) únicamente teniendo en cuenta el valor de la energía no consumida, los beneficios medioambientales ligados a estas inversiones por la reducción de las emisiones de GEI hacen que muchas de las inversiones que desde el punto de vista privado no son rentables sean socialmente eficientes (McKinsey, 2007, 2009a, 2009b, 2010, 2017<sup>13</sup>; Fowlie et al., 2018).

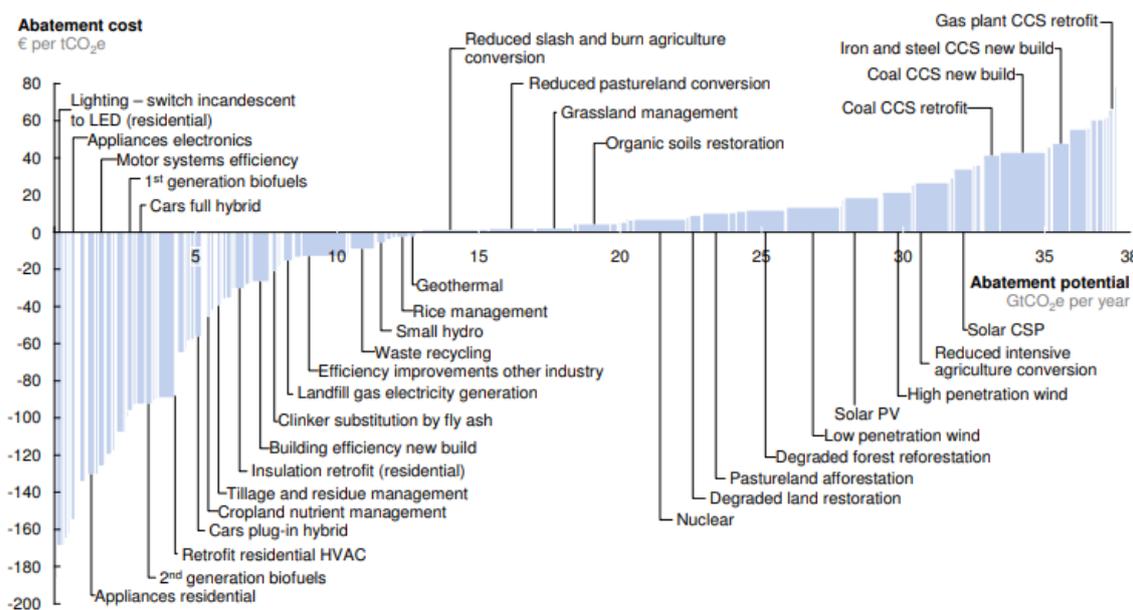
Las conocidas “curvas McKinsey” de costes de reducción de emisiones (McKinsey, 2007, 2009a, 2009bb, 2010) muestran cuál es el potencial de reducción de emisiones de GEI (eje horizontal) en una economía en función del coste de reducción de las emisiones de las distintas tecnologías incluidas en el análisis (eje vertical).

<sup>13</sup> Ver McKinsey (2017).

En particular, el Gráfico 8 muestra el máximo potencial de reducción de emisiones todas las medidas técnicas que pueden implementarse en el horizonte 2030 en el ámbito global con un coste inferior a 80 €/tCO<sub>2</sub>e, de acuerdo con la información disponible en el estudio de McKinsey (2010)<sup>14</sup>.

Si, por ejemplo, se implementaran de forma agresiva<sup>15</sup> todas las medidas cuyo coste es inferior a 80 €/tCO<sub>2</sub>e, la reducción potencial de emisiones de GEI se situaría en unos 38 GtCO<sub>2</sub>e/año. Si se consideran solo las medidas con un coste inferior a 20 €/tCO<sub>2</sub>e, la reducción potencial de emisiones se situaría en unos 30 GtCO<sub>2</sub>e/año. Así, para cada coste máximo de implementación de medidas, la curva McKinsey muestra el potencial máximo de reducción de emisiones.

**Gráfico 8. Curva McKinsey de costes de reducción de emisiones de GEI de distintas tecnologías en el horizonte 2030**



Fuente: McKinsey (2010).

Por otro lado, la curva McKinsey ordena también las tecnologías en función de su coste de reducción de emisiones. El coste de reducción de emisiones de cada tecnología se calcula

<sup>14</sup> La “curva McKinsey” cambia con el tiempo, pues depende de muchos factores, entre otros los siguientes: (1) el horizonte temporal considerado en el análisis; (2) las tecnologías existentes o que se incluyan en el análisis; (3) el coste de cada una de las tecnologías; (4) su eficiencia técnica en términos de reducción de emisiones; (5) el potencial de despliegue de cada tecnología; (6) el valor del ahorro energético y otros ahorros por mejoras de procesos, etc.

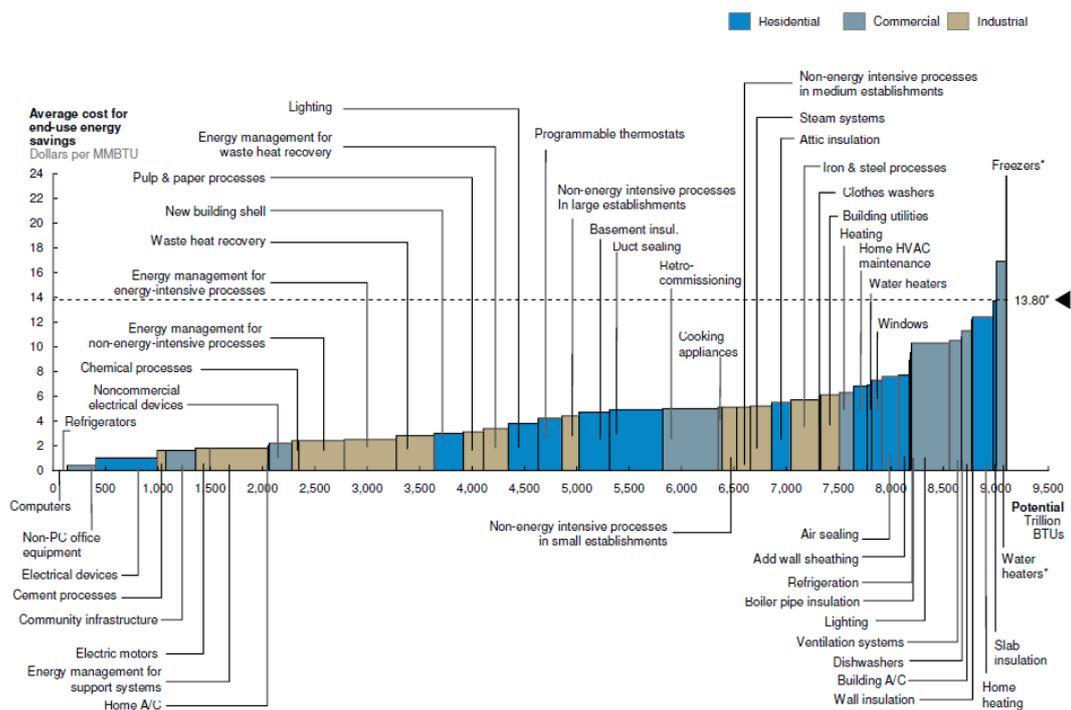
<sup>15</sup> En el informe de McKinsey: “beyond business as usual”.

como la ratio entre el coste neto (coste total anualizado menos el valor del ahorro de costes, p. ej., por un menor consumo de energía) y el monto total de las emisiones evitadas.

Por ejemplo, una tecnología con un coste total (anualizado) de 2.000 € que generara un ahorro energético valorado en 1.000 € y que evitara emisiones por valor de 100 tCO<sub>2</sub>e cada año tendría un coste de reducción de emisiones de 10 €/tCO<sub>2</sub>e. Un valor negativo del coste de reducción de emisiones estaría relacionado con ahorros significativos (en términos de coste de operación, coste del consumo de energía, etc.). Además, la curva tiene en cuenta, para calcular las reducciones totales de emisiones de GEI el potencial de despliegue de la tecnología (reflejado en la anchura de las barras de cada tecnología en el Gráfico 8).

Uno de los principales inductores de la contribución de cada tecnología a la reducción de emisiones de GEI es su potencial de ahorro energético. El desarrollo de las curvas de McKinsey tiene en cuenta dicho potencial, y requiere identificar previamente, para cada tecnología el precio medio del consumo evitado de energía, que depende del tipo de consumidor (doméstico, comercial, industrial) y del coste de la energía en cada mercado (Gráfico 9).

**Gráfico 9. Curva McKinsey de costes medios energéticos evitados con cada tecnología en EE. UU. (horizonte 2020)**



\* Average price of avoided energy consumption at the industrial price; \$35.60/MMBTU represents the highest regional electricity price used; new build cost based on AEO 2008 future construction costs  
 Source: EIA AEO 2008, McKinsey analysis

Fuente: McKinsey (2009b).

En el caso de las aplicaciones industriales –según la clasificación de McKinsey (2009b)— la curva de ahorro de costes energéticos que muestra el Gráfico 9 incluye las siguientes tecnologías, ordenadas de menor a mayor ahorro energético y separadas en dos categorías:

- Ahorro inferior a 4 \$/MMBtu (aprox. 12 €/MWh<sup>16</sup> en la actualidad): (1) procesos productivos en el sector del cemento; (2) motores eléctricos; (3) sistemas de gestión de energía para sistemas auxiliares de apoyo; (4) gestión de energía en procesos no intensivos en energía; (5) gestión de energía en procesos intensivos en energía; (6) recuperación de calor residual; (7) procesos productivos en el sector de la pulpa y el papel; (8) gestión de energía para la recuperación de calor residual; (9) procesos no intensivos en energía en grandes instalaciones.
- Ahorro superior a 4 \$/MMBtu: (1) procesos no intensivos en energía en pequeñas instalaciones; (2) procesos no intensivos en energía en instalaciones de tamaño medio; (3) sistemas de vapor; (4) procesos productivos en las industrias del hierro y el acero; (5) servicios en las instalaciones (agua, energía para climatización, etc.).

### *Análisis del ciclo de vida*

Una manera de incorporar la sostenibilidad medioambiental al análisis cuantitativo de rentabilidad de las inversiones en eficiencia energética es incluir en el análisis el coste (privado o social, en función del tipo de análisis) del impacto medioambiental.

La metodología de análisis del ciclo de vida (*life cycle analysis, LCA*), utilizada ampliamente en el campo de la economía circular y de la economía del medio ambiente, permite analizar las inversiones en eficiencia energética teniendo en cuenta el coste del impacto medioambiental durante todo su ciclo de vida (desde la extracción y producción de los materiales utilizados hasta la fabricación de equipos, la instalación, operación y mantenimiento de los activos y el desmantelamiento y reciclaje, tratamiento y vertido de los residuos). Esta metodología suele llevarse a cabo de acuerdo con estándares como ISO 14040, ISO 14044 o EN 15804.

Cuando se incluyen todos los costes medioambientales en el análisis, se habla de un análisis completo del ciclo de vida (*full life cycle analysis, FLCA*). En caso contrario, se trata de un análisis simplificado del ciclo de vida (*simplified life cycle analysis, SLCA*). El análisis se puede centrar en un único impacto medioambiental, p. ej., en términos del agua utilizada (*life cycle water footprint, LFWF*) o de emisiones de gases de efecto invernadero (*life cycle carbon footprint, LCCF*).

La metodología del coste del ciclo de vida (*life cycle costing, LCC*) permite calcular los costes asociados a un análisis de ciclo de vida. Esta metodología, estandarizada en las normas ISO15686-5 o EN 16627 para activos físicos, por ejemplo, permite analizar decisiones de inversión, desarrollo de nuevos productos y otras decisiones empresariales.

---

<sup>16</sup> 4 \$/MMBtu = 12,01 €/MWh utilizando un tipo de cambio de 1 \$ = 0,88 € (cotización del día 17/07/20) y la tasa de conversión 1 MMBtu = 293 kWh.

Como ejemplo de utilización de este tipo de metodologías revisamos brevemente a continuación el análisis de Bull et al. (2014), desde el punto de vista social, de inversiones públicas en mejoras en eficiencia energética en edificios (escuelas) utilizando las metodologías LCCF (para medir la huella de carbono a lo largo de toda la vida útil de las inversiones) y LCC.

El coste del ciclo de vida se calcula como el valor presente neto (VPN) del flujo de costes de inversión y operación estimados durante toda la vida útil de la inversión.

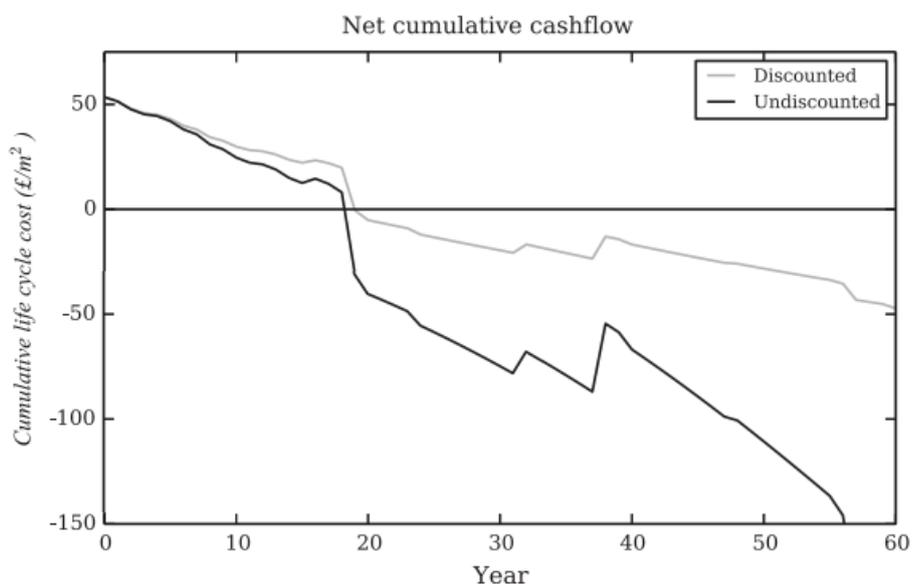
Para evaluar la inversiones en eficiencia energética, Bull et al. (2014) calculan el valor anual de la energía ahorrada con la siguiente fórmula (adaptada en esta exposición):

$$FSV_t = QFS_t \times ( FV_t + AQV_t + ( GHGV_t \times CI_t ) ),$$

donde:

- FSV = valor total del ahorro energético (€);
- QFS = cantidad de energía ahorrada (kWh);
- FV = coste de la energía (€/kWh);
- AQV = coste del impacto sobre la calidad del aire (€)<sup>17</sup>;
- GHGV = coste de las emisiones de GEI (€/kg CO<sub>2</sub>e);
- CI = intensidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de la energía (kg CO<sub>2</sub>e/kWh);
- t = año.

**Figura 5. Ejemplo de flujo de coste acumulado**



Fuente: extraído de Bull et al. (2014).

<sup>17</sup> Bull et al. (2014) utilizan un indicador del coste asociado al impacto sobre la calidad del aire de una tonelada adicional emitida de gas o partículas basado en DECC (2011).

De acuerdo con esta metodología, la inversión es rentable desde el punto de vista social si el VPN del ahorro energético durante toda la vida útil de la inversión es superior al VPN del flujo de costes totales (de inversión y operación) durante toda la vida útil de la inversión. Visto de otra manera, la inversión resulta rentable en el momento en el que el flujo de costes del ciclo de vida acumulados se convierte en negativo (en la Figura 5, por ejemplo, a partir del decimonoveno año de vida de la inversión en eficiencia energética).

Estas herramientas de análisis pueden utilizarse, por parte de las autoridades regulatorias, por ejemplo, para evaluar el impacto de medidas de fomento de la eficiencia energética sobre la huella medioambiental (reducción de emisiones, mejora de la calidad del aire, etc.). De esta manera, puede medirse la contribución del despliegue de tecnologías más eficientes a la consecución de objetivos energéticos o medioambientales y así valorar el impacto sobre la sostenibilidad de las mismas y diseñar políticas adecuadas y alineadas con dichos objetivos.

Por otra parte, este tipo de análisis puede adaptarse al análisis de inversiones en eficiencia energética por parte de las empresas. En el apartado de beneficios (ahorro energético), se incluirían en este caso todos los costes energéticos y medioambientales evitados gracias a la inversión. Estos últimos serán cada vez más relevantes, a medida que se vayan incorporando en la regulación y la normativa señales económicas que fuercen a los agentes económicos a internalizar los costes medioambientales de las decisiones privadas (p. ej., precio del carbono, nuevos estándares medioambientales, etc.).

Chiaroni et al. (2016) analizaron las decisiones de inversión en eficiencia energética de 130 empresas industriales en Italia. La mayor parte de las empresas utilizaban como indicadores para tomar las decisiones de inversión los periodos de retorno (*payback periods*) y la tasa interna de rentabilidad (TIR), y los autores llegaron a la conclusión de que reglas de decisión basadas en estos indicadores daban lugar a bajos niveles de inversión en tecnologías de cogeneración, motores eléctricos, variadores de velocidad (*variable speed drives, VSD*) o sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI). Esto es debido, según Chiaroni et al. (2016) a que los valores de aceptación para estas variables están muy influenciados por la propensión al riesgo de las personas que toman las decisiones y otros factores, como la salud financiera de la empresa.

Chiaroni et al. (2016) sugieren que la aplicación de una metodología basada en el ACV implicaría que muchas de las tecnologías que no parecen rentables bajo los criterios del periodo de retorno y la TIR serían rentables desde una perspectiva de ciclo de vida en sectores intensivos en energía como el de automoción, cemento, hierro y acero o pulpa y papel. Estas metodologías tienen algunas limitaciones, sin embargo, especialmente si se desea estimar el valor social de las inversiones. Dado que su enfoque es el producto o la tecnología, puede resultar complicado aplicarlas en otras escalas (p. ej., cadenas de valor). Además, los beneficios de inversiones por parte de una empresa pueden en algunos casos revertir en otras empresas o segmentos de la cadena de valor, aguas arriba o abajo.

### 3. INVERSIONES EN EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL

#### 3.1. Potencial de eficiencia energética en la industria

En los sectores industriales, las inversiones en eficiencia energética pueden estar orientadas a realizar actuaciones sobre elementos o equipamientos físicos, por un lado, o a optimizar los procesos de producción, operativos, logísticos o de gestión, por otro, con el fin de reducir el consumo de energía.

Entre las **actuaciones sobre elementos físicos** pueden incluirse las relacionadas con el aislamiento y la iluminación de los edificios, cambios en los sistemas de climatización (generación de calor o refrigeración), cambios en las fuentes de energía utilizadas o modificaciones en los componentes, equipamientos y máquinas utilizados en los distintos procesos de producción, operativos, logísticos y comerciales.

Otro tipo de actuaciones pueden tener como objetivo la mejora en la **eficiencia de los procesos de producción y otros procesos** dentro de la empresa de tal modo que se optimice el binomio valor económico generado-consumo de energía, materiales y otros recursos. Por ejemplo, las inversiones en herramientas de diseño, monitorización y control de procesos, etc., pueden dar lugar a mejoras en los procesos de mantenimiento, incluyendo una dimensión preventiva y/o predictiva, y facilitar el diseño de componentes y productos más sostenibles (i. e., cuya fabricación suponga un menor consumo de energía y materiales).

El análisis de las **fuentes de consumo de energía** en las empresas industriales refleja la relevancia del consumo energético en forma de calor y, por tanto, señala el área en el que se podrían alcanzar las mayores reducciones en el consumo de energía.

Por otro lado, una **mejor utilización de los materiales** en los distintos procesos industriales puede dar lugar a una mayor eficiencia energética y a menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Las mejoras pueden estar relacionadas con un mejor diseño de productos (p. ej., con criterios de ecodiseño), una mayor circularidad en los procesos productivos y logísticos que reduzca el consumo de materiales y la utilización de materiales innovadores con mejores prestaciones y menores tasas de emisiones implícitas.

La Tabla 4 muestra una estimación del desglose del consumo de energía para procesos que requieren calor, procesos de enfriamiento y uso de energía eléctrica (incluyendo producción de calor y climatización<sup>18</sup>) y del potencial de ahorro de energía en cada sector. El calor utilizado en procesos productivos<sup>19</sup> es la principal fuente de consumo de energía en todos los sectores

---

<sup>18</sup> HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning).

<sup>19</sup> Una variable que ayuda a explicar el consumo de energía en forma de calor es la temperatura del vapor utilizado en los procesos productivos, que varía en función del sector industrial. Los sectores de producción de hierro y acero, y metales y minerales no férreos utilizan una gran parte del vapor a más de 600 °C. Sectores como el de la fabricación de maquinaria y el refinado utilizan una gran parte del vapor en un rango medio de

industriales y en conjunto puede alcanzar hasta dos tercios del consumo total, seguida del uso de electricidad.

**Tabla 4. Consumo de energía por tipo de proceso y uso en distintos sectores industriales e incremento potencial de eficiencia energética en 2030**

Sector	Consumo de energía por proceso/uso (%)			Ganancia potencial de eficiencia energética en 2030	
	Procesos con calor	Procesos de enfriamiento	Uso de electricidad	Económica (%) <sup>1</sup>	Técnica (%) <sup>2</sup>
Pulpa, papel e ind. gráfica	59	0,3	31	2,9-3,8	19
Hierro y acero	75	0,4	19	4,3-4,6	24
Minerales no metálicos	74	0,2	17	3,3-3,6	19
Químico y farmacéutico	58	0,6	30	4,0-4,9	25
Metales no ferrosos	32	0,0	57	5,5-5,8	22
Refino	84	0,6	7	4,0-4,5	25
Alimentación y bebidas	62	10,0	34	5,2-6,5	26
Maquinaria	40	1,0	53	5,2-6,5	27
<b>Total</b>	<b>66</b>	<b>1,0</b>	<b>26</b>	<b>4,3-5,0</b>	<b>--</b>

*Fuente: ICF Consulting (2015). 1= los valores de los rangos mostrados recogen la ganancia de eficiencia energética con un periodo de payback de 2 y 5 años, respectivamente. 2= la ganancia de eficiencia técnica indica el potencial máximo estimado de reducción del consumo energético, sin tener en cuenta parámetros económicos.*

Por otro lado, el potencial incremento en la eficiencia energética depende crucialmente de las inversiones concretas que se realicen y del sector y del país del que se trate. Por ejemplo, McKinsey (2009b) indicaba, citando varios estudios, que el potencial técnico de ganancias en eficiencia técnica en las industrias intensivas en energía en EE. UU. podría variar (en conjunto) entre el 35 % y un 71 %<sup>20</sup>, utilizando la tecnología existente en ese momento. El potencial teórico (máxima ganancia en eficiencia) se situaba en un rango entre el 43 % y el 95 %. Este cálculo, sin embargo, asumía el rediseño completo de las operaciones en proyectos *greenfield* (es decir, iniciados desde cero).

La eficiencia energética técnica potencial en los sectores industriales europeos en el horizonte 2011<sup>21</sup>-2030 variaba en el estudio de ICF Consulting (2015) entre el 19 % en los sectores de

---

temperatura (entre 250 y 600 °C), mientras que los sectores de pulpa y papel, alimentación y bebidas y químico y farmacéutico utilizan una parte significativa del calor en rangos de temperatura relativamente bajos (menos de 250 °C) (ICF Consulting, 2015).

<sup>20</sup> En el caso de industrias concretas, los rangos potenciales de eficiencia energética se situaban en: 1) química (71 %-88 %), 2) minería (60 %-95 %), 3) pulpa y papel (39 %-43 %), 4) refino (38 %-73 %), 5) acero (35 %-43 %).

<sup>21</sup> El estudio utilizó datos reales hasta 2013, pero tomó como año base 2011.

pulpa y papel y de productos minerales no metálicos y el 27 % del sector de maquinaria (Tabla 4).

Cuando se incluyen parámetros económicos, se observa que el incremento de eficiencia energética es mucho menor, situándose entre el 3 % y el 5,5 %, aproximadamente, cuando el periodo de *payback* de la inversión considerado en el análisis es de 2 años y entre el 3,6 % y el 6,5 % cuando el periodo de *payback* es de 5 años.

### 3.1.1. Rentabilidad de inversiones en equipamientos concretos

Los elementos que pueden modificarse (por actualización de los mismos o cambio de tecnología) para incrementar la eficiencia energética dependen de los procesos concretos y de la configuración de los activos de cada empresa.

Pese a todo, existen algunos grupos de elementos que pueden ser considerados relativamente comunes a muchas empresas en distintos sectores industriales y que pueden clasificarse en sistemas de alimentación de energía, de calor, de enfriamiento, de compresión, de ventilación y climatización, de iluminación, etc., además de otros sistemas específicos para cada sector (ICF Consulting, 2015).

Por ejemplo, la alimentación de energía para el uso de la maquinaria puede llevarse a cabo a través de distintos tipos de motores, bombas, turbinas, ventiladores y fuelles y otros equipamientos que permiten su funcionamiento. Los procesos que requieren el uso de calor utilizan distintos sistemas de calor. Si el uso de calor es directo, se basan en distintos tipos de hornos, fraguas, calderas, máquinas de secado, etc. Los procesos que utilizan calor de forma indirecta suelen utilizar medios para la transferencia de calor como agua caliente o vapor.

Los sistemas de enfriamiento y refrigeración utilizan equipamientos desde torres de refrigeración, máquinas y equipos de enfriamiento (p. ej., *chillers*, congeladores, refrigeradores adiabáticos), compresores para la refrigeración, etc. Los sistemas neumáticos de producción y distribución aire comprimido se basan en configuraciones muy variadas, con distintos tipos de componentes y equipamientos (incluyendo sistemas de control de flujos, caudalímetros, etc.), y tienen usos muy diversos en los distintos sectores industriales. Además, existen sistemas de compresión específicos para nitrógeno, helio, hidrógeno, gas natural, biogás, etc., con uso en distintas industrias y para aplicaciones muy diversas.

Por otra parte, los sistemas de ventilación y climatización (*heating, ventilation and air conditioning*, HVAC) incluyen todos los dispositivos y equipamientos para el calentamiento, enfriamiento y circulación de aire caliente y frío para distintos usos, incluyendo la climatización de los espacios. Los sistemas de iluminación (para el interior y el exterior de las instalaciones) incluyen todos los dispositivos y equipamientos para iluminar estancias y espacios, como luminarias, sistemas de control, etc.

Además de estos sistemas, cada industria desarrolla y utiliza maquinaria y equipamientos específicos para sus procesos y que no necesariamente se incluyen en las categorías anteriores.

Tanto el potencial técnico de reducción del consumo energético como la rentabilidad de las inversiones en equipamientos en los procesos industriales es muy variada. La Tabla 5 muestra los resultados de la estimación de las ganancias de eficiencia energética de diversas inversiones en equipamientos realizado por ICF Consulting (2015) y con periodos de recuperación de la inversión de hasta 5 años.

**Tabla 5. Ganancias potenciales de eficiencia energética en el horizonte 2030 de distintos sistemas y equipamientos industriales**

Payback y ganancias de eficiencia	Sistemas y equipamientos industriales
<b>Periodo de payback inferior a 2 años</b>	
Ganancias de eficiencia hasta 2 %	Revisión y reparación de trampas de vapor Mantenimiento preventivo de hornos
Ganancias de eficiencia > 2 % y hasta 5 %	Recuperación de gases (en hornos y calderas) Sistemas de gestión de la energía (EMS) Control avanzado de procesos de calor en hornos Optimización de la combustión (hornos)
Ganancias de eficiencia > 5 % y hasta 10 %	Monitorización de gas cloro (hornos y calderas) Quemadores de alta eficiencia (hornos)
Ganancias de eficiencia > 10 %	Sistemas de control integral Contadores por intervalos
<b>Periodo de payback entre 2 y 5 años</b>	
Ganancias de eficiencia hasta 2 %	Equipamientos HVAC de alta eficiencia Control avanzado de calderas Recuperación de calor para calentar agua Optimización de sistemas de bombas Utilización de calor radiante Control de secuenciación Compresores de enfriadores con velocidad variable
Ganancias de eficiencia > 2 % y hasta 5 %	--
Ganancias de eficiencia > 5 % y hasta 10 %	Sistemas de control avanzado con ajustes de velocidad automáticos (bombas, ventiladores, motores...)
Ganancias de eficiencia > 10 %	--

*Fuente: ICF Consulting (2015).*

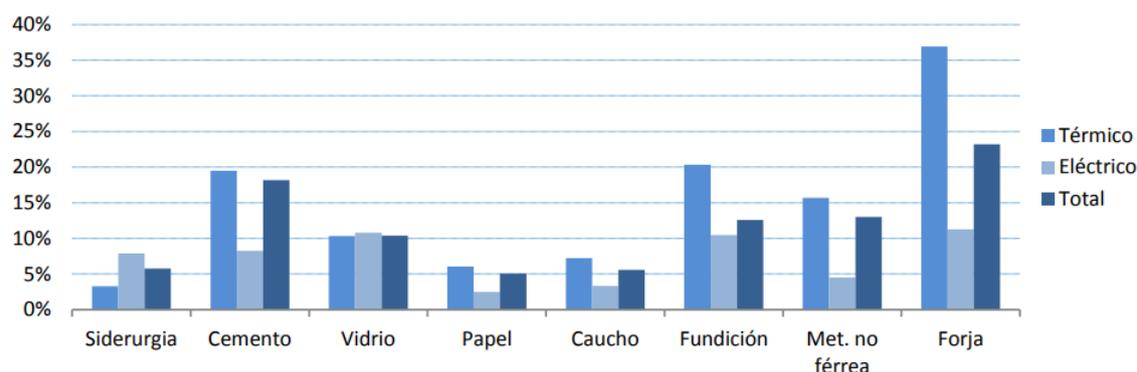
Aunque hay potencial para obtener ganancias de eficiencia invirtiendo en equipamientos, en muchos casos no son de una gran magnitud (en términos porcentuales) y muchas de ellas requieren periodos de recuperación de más de 2 años. Estos resultados sugieren que, en muchos casos, las inversiones solo serán atractivas para la industria intensiva en energía (pequeños porcentajes de mejora implican ahorros sustanciales en las facturas energéticas) y con capacidad financiera para afrontar periodos de recuperación de las inversiones relativamente largos.

En el caso de la CAPV, un estudio del Ente Vasco de la Energía del año 2010 estimó que, con la tecnología disponible en ese momento, el ahorro potencial de energía (térmica más eléctrica) en diversas industrias intensivas en energía variaba en la CAPV entre el 5% (industrial del papel) y el 23% (sector de la forja) (Gobierno Vasco, 2016) (Gráfico 10).

El estudio señalaba que el margen de mejora se situaba principalmente en:

- 1) la actualización de los equipamientos en hornos y calderas (ajustes de combustión, sustitución de quemadores, instalación de recuperadores de calor o economizadores, precalentamiento de cargas, enriquecimiento de aire de combustión con O<sub>2</sub>, aislamientos);
- 2) la reducción de consumos eléctricos (variadores de velocidad, motores eléctricos más eficientes, desconexión de transformadores, mejoras en sistemas de aire comprimido y en los equipos de frío); y
- 3) mejoras en la configuración y en el control de los sistemas; y
- 4) la implantación de sistemas de cogeneración.

**Gráfico 10. Potencial técnico de ahorro energético en diversas industrias en la CAPV**

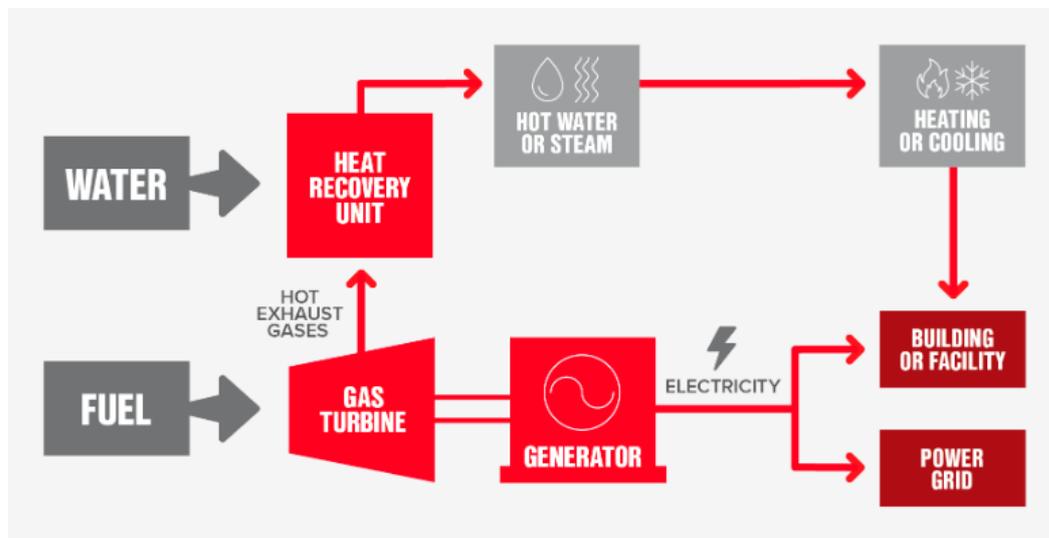


Fuente: Gobierno Vasco (2016).

### 3.1.2. Tecnologías alternativas para el suministro y gestión de la energía en las empresas industriales

#### Cogeneración

Una de las vías para incrementar la eficiencia energética en las empresas industriales es instalar equipos de cogeneración de electricidad y calor a partir de un único combustible (generalmente, gas natural). Estos sistemas caen dentro del epígrafe “recuperación del calor” en la Tabla 5.

**Figura 6. Esquema de un sistema de cogeneración industrial**


Fuente: extraído de [www.centraxgt.com](http://www.centraxgt.com).

Los sistemas de cogeneración (*combined heat and power*, CHP, en inglés) permiten capturar el calor generado durante la producción de electricidad en una turbina de gas natural y utilizarlo como fuente de energía térmica para alimentar procesos industriales (Figura 6).

Estos sistemas generan eficiencia a través de (1) un mayor aprovechamiento del potencial energético del combustible utilizado (p. ej., gas natural), al reutilizar parte de la energía disipada durante la combustión del gas en la turbina; (2) menores pérdidas de energía relacionadas con el transporte y la distribución de electricidad. Además de las ganancias en la eficiencia energética de las plantas industriales, la introducción de sistemas de cogeneración puede dar lugar a beneficios medioambientales adicionales por sustitución de combustibles con mayores emisiones de GEI.

La instalación de sistemas de cogeneración ha sido una de las vías que ha utilizado la industria intensiva en energía en España para reducir sus costes de operación. Las inversiones en cogeneración se han beneficiado de diversos esquemas de incentivos, al considerarse esta tecnología como una tecnología más dentro del denominado "régimen especial", definido en la Ley 82/1980.

Así, el Real Decreto 2366/1994, que regulaba la producción de energía eléctrica renovable y en instalaciones de cogeneración y otras instalaciones de alta eficiencia), estableció precios de venta a las distribuidoras de la energía generada por estas instalaciones en función de las tarifas eléctricas, la potencia instalada y el tipo de tecnología.

La Ley 54/1997 del Sector Eléctrico distinguía la producción en régimen ordinario de la producción en régimen especial y fijó un marco económico distinto para cada uno de ellos. El Real Decreto 2818/1998, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energías renovables, residuos y cogeneración, estableció primas

para las instalaciones del régimen especial que debían ser actualizadas anualmente y revisadas cada 4 años. Este sistema retributivo fue posteriormente actualizado por diversos decretos, como el Real Decreto 436/2004 o el Real Decreto 661/2007<sup>22</sup>.

A principios de la década pasada, en el contexto de un creciente déficit tarifario, se modificó en diversas ocasiones el marco retributivo para instalaciones del régimen especial; por ejemplo, a través del Real Decreto-ley 1/2012, que suspendió los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos, y del Real Decreto-ley 2/2013, que modificó el Real Decreto 661/2007, eliminando la opción de retribución de basada en un precio de mercado más una prima.

A raíz de la aprobación del Real Decreto-ley 9/2013, que estableció medidas urgentes para garantizar la estabilidad financiera del sistema eléctrico, y de la nueva ley del sector eléctrico (Ley 24/2013), se desarrolló un nuevo marco retributivo para la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos (Real Decreto 413/2014) que establece un incentivo a la inversión (€/MW) y un incentivo a la operación (€/MWh) que dependen de parámetros de eficiencia (rendimiento eléctrico equivalente, rendimiento eléctrico y rendimiento total de cada instalación) y de la evolución del mercado (precios previstos de la electricidad, los combustibles y el CO<sub>2</sub>) y que, con algunas actualizaciones en el periodo 2014-2018, sigue vigente en la actualidad.

El marco de apoyo a la cogeneración dio lugar a un crecimiento gradual de la potencia instalada en este tipo de instalaciones en España desde los años 90. A finales de 2019, había 5.666 MW (5.677 MW) de potencia instalada en el sistema eléctrico peninsular (nacional), con una producción de casi 30 TWh de las instalaciones activas (REE, 2020). La mayor parte de la potencia instalada (92 % del total) está ubicada en instalaciones industriales y utiliza gas natural como combustible (responsable del 84 % de la producción de electricidad y el 86 % de la producción de calor) (MITECO, 2020). Las previsiones de evolución de la cogeneración son no son especialmente favorables. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, por ejemplo, prevé la adición durante este periodo de 1.200 MW de capacidad de instalaciones de cogeneración de alta eficiencia. Sin embargo, unos 2.400 MW superarán la vida útil regulatoria que les da derecho a percibir incentivos, por lo que el “Escenario Objetivo” del PNIEC considera una reducción gradual en la potencia instalada en instalaciones de cogeneración hasta alcanzar 3.670 MW en 2030 (MITECO, 2020).

En el País Vasco, el peso del sector industrial y, en particular, de la industria intensiva en energía ha dado lugar a una apuesta histórica por la cogeneración (especialmente, a partir de gas natural) como vía para incrementar la competitividad de las empresas industriales.

Así, con el primer plan de cogeneración (1982-1987) se desarrollaron proyectos piloto de cogeneración en la industria y se alcanzó una cuota del 10% de la producción de energía

---

<sup>22</sup> El Real Decreto 616/2007, sobre fomento de la cogeneración, estableció un marco legal específico para el desarrollo de este tipo de instalaciones

eléctrica en la CAPV<sup>23</sup>. Las instalaciones de cogeneración se han desplegado en todos los sectores industriales intensivos en energía: empresas como Michelin (neumáticos), Unilever (alimentación), Repsol-Petronor (refino), Guascor (motores), Ampo (válvulas), Wartsila (motores), Iparlat (lácteos), Bunge (aceites para alimentación), Salica (conservas) o diversas empresas papeleras (Papelera Guipuzcoana de Zicuñaga, Papelera del Oria o Smurfit Kappa) disponen de equipos propios de cogeneración (Vadillo, 2018)<sup>24</sup>.

La potencia instalada en cogeneración se situó en 546 MW en 2012, para descender ligeramente hasta 482 MW en 2018. Ese año, la producción de electricidad de instalaciones de cogeneración se situó en más de 2.200 GWh, lo que supuso el 41 % de la producción en la CAPV y un 13,7 % del consumo de energía eléctrica (EVE, 2020). Además, la cogeneración supuso el 15,2 % del consumo total de gas natural en la CAPV.

Las perspectivas de evolución de la cogeneración en el País Vasco eran relativamente favorables antes de la pandemia del coronavirus. Así, la Estrategia Energética de Euskadi 2030 (Escenario de Políticas Energéticas) preveía un incremento de la capacidad instalada en cogeneración (principalmente, de gas natural) hasta alcanzar un 21 % de cobertura de la demanda en 2030 (Gobierno Vasco, 2016).

El futuro de la cogeneración como una vía para incrementar la eficiencia energética en la industria, sin embargo, depende de varios factores, como (1) la evolución del precio del combustible (habitualmente, gas natural), que dependerá de la dinámica en el mercado global de GNL, la evolución de la demanda de gas natural en Europa, la evolución del mercado y los precios de la electricidad y la evolución del precio de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>; (2) los desarrollos tecnológicos que den lugar a mayores rendimientos y menores emisiones netas.

Un aspecto que debe señalarse es que, como proceso de generación de energía, las instalaciones de cogeneración electricidad-calor son neutrales desde el punto de vista tecnológico, pues estos procesos combinados pueden también desarrollarse en instalaciones con energías renovables.

### *Electrificación de consumos (bombas de calor y motores de alta eficiencia)*

La sustitución de combustibles fósiles por electricidad para alimentar procesos o bien generar calor es una de las vías para mejorar la eficiencia energética y, simultáneamente, reducir las emisiones de GEI en muchos sectores industriales.

En lo que se refiere al consumo de calor, la electrificación permite incrementar la eficiencia de muchos procesos con temperaturas elevadas en diversos sectores industriales. Además, facilita el uso de otras fuentes de energía como el calor residual, la geotermia o el calor ambiental, mediante el uso de bombas de calor.

---

<sup>23</sup> Fuente: <https://www.eve.eus/Conoce-la-Energia/La-energia-en-Euskadi/Historia?lang=es-es>.

<sup>24</sup> Fuente: [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/03/23/companias/1521828719\\_245780.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/03/23/companias/1521828719_245780.html).

Bühler et al. (2019) identifican vías para electrificar los consumos de energía de una instalación industrial en cuatro ámbitos principales:

- Combustibles: reemplazo de combustibles para generar calor por tecnologías que utilizan electricidad (puede ser convencional o basada en instalaciones renovables o hidrógeno).
- Instalación o empresa: reemplazo de una caldera alimentada por un combustible fósil por una caldera eléctrica o una bomba de calor.
- Procesos: reemplazar el suministro de energía para un proceso concreto por una tecnología alimentada con electricidad (bomba de calor, calentamiento por resistencias o rayos infrarrojos, etc.), sin cambiar el proceso.
- Operación de una unidad: cambio en un proceso por reemplazo de una unidad en operación por una eléctrica (p. ej., separación mecánica en vez de evaporación).

Las soluciones tecnológicas aplicables a instalaciones y procesos concretos dependen crucialmente de los procesos y de los requerimientos en términos de temperatura. Por ello, las tecnologías *power-to-heat* que pueden aplicarse son muy variadas y se encuentran en distintos estadios de madurez (Tabla 6 y Tabla 7), incluyendo desde bombas de calor de alta temperatura (*high temperature heat pumps*, HTHP), para procesos con calor o agua o procesos de destilación, con relativamente alta madurez tecnológica y comercial, hasta calderas eléctricas y equipamientos de compresión mecánica de vapor, cuyo nivel de madurez tecnológica (*technology readiness level*, TRL) puede ser menor, dependiendo del proceso.

**Tabla 6. Estadios de desarrollo de aplicaciones *power-to-heat* en distintas industrias**

Sector	Tecnología	TRL*	Estadio de desarrollo
Diversos sectores	Generación eléctrica de vapor	7	Demostración (prototipos)
Papel y cartón	Secado con microondas	8	Demostración (sistemas certificados)
Química básica	Diversas tecnologías	4	Verificación funcional básica
Vidrio y cerámica	a) Inductiva / resistiva	5	Demostración (verificación)
	b) Conductiva	9	Comercialización (pequeña escala)
Cemento	Resistiva	3	Verificación funcional básica
Hierro y acero	Conductiva/inductiva	9	Comercialización
Metales no férreos	a) Inductiva / calentador por inmersión	9	Comercialización
	b) Plasma / microondas	6	Demostración (proyectos)

Fuente: Schüwer y Schneider (2018). \*TRL = *technology readiness level* (nivel de madurez tecnológica).

**Tabla 7. Estadios de desarrollo de madurez de tecnologías de electrificación de distintos procesos industriales**

Proceso	Tecnología	Disponibilidad de la tecnología
Calor de proceso	Bomba de calor	Alta
	HHP	Media
	Calentador eléctrico	Alta
	Calentador por electrodos	Alta
	Recompresión de vapor	Alta
Secado	Electromagnético	Media
	Por impulsos	Baja
	Por aire caliente	Baja
Esterilización / pasteurización	Electromagnético	Media
	Esterilización de alta presión	Baja
Destilación / separación	Filtración	Media
	Campo eléctrico/electrostático	Baja
	Técnicas mecánicas	Media
Fundición / cocción	Horno de inducción	Alta
	Electromagnética	Media
	Resistencia directa/indirecta	Alta
	Horno de arco eléctrico	Alta
	Plasma	Media
	Haz de electrones	Media

Fuente: Bühler et al. (2019).

Las bombas de calor son la tecnología más madura aplicable a procesos de generación y aprovechamiento de calor residual. Su elevado rendimiento (con tasas de rendimiento o *coefficients of performance*, COP<sup>25</sup>, superiores a 1) se debe a que no solo actúan como generadores de calor (a partir de electricidad), sino que, además, permiten desplazar o bombear calor desde una fuente hasta el lugar donde se utilizará.

El potencial de ahorro energético por sustitución de tecnologías actuales por tecnologías *power-to-heat* en la industria es amplio, como demuestra un amplio conjunto de estudios sobre distintos países.

- **Gruber et al. (2015)**, por ejemplo, estimaron ganancias de eficiencia energética potenciales entre el 6% y el 13% de la energía final ligadas a la integración de tecnologías *power-to-heat* en la industria alemana en aplicaciones donde no es necesario un cambio profundo en el proceso de producción (p. ej., como en el caso de las instalaciones de producción de acero o los altos hornos).
- **Hers et al. (2015)** estimaron un potencial de electrificación en los Países Bajos de al menos el 33 % de la demanda de calor en el sector industrial y, especialmente, en

<sup>25</sup> El COP es la ratio entre el calor/frío útil y la energía requerida para generarlo.

alimentación y bebidas, sector químico e industria del papel. Esta estimación infravalora dicho potencial, al no tener en cuenta los procesos con requerimientos de calor superiores a 260° C.

- **Mai et al. (2018)** desarrollan distintos escenarios de electrificación en la industria en EE. UU. (Gráfico 11). En su análisis, la adopción de calderas eléctricas y de climatización eléctrica es relativamente limitada, incluso en el escenario de máxima electrificación, por su menor productividad respecto de otras tecnologías eléctricas. Aun así, esperan que en el escenario de máxima penetración las bombas de calor cubran el 60 % de la demanda de energía para climatización en instalaciones industriales en 2050.

El mayor impacto de la electrificación se daría en la demanda de calor en sectores como el secado, curado o reticulación y otros procesos industriales en los que tecnologías de calentamiento como las basadas en rayos infrarrojos o ultravioleta o la inducción podrían ofrecer mayores niveles de productividad y otros beneficios, como un mayor control de los procesos.

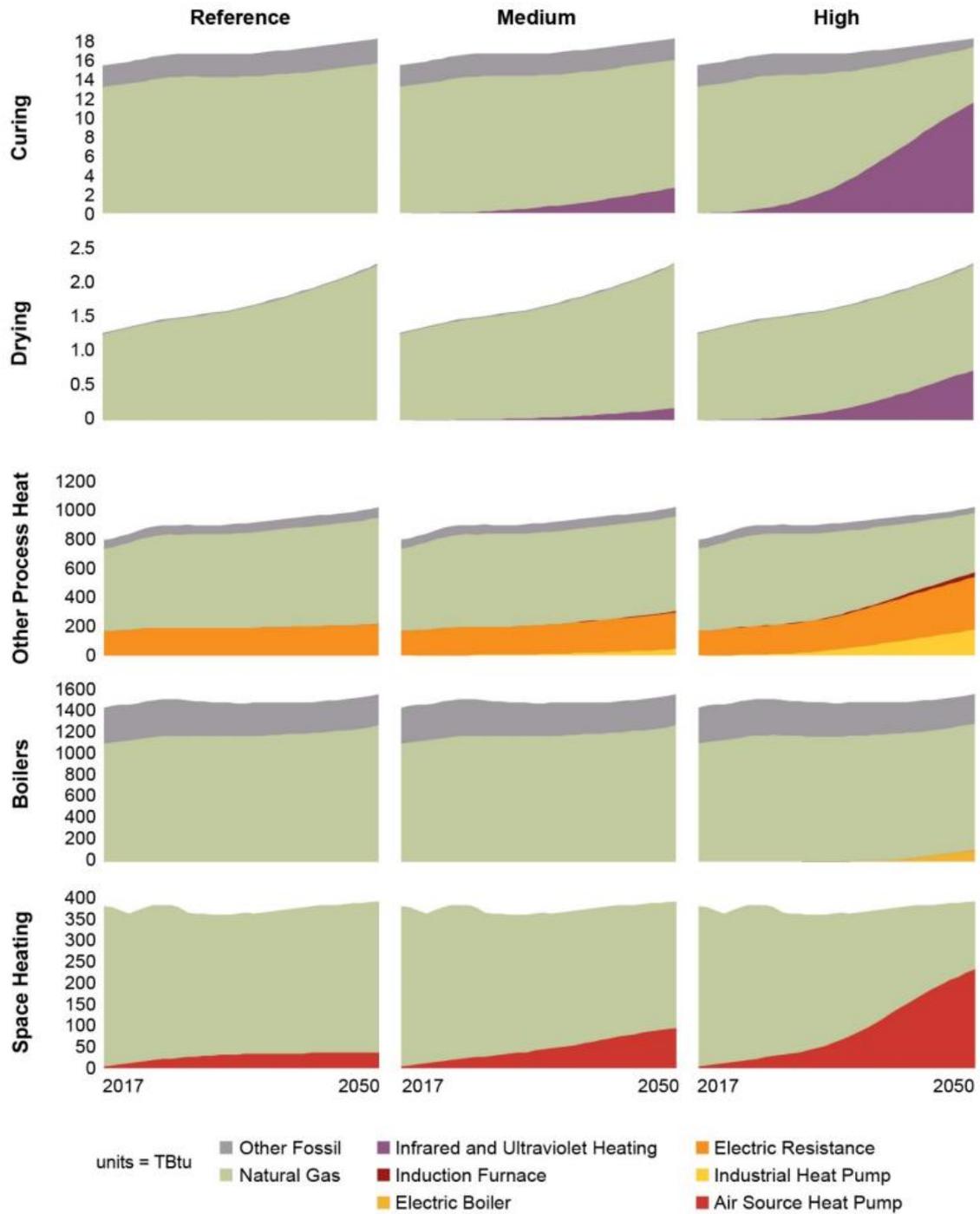
En otros procesos industriales en los que se utiliza calor, la adopción de bombas de calor industriales y hornos de inducción, junto a la creciente penetración de tecnologías basadas en resistencias incrementaría la cuota de consumo eléctrico en los procesos de calor hasta el 30 % y el 56 % en los escenarios “medio” y “alto”.

- **Schüwer y Schneider (2018)** analizan el potencial técnico ligado a la electrificación de procesos diversos en sectores como los sectores del hierro, acero, otros metales no férreos, siderurgia, refino, química de base, vidrio, cemento o papel en Alemania. Los sectores analizados suponían el 36% de la demanda total de electricidad en el sector manufacturero (84 TWh, en total) y el 60% del consumo industrial de combustibles y calor (239 TWh, en total).

En particular, analizan el potencial de penetración de diversas tecnologías de conversión *power-to-heat* (PtH), incluyendo:

- (a) procesos eléctricos que convierten la electricidad directa o indirectamente en calor como principal fuente de alimentación de un proceso,
  - (b) procesos en los que la electricidad se utiliza como fuente de energía complementaria para elevar la temperatura en un proceso que utiliza calor residual o calor ambiental, a través de bombas de calor o de compresores eléctricos que elevan la temperatura del vapor utilizado en un proceso, por ejemplo.
- **Bühler et al. (2019)** estiman un potencial de ahorro de un tercio del uso final de energía en la industria manufacturera danesa, ligado a la integración de bombas de calor en procesos que utilizan calor.

**Gráfico 11. Escenarios de electrificación en el sector industrial en EE. UU. según el proceso y el tipo de tecnología**

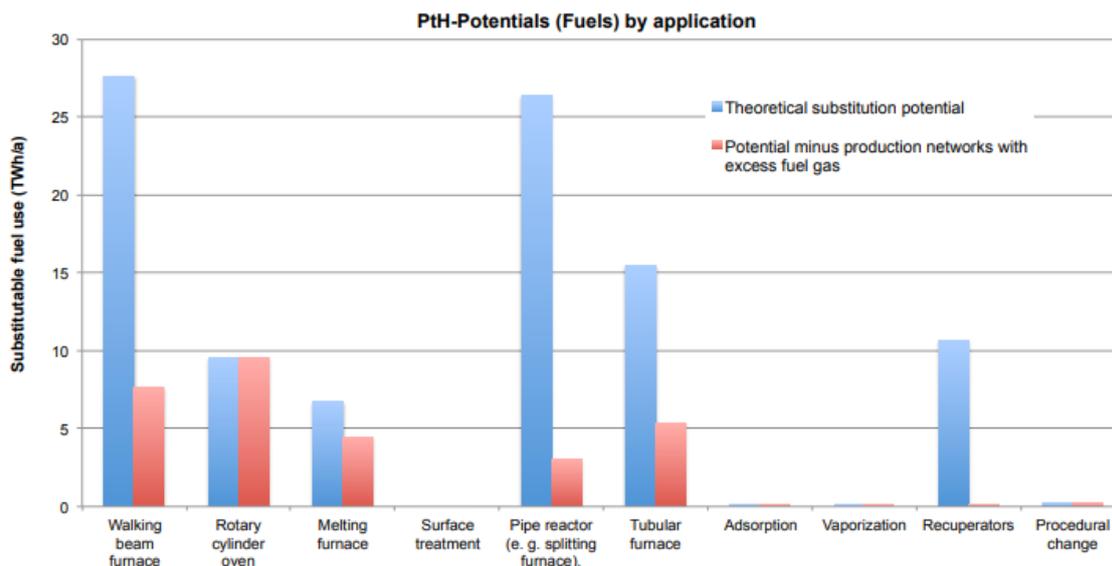


Fuente: Mai et al. (2018).

El Gráfico 12 muestra el potencial de sustitución de combustibles en distintas aplicaciones industriales. En algunos casos en los que se generan subproductos gaseosos (p. ej., en hornos de viga móvil, de separación o tubulares en refinerías, acerías integradas o en industrias

químicas), el potencial técnico de sustitución es significativamente menor una vez se tiene en cuenta el exceso de combustible.

**Gráfico 12. Potencial técnico de tecnologías *power-to-heat* para la sustitución de equipamientos industriales**



Fuente: Schüwer y Schneider (2018).

La aplicación de nuevas tecnologías en los distintos sectores podría electrificar un porcentaje significativo del uso de combustibles y de la demanda de calor (hasta un 36% en el estudio). Los autores concluyen sin embargo que, mientras la generación de vapor mediante electricidad se lleva a cabo mediante tecnologías más o menos maduras y aplicables en distintos sectores con ganancias significativas en términos de reducción de emisiones en el largo plazo (un 13% de las emisiones en el sector manufacturero alemán), la factibilidad de la sustitución de calor en procesos de alta temperatura basados en combustibles fósiles (especialmente, en hornos) depende de desarrollos tecnológicos aún en fase de demostración y, probablemente, de la combinación de procesos híbridos (con dos fuentes de suministro de calor) o paralelos (con dos sistemas independientes).

### Hidrógeno

El hidrógeno se utiliza en la actualidad (en su versión gris<sup>26</sup>) en diversas aplicaciones en el sector industrial. Por ejemplo, puede utilizarse para la producción de metanol, amoníaco y fertilizantes, en la industria del refino, en la producción de diversos tipos de plásticos y pinturas, en purificación de cristales, en la hidrogenación de grasas y aceites, la producción

<sup>26</sup> El hidrógeno gris se genera a partir del metano y en su producción se genera CO<sub>2</sub>: (CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O → CO + 3H<sub>2</sub> y 2CO → C + CO<sub>2</sub>).

de ácido hidroclicóricu, la reducción de minerales de hierro y otros metales, en la industria farmacéutica y en los procesos de enfriamiento de plantas de generación de energía eléctrica, etc. En estado líquido se utiliza también en aplicaciones criogénicas y en la fabricación de materiales semiconductores.

Además, puede utilizarse en aplicaciones “*power to power*” o “*power to gas*”. En el primer caso, el hidrógeno puede alimentar celdas de combustible para generar energía eléctrica en diversas aplicaciones en empresas industriales, tanto para movilidad (montacargas, plataformas elevadoras, carretillas...) como en otros usos estacionarios, como generadores de energía eléctrica de emergencia, estaciones UPS (*uninterruptible power supply*), etc. También pueden alimentar motores o microturbinas que no generan emisiones de CO<sub>2</sub>.

En el segundo caso, puede generarse metano mediante procesos de metanización (combinando hidrógeno y CO<sub>2</sub>) para su uso en diversas industrias (textil, plástico, fertilizantes, papel y cartón, alimentos procesados, refino, vidrio, etc.), como combustible para procesos de secado, deshumidificación, fundición, etc., o bien para su inyección en las redes de transporte de gas natural.

El hidrógeno puede abrir la puerta a la descarbonización de algunos usos de la energía en diversos sectores industriales. Se podrían reducir las emisiones de GEI ligadas al consumo de energía en la industria a través de dos formas de utilización del hidrógeno: (1) sustituyendo el hidrógeno gris por hidrógeno verde o azul<sup>27</sup>; (2) sustituyendo el consumo de gas natural por hidrógeno verde o azul en procesos con utilización de calor con temperaturas elevadas.

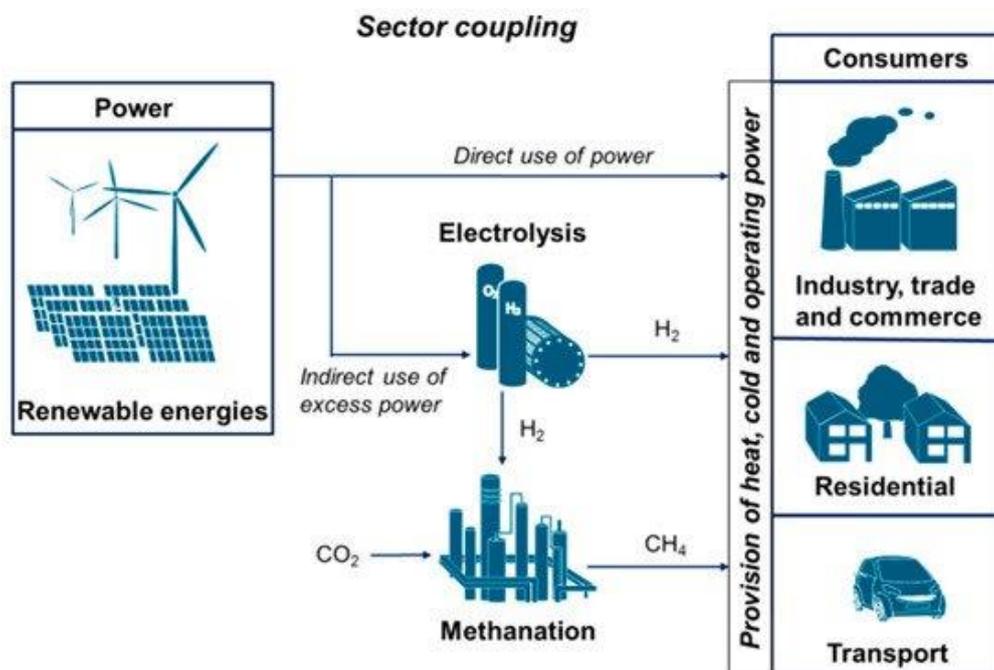
El potencial de reducción de emisiones ligado a la utilización de hidrógeno en combinación con energía renovable y tecnologías maduras es muy elevado. Por ejemplo, Otto et al. (2017) estimaron que la integración de energías renovables y de hidrógeno (electrolizadores y plantas de metanización -- Figura 7) con los procesos de consumo de electricidad y calor, junto con la aplicación de tecnologías como hornos de recirculación, captura de CO<sub>2</sub> y hornos de arco eléctrico y el uso de hidrógeno como agente reductor podría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria del aluminio en Alemania entre un 47 % y un 95 % (respecto de 1990) y el consumo de energía primaria entre un 27 % y un 95 % (respecto de 2008). Esto se conseguiría integrando entre 12 y 274 TWh de electricidad renovable.

En la CAPV, el hidrógeno está adquiriendo gran protagonismo como vector energético clave en la transición energética y en la descarbonización del sector industrial. El proyecto de desarrollo de un “Corredor Vasco del Hidrógeno”, anunciado por primera vez en el otoño de 2020, una apuesta estratégica público-privada en torno a actividades en las que confluyen intereses y capacidades del sector energético vasco y otras iniciativas empresariales (como Iberlyzer, impulsada por Iberdrola e Ingeteam) abren la puerta al desarrollo de una cadena de valor del hidrógeno en la CAPV y a su penetración a mayor escala en el ámbito industrial (Fernández et al., 2021).

---

<sup>27</sup> El hidrógeno verde se produce a través de la electrolisis de agua con energía 100% renovable. El hidrógeno azul es hidrógeno gris con captura y utilización o almacenamiento del CO<sub>2</sub> generado como subproducto.

**Figura 7. Ejemplo de integración energética utilizando tecnologías de hidrógeno**



Fuente: Otto et al. (2017).

### Almacenamiento de energía

El uso de tecnologías de almacenamiento de energía (en diversas formas) es otra vía para incrementar la eficiencia energética y reducir el coste de muchos procesos industriales.

#### Almacenamiento de energía eléctrica en baterías

El uso de baterías electroquímicas está muy extendido en múltiples industrias, con aplicaciones en movilidad y tracción, almacenamiento (estacionario) de energía y alimentación de pequeños dispositivos electrónicos. A día de hoy, son las baterías de plomo y ácido, con aplicaciones relacionadas con la movilidad y la tracción (carritos, elevadores, etc.), las más utilizadas (Fernández y Álvaro, 2019). Se espera que en los próximos años vayan sustituyéndose poco a poco muchas de estas baterías por baterías de ion-litio (frente a alternativas que generan problemas medioambientales, como las baterías basadas en níquel, cadmio, etc.). A más largo plazo, aparecen múltiples tecnologías alternativas prometedoras (baterías de flujo, supercondensadores híbridos, con electrolitos de sales fundidas o cerámicos, etc.), aún lejos de la fase de comercialización.

En aplicaciones de movilidad, cuanto más pesado es el vehículo menor es la aplicabilidad y viabilidad económica de las baterías como fuente de alimentación (p. ej., en vehículos pesados de transporte por carretera, barcos, aviones...), debido a su peso, a sus condicionantes operativos (tiempos de recarga, temperaturas de operación) y las infraestructuras necesarias. Pese a ello, se siguen investigando mejoras tecnológicas que permitan incrementar el rango

de potenciales usos de las baterías electroquímicas. En aviación, por ejemplo, las baterías electroquímicas (generalmente de níquel-cadmio o plomo y ácido, aunque comienzan a utilizar también ion-litio, con mayor densidad energética) ofrecen alternativas de alimentación de los sistemas de emergencia y de navegación durante situaciones de emergencia. En la industria aeroespacial se han utilizado históricamente baterías de níquel-cadmio que han sido poco a poco reemplazadas por otras tecnologías con mejor rendimiento, como las baterías de níquel-hidrógeno e, incluso, baterías de ion-litio (Miller et al., 2017).

Las baterías estacionarias permiten almacenar mayores cantidades de energía en sistemas de almacenamiento de energía que facilitan una gestión eficiente (por tanto, con menor coste) de los consumos energéticos en la industria. Al igual que en otros usos, las baterías estacionarias más comunes son de plomo y ácido, aunque en los últimos años ha aumentado significativamente el crecimiento de la tecnologías ion-litio en aplicaciones industriales debido a sus ventajas operativas (eficiencia, flexibilidad, tamaño y peso...) frente a las baterías de plomo y ácido (Lavoie et al., 2017). En general, las baterías ion-litio, a medida que van reduciéndose sus costes de inversión, ofrecen prestaciones y servicios muy interesantes en el ámbito industrial en áreas como la seguridad y calidad de suministro (reducción en el número de perturbaciones y mayor estabilidad, compensación de energía reactiva, etc.), la gestión de las puntas de demanda y la optimización del coste energético.

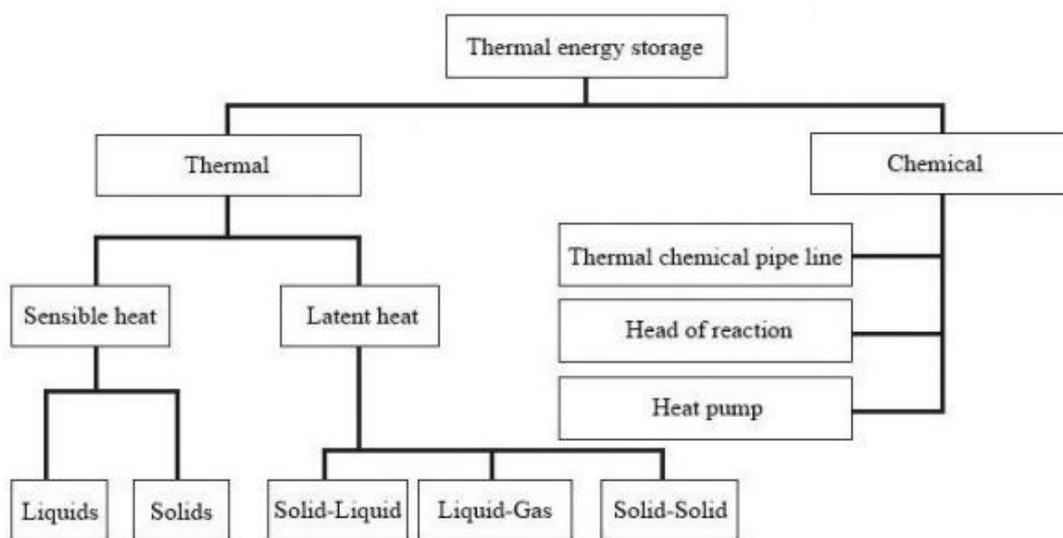
### **Almacenamiento de calor térmico**

Una vía adicional para mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales es incrementar el aprovechamiento de la energía térmica residual mediante su almacenamiento para un uso posterior.

Las soluciones aplicadas son muy variadas y dependen de la industria y del proceso productivo del que se trate y de la tecnología de almacenamiento del calor residual utilizada (IEA-ETSAP e IRENA, 2013) que, de forma general, puede dividirse en dos grupos: almacenamiento térmico y almacenamiento químico (Figura 8):

- Las tecnologías de **calor sensible** que utilizan agua permiten periodos de almacenamiento relativamente largos (desde días hasta meses), con un coste bajo y capacidad (densidad energética) relativamente pequeña.
- Por otro lado, las tecnologías basadas en **materiales de cambio de fase** (p. ej., hidratos o fluoruros) permiten almacenar más energía (hasta 100 veces la capacidad de las tecnologías basadas en calor sensible) durante periodos de tiempo más cortos (horas) que pueden alargarse hasta meses (Miró et al., 2016).
- Finalmente, las tecnologías basadas en **reacciones químicas** (p. ej., reacciones RedOx a partir de cobalto y níquel) consiguen almacenar grandes cantidades de energía, prácticamente sin pérdidas y permitiendo el transporte de los materiales (Interempresas, 2019).

**Figura 8. Tipos de almacenamiento térmico**



Fuente: Sarbu y Sebarchievici (2018).

Miró et al. (2016) analizan hasta 50 casos de estudio en distintas industrias y en diversos países, con tecnologías muy variadas. Los ejemplos analizados incluyen la reutilización del calor residual en el mismo lugar en el que se genera (*on-site*) y en localizaciones distintas (*off-site*)<sup>28</sup>. En el primer grupo se incluyen ejemplos de la industria manufacturera (industria del metal, otros materiales no metálicos, industria química, papel y procesado de alimentos) y otras industrias (generación de energía eléctrica, motores para vehículos, plantas de incineración y sistemas de aire comprimido y otras soluciones aplicadas en otras actividades industriales).

El sector de los metales básicos es aquel en el que se han desarrollado plantas de recuperación de calor residual (en fase piloto), probablemente debido a la elevada temperatura del mismo. La tecnología más empleada se basa en la utilización de agua para recuperar calor sensible y los principales usos del calor almacenado son la generación de energía eléctrica y la refrigeración de espacios. En el segundo grupo se incluyen proyectos (en fases de investigación muy preliminares) en distintas industrias, con distancias entre las fuentes del calor residual y los puntos de utilización y consumo entre 2 km y 50 km.

IEA-ECES (2018) también realiza una revisión de casos de estudio de aplicación de sistemas de almacenamiento térmico en plantas industriales en distintos sectores y en varios países de Europa<sup>29</sup>. Las tecnologías tradicionales se basan en la regeneración de calor (p. ej., en las

<sup>28</sup> La solución *off-site* más común es el desarrollo de redes de calor y frío centralizadas (*district heating and cooling*). Alternativamente, el calor residual puede almacenarse en materiales transportables, como el eritritol (un polialcohol) o las ceolitas (minerales porosos con silicatos de aluminio) (Miró et al., 2016).

<sup>29</sup> Además, revisa casos de estudio en sistemas de redes de calor y frío centralizadas (*district heating*), en edificios no residenciales y en el sector eléctrico.

industrias del acero y del vidrio) o en la acumulación de vapor. Las tecnologías más innovadoras de almacenamiento de calor (para procesos de alta temperatura) se basan en el almacenamiento de calor sensible en sólidos (con diversos materiales), líquidos (agua, aceites, soluciones salinas o betún) y sistemas de calor sensible híbridos que combinan las fases sólida y líquida. También se están desarrollando sistemas de almacenamiento basados en calor latente o reacciones termoquímicas.

A diferencia de las soluciones para *district heating*, edificios no residenciales y generación de energía eléctrica, no existen tecnologías estandarizadas para aplicaciones industriales como utilización de calor residual, almacenamiento flexible (*buffer*) o sistemas de apoyo (*back-up*). En general, las nuevas tecnologías deben resolver *trade-offs* entre variables como complejidad, densidad energética, pérdidas de almacenamiento y pérdidas en la transformación de energía (de Boer, 2016).

En la CAPV, centros tecnológicos como Tecnalía<sup>30</sup> y Tekniker<sup>31</sup> y, especialmente, el centro de investigación CIC energiGune<sup>32</sup> están trabajando en proyectos diversos que abren nuevas vías para almacenar energía térmica, desde el almacenamiento compacto de energía térmica (para soluciones de climatización en edificios o en combinación con bombas de calor) hasta almacenamiento de alta potencia de energía térmica (para soluciones de baja y media temperatura de respuesta rápida y capacidad elevada de carga y descarga) o ciclos termoquímicos para la producción de hidrógeno (electrolisis a partir de calor residual a temperatura inferior a 500 °C (Doppiu, s. f.).

### **Almacenamiento de hidrógeno**

El hidrógeno actúa también como vector de almacenamiento de energía que puede posteriormente utilizarse de diversas maneras en procesos industriales (en forma de hidrógeno o bien en forma de electricidad, mediante celdas de combustible, por ejemplo).

La Figura 9 resume las distintas vías de almacenamiento del hidrógeno, bien puro (en estado líquido, criogenizado o como gas comprimido) o bien incorporado en otros materiales (p. ej., hidruros metálicos o bien compuestos que incluyen amoníaco y otros elementos, como el borano de amoníaco o borazano) (Barthélémy, 2012; Barthélémy et al., 2017).

---

<sup>30</sup> Ver <https://www.tecnalia.com/servicios-de-laboratorio/ensayos-de-equipos-y-sistemas-termicos>.

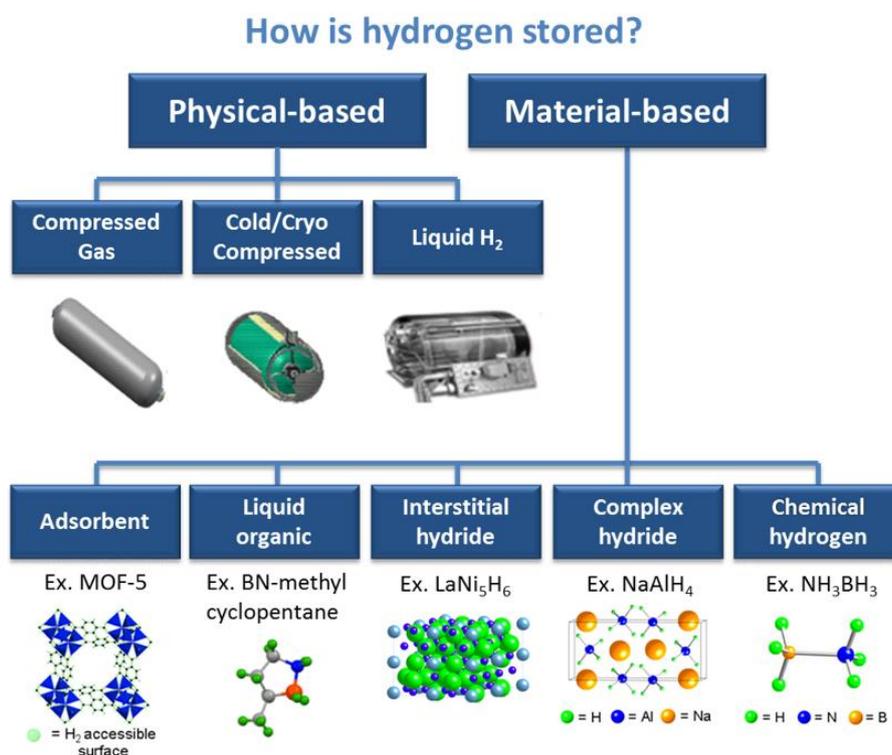
<sup>31</sup> Ver <https://www.tekniker.es/es/materiales-para-energia>.

<sup>32</sup> El CIC energiGune ha desarrollado prototipos de almacenamiento de calor residual en el ámbito de los proyectos H2020 ORC-Plus (en Ben Guerir, Marruecos, con capacidad de hasta 20 MWh, lecho compactado de roca mineral, aceite como fluido portador y mineral de roca como material de almacenamiento y una temperatura de operación de 300 °C) y Reslag (con ArcelorMittal en Sestao, Bizkaia, con una capacidad de hasta 1 MWh y utilizando escoria de acería, aire como fluido transportador, almacenamiento en residuos sólidos y una temperatura de operación de 600°C). Ver <https://www.youtube.com/watch?v=yTUAOKXbnFc&t=5s>.

### Autoconsumo eléctrico y microrredes

La inversión en instalaciones de generación de energía renovable distribuidas (p. ej., energía eólica o fotovoltaica *on site*) y el desarrollo de microrredes con sistemas híbridos de generación-almacenamiento son otras alternativas para acceder a un suministro energético con menor coste y con menores emisiones de GEI (Wood, 2017; Maloney, 2017).

**Figura 9. Formas de almacenamiento del hidrógeno**



Fuente: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.

Aunque no son, propiamente, alternativas que en sí reduzcan el consumo de energía necesariamente, los sistemas híbridos y las microrredes pueden generar mejoras en eficiencia energética a través de una gestión de la energía optimizada, en combinación con otros equipamientos de seguimiento y control de los consumos energéticos (Mohy-ud-din et al., 2020; Murty y Kumar, 2020). En cualquier caso, dan lugar a un impacto medioambiental positivo a través de la reducción de las emisiones, por lo que las empresas industriales deben tener en cuenta esta alternativa a la hora de analizar las opciones para reducir sus costes energéticos y su huella medioambiental.

Álvaro et al. (2018) y Álvaro y Menéndez (2020) revisan, respectivamente, experiencias internacionales para el desarrollo del autoconsumo y casos de microrredes en distintos países, analizando en ambos casos aspectos técnicos, administrativos y relacionados con modelos de gestión y modelos de negocio.

## Captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub>

Las tecnologías de captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub> (*carbon capture, utilisation and storage*, CCUS, en inglés) se basan en la captura de dióxido de carbono procedente de la combustión de combustibles o de procesos industriales, su transporte a través de tubos o buques y su utilización como materia prima en la producción de productos y servicios o su almacenamiento permanente en formaciones geológicas bajo la superficie terrestre<sup>33</sup>.

Las tecnologías CCUS están atrayendo cada vez más atención por parte de empresas industriales, reguladores y legisladores ante la creciente evidencia de que la penetración y el uso masivo de electricidad en consumos finales de energía no será suficiente para descarbonizar la economía (EIA, 2021a, 2021b) y que todos los escenarios con cero emisiones netas en el largo plazo implican un nivel mínimo de emisiones de gases de efecto invernadero que requerirán el uso de sumideros de carbono y la captura de emisiones (en los puntos de emisión o directamente en la atmósfera) y el almacenamiento y/o uso y transformación del CO<sub>2</sub> capturado.

Aunque este tipo de tecnologías no cambian, en principio, la eficiencia técnica de los procesos industriales y en el uso de la energía, sí puede considerarse que contribuyen a la eficiencia energética si se tienen en cuenta las consideraciones medioambientales (en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>): un mismo uso de la energía da lugar al mismo *output* y a menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

La AIE otorga un papel muy relevante a la captura de CO<sub>2</sub> en los escenarios de cero emisiones a largo plazo (Figura 10). Así, en el Escenario de Desarrollo Sostenible<sup>34</sup>, la AIE estima que en 2030 se capturarán 850 millones de toneladas de CO<sub>2</sub><sup>35</sup> en todo el planeta mediante CCUS, un volumen más de 21 veces superior a las 40 millones de toneladas capturadas en 2020<sup>36</sup>. En un escenario alineado con un incremento de 1,5 °C de la temperatura media del planeta y cero emisiones netas en 2050 (escenario NZE2050), la AIE estima que se tendrían que capturar hasta 1.150 millones de toneladas en 2030 (casi 29 veces la cantidad capturada en 2020).

En la actualidad existen unas 20 instalaciones en operación en el mundo que capturan CO<sub>2</sub>, dos de las cuales son instalaciones de generación de electricidad. En los próximos años están anunciadas hasta 30 nuevos proyectos.

---

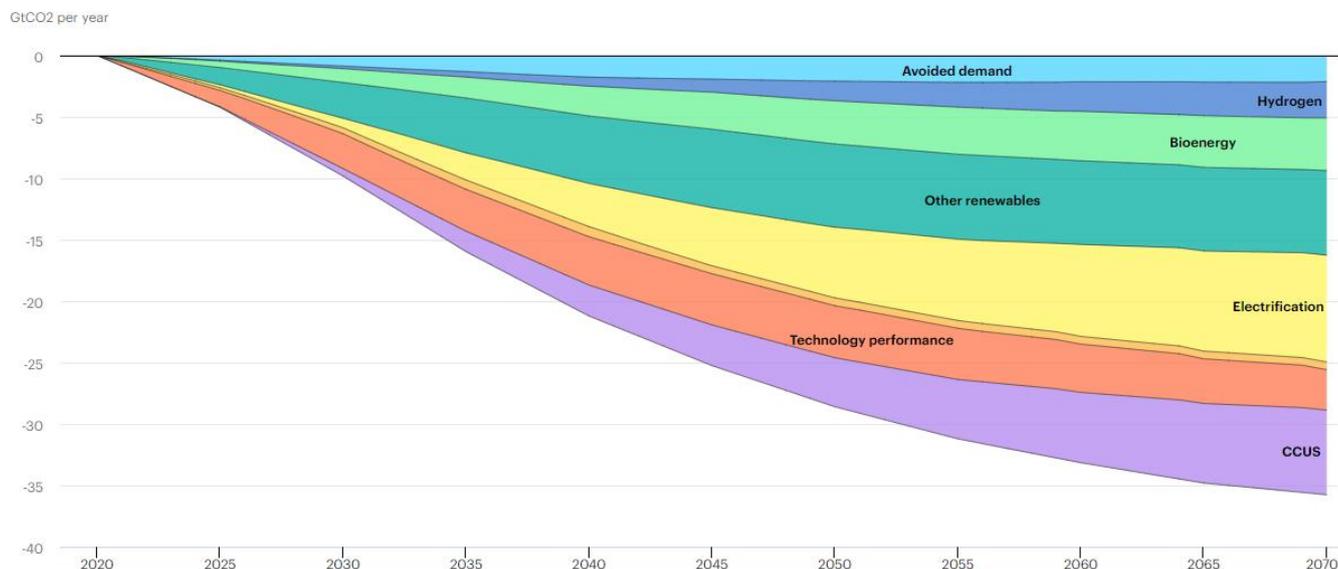
<sup>33</sup> <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>.

<sup>34</sup> Este escenario implica cero emisiones netas en 2070.

<sup>35</sup> <https://www.iea.org/articles/world-energy-outlook-2020-frequently-asked-questions>. Un tercio del volumen total se capturaría en el sector eléctrico y dos tercios de la reducción tendría lugar en los sectores de transformación y en la industria.

<sup>36</sup> <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>.

**Figura 10. Fuentes de reducción de las emisiones de CO2 en el Escenario de Desarrollo Sostenible de la AIE (respecto del Escenario de Políticas Actuales)**



Fuente: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-for-net-zero-emissions#abstract>

Varios informes recientes de la AIE estudian en profundidad las perspectivas de desarrollo de la tecnología CCUS y el papel que jugará en el futuro (EIA, 2020g, 2020h, 2021a, 2021b).

Los principales mensajes que pueden extraerse de estos trabajos son los siguientes:

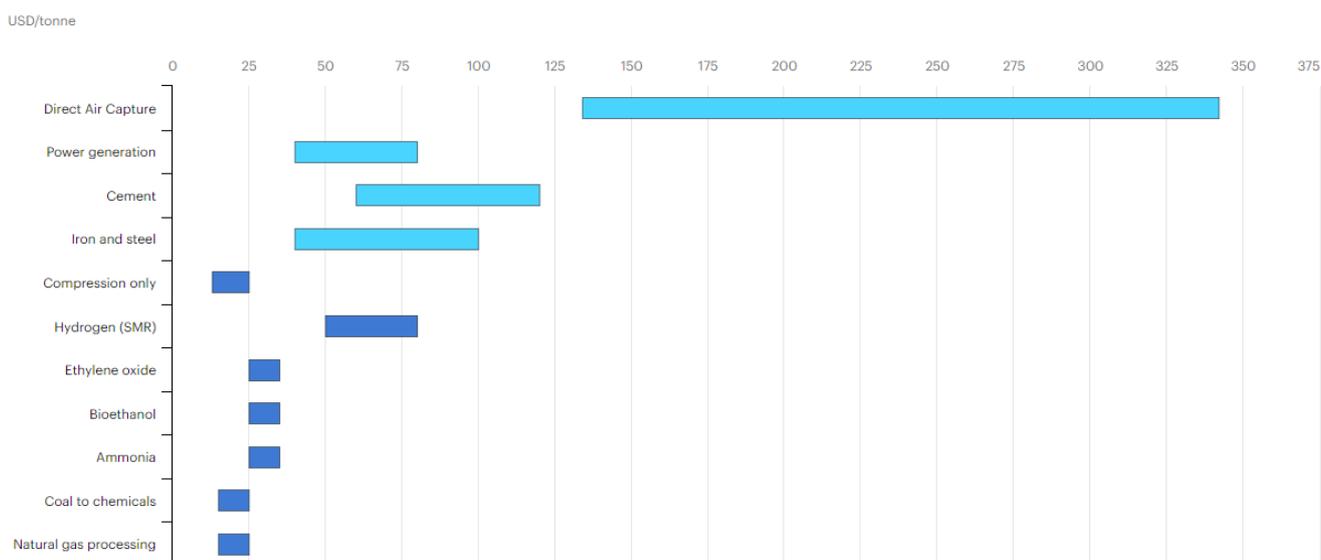
1. La electrificación masiva de usos finales de la energía no permitirá, por sí sola, descarbonizar la economía. Los escenarios de descarbonización a largo plazo sugieren que la electricidad, el hidrógeno, los combustibles sintéticos y la bioenergía sumarán una cuota de cobertura de la demanda similar a la que tienen hoy los combustibles fósiles.
2. Las tecnologías CCUS jugarán un papel importante en la consecución de una economía con cero emisiones netas. En el corto plazo, la vía más factible y rentable en términos de emisiones consistirá en integrar soluciones CCUS en instalaciones de generación de energía e industriales que utilicen combustibles fósiles<sup>37</sup> y en instalaciones de producción de hidrógeno "azul" (i. e., hidrógeno "gris", producido a través del reformado de metano al vapor, con captura del CO<sub>2</sub>) para acelerar la

<sup>37</sup> El desarrollo de soluciones CCUS puede ofrecer una alternativa comercial a los tenedores de activos sin amortizar. En China, por ejemplo, la edad media de las centrales de carbón es de únicamente 12 años.

descarbonización de los sectores intensivos en emisiones<sup>38</sup> y favorecer la penetración del hidrógeno en la matriz energética en el medio plazo.

3. A medio y largo plazo, las tecnologías CCUS apoyarán el despliegue de biocombustibles y la captura directa de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Esto permitirá descarbonizar sectores como el del transporte aéreo.
4. La captura directa de CO<sub>2</sub> de la atmósfera es una de las vías para acelerar el proceso de descarbonización (i. e., transitar del Escenario de Desarrollo Sostenible, con cero emisiones netas en 2070, al Escenario de Cero Emisiones Netas en 2050, consistente con un incremento medio de la temperatura del planeta de 1,5 °C).
5. A partir del conocimiento existente sobre CCUS (en sectores como el del procesado de gas natural o la producción de fertilizantes), el gran reto es continuar reduciendo los costes de esta tecnología (Figura 11)<sup>39</sup> (fundamentalmente a través de la minimización de las distancias de transporte del CO<sub>2</sub> y de nuevas tecnologías de captura que se adapten a procesos e industrias específicos).

**Figura 11. Coste total anualizado de captura de CO<sub>2</sub> por sector (2019)**



Fuente: IEA (2021b).

<sup>38</sup> En la industria intensiva en emisiones, las tecnologías CCUS son bien la opción de reducción de emisiones a la atmósfera más barata (p. ej., industrias del hierro y el acero y producción de amoníaco o metanol) o bien la única opción (p. ej., en el caso de la industrial del cemento).

<sup>39</sup> En algunos casos, el coste de captura del CO<sub>2</sub> se sitúa ya por debajo del precio de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub> en el mercado europeo (RCDE-UE).

6. La integración de soluciones CCUS en instalaciones de generación de energía eléctrica como ciclos combinados de gas natural puede contribuir a acelerar la penetración de energías renovables en el corto y medio plazo, al ofrecer una fuente alternativa de flexibilidad sin emisiones a la atmósfera que puede complementar los desarrollos en la gestión de la demanda y de las baterías eléctricas.
7. En combinación con la bioenergía, la tecnología CCUS puede facilitar el desarrollo de instalaciones con emisiones negativas<sup>40</sup>, que contribuyan no solo a la descarbonización de los sectores con mayor dificultad para eliminar las emisiones, sino también a los objetivos globales.
8. Las políticas más prometedoras para fomentar la adopción de tecnologías de CCUS pasan por, además de desarrollar esquemas de incentivos a las inversiones y de fomento de la I+D para continuar reduciendo costes, potenciar la creación de *hubs* industriales de CO<sub>2</sub> en los que puedan materializarse economías de escala y alcance a través de infraestructuras compartidas.

## 3.2. Impacto de las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial

Los impactos derivados de inversiones en eficiencia energética en el sector industrial pueden dividirse en impactos energéticos y medioambientales, impactos macroeconómicos, impactos microeconómicos y otros efectos adicionales.

### 3.2.1. Impactos energéticos y medioambientales

Las inversiones en eficiencia energética dan lugar a ahorros en el consumo de energía (asumiendo niveles de producción constantes) y a menores emisiones de gases de efecto invernadero. Estas ganancias energéticas y medioambientales dependen de los procesos productivos (i. e., del sector industrial) y del nivel de eficiencia en el que se encuentre cada empresa<sup>41</sup>.

Cambridge Econometrics (2015a, 2015b) realizó un ejercicio de simulación del ahorro energético ligado a inversiones en eficiencia energética en todos los países de la UE en el horizonte 2030 que utilizaba como input estimaciones del potencial de ahorro energético de distintas tecnologías y en distintos sectores. De acuerdo con estas estimaciones, el potencial de ahorro energético en el sector industrial en Europa en un horizonte de 20 años era de un 10,4 % (3,3 % proveniente de la generación de calor, 5,1 % de los motores y la iluminación y

---

<sup>40</sup> La idea de conseguir "emisiones negativas" (es decir, una eliminación de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera) a través de procesos industriales fue presentada y desarrollada por primera vez por Obersteiner et al. (2001). En este artículo, los autores indicaban que "...*biomass energy can be used both to produce carbon neutral energy carriers, e.g., electricity and hydrogen, and at the same time offer a permanent CO<sub>2</sub> sink by capturing carbon from the biomass at the conversion facility and permanently storing it in geological formations...*".

<sup>41</sup> Las inversiones tendrán en general una menor rentabilidad en términos de ahorros adicionales de energía por unidad de inversión cuanto mayor sea el nivel de eficiencia de partida de los procesos de producción.

un 2,0 % de las tecnologías utilizadas en los distintos procesos). Entre los sectores concretos, destacaban el del papel y la impresión (20,6 %), el de ingeniería (11,1 %) y el de alimentación, bebidas y tabaco (10,9 %). Para los sectores de metales no férreos, químico y hierro y acero se estimaban ganancias potenciales de energía entre el 8,6 % y el 9,2 %. Estas estimaciones se encuentran por debajo del potencial técnico estimado por ICF Consulting (2015) y que situaba la ganancia potencial de eficiencia energética en el horizonte 2030 entre el 19 % y el 27 % en distintas industrias en Europa (ver la Tabla 4).

En términos de intensidad energética (consumo de energía/PIB), Cambridge Econometrics (2015a, 2015b) estimaba un ahorro energético potencial del conjunto de la industria europea de 1,2 tep/M€, situándose Francia (0,7), Reino Unido (0,7), Alemania (1,0) e Italia (1,0) por debajo de la media y España por encima de la media (1,4 tep/M€).

Estas estimaciones están en línea con otros estudios recientes que analizan el impacto en términos de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> atribuibles a inversiones en eficiencia energética. Debido a la variedad en los procesos productivos, no existen, como se ha descrito anteriormente, soluciones tecnológicas estándares para la industria y las implicaciones de cambios en (o instalación de) equipamientos como calderas, compresores, intercambiadores de calor, etc., deben analizarse en cada caso concreto.

Para el caso de sectores industriales con productos homogéneos (metales básicos, cemento, papel y cartón, etc.), generalmente más intensivos en energía, diversos estudios analizan, desde una perspectiva *bottom-up* el impacto de distintos equipamientos y tecnologías sobre los resultados energéticos y medioambientales de las empresas.

Worrell et al. (2010) ofrecen una guía del impacto sobre el consumo de energía y agua y las emisiones de CO<sub>2</sub> de distintas tecnologías, equipamientos y soluciones de operación y gestión en la industria de hierro y acero en EE.UU. (hornos, bombas, calderas, motores, sistemas de gestión de energía, sistemas de monitorización, control y optimización de procesos, etc.). Brunke y Blesl (2014) analizan el impacto de más de 30 actuaciones de eficiencia energética coste-eficientes en la industria del acero en Alemania y estiman para el periodo 2013-2035 un ahorro potencial de 11,7 % en combustibles, 2,2 % en consumo de electricidad y 12,2 % en emisiones de CO<sub>2</sub>. Morrow et al. (2014) analizaron las industrias del cemento y del acero en India y estimaron ahorros potenciales acumulados en 2010-2030 de 83 TWh y 66 TWh de consumo eléctrico (frente a consumos de 14,7 TWh en 2010 y de 75,6 TWh en 2006, respectivamente) con una reducción asociada de emisiones de CO<sub>2</sub> de 82 MtCO<sub>2</sub> y 65 MtCO<sub>2</sub>, respectivamente. Las reducciones en el consumo de combustibles y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a estos eran también significativas. Zuberi et al. (2017) estiman, para la industria del cemento suiza, un potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de 14 % y 13 % respectivamente en relación con los niveles de consumo y emisiones de 2014. Los costes de inversión totales se situarían en unos 115 M\$. Bhadbhade et al. (2019) analizaron el sector del metal en Suiza y estimaron un potencial de ahorro energético con la tecnología disponible y coste-eficiente entre el 11 % y el 15 %, con una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en torno al 6 %.

En otros sectores no homogéneos hay una menor disponibilidad de estudios detallados *bottom-up*. Meyers et al. (2016) estiman un ahorro energético de hasta un 45 % y una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta un 30 % en la industria de alimentación y bebidas, analizando pymes en 6 países europeos, mediante la implementación de medidas para optimizar procesos y la recuperación de calor residual y el uso de energía solar térmica y cogeneración. Compton et al. (2018) analizan distintas medidas para reducir el consumo de energía y agua en la industria del procesado de alimentos en la región Pacific Northwest en EE.UU. Bhadbhade y Patel (2020) estiman un ahorro energético potencial en el sector de alimentación y bebidas en Suiza entre el 14 % y el 16 % (utilizando tecnologías coste-eficientes) y una correspondiente reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> entre el 18 % y el 21 %.

En resumen, la evidencia empírica disponible sugiere que el ahorro energético y en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> ligado a inversiones en eficiencia energética coste-eficientes puede situarse por encima del 10 % en la mayor parte de los sectores industriales, alcanzando en algunos casos resultados muy por encima de esa referencia. Las actuaciones concretas, sin embargo, dependen de cada proceso productivo y no son exportables de una industria a otra.

### 3.2.2. Impactos macroeconómicos

Las inversiones en eficiencia energética también tienen impacto sobre la actividad económica. Los efectos macroeconómicos de estas inversiones se manifiestan en forma de impacto sobre variables como el PIB, el empleo, la recaudación fiscal, etc. Sin embargo, la mayor parte de los estudios empíricos disponibles estiman el impacto de ganancias de eficiencia energética en el conjunto de la economía, sin centrarse en las inversiones realizadas en el sector industrial.

Cambridge Econometrics (2015a, 2015b) estimó un impacto esperado positivo de distintos escenarios de avances en eficiencia energética en el conjunto de la economía<sup>42</sup> sobre el PIB y el empleo de los países UE-28 en el horizonte 2030.

Las estimaciones de los efectos sobre el PIB varían en función del escenario, con impactos entre -0,2 % y +1,3 % en los escenarios con menores avances en eficiencia energética y un rango entre -1,2 % y +4,4 % en el escenario con mayor incremento de la eficiencia energética (40 % en 2030 respecto de la referencia utilizada). Estos resultados están en línea con otras estimaciones en la literatura académica revisadas en el Anexo D del trabajo (Cambridge Econometrics, 2015b) y que sitúan el impacto positivo sobre el PIB entre 0,3 % y 1,3 %. La variabilidad de los resultados obtenidos está relacionada con la incertidumbre sobre el efecto *crowding-out* de las inversiones en eficiencia energética (i. e., hasta qué punto detraerían inversiones en otros sectores y actividades) y con la capacidad de las economías de implementar cambios que den lugar a reducciones significativas en el consumo de energía en

---

<sup>42</sup> En concreto, analizan 6 escenarios en los que se reduce el consumo de energía primaria en 2030 en 25 %, 28 %, 30 %, 32 %, 35 % y 40 %, respectivamente, respecto de una referencia marcada por las proyecciones del modelo PRIMES para el año 2007 ([https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/analysis/models/docs/primes\\_model\\_2013-2014\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/analysis/models/docs/primes_model_2013-2014_en.pdf)).

los escenarios más ambiciosos. Por otro lado, debe tenerse en cuenta también el “efecto rebote” de las inversiones en eficiencia energética, que podría situarse en valores hasta un 50% de la reducción en el consumo de energía.

El efecto neto sobre el empleo es también positivo. En el escenario en el que se alcance una reducción del consumo de energía primaria del 30 % en 2030, las estimaciones de Cambridge Econometrics sugieren incrementos en la tasa de empleo entre el 0,3 % (0,7 millones de empleos) y el 1,9 % (4,2 millones de empleos).

En línea con estos resultados, Comisión Europea (2016) estima un efecto en 2030 de diversos escenarios que implican una mayor eficiencia energética de hasta un 0,6 % del PIB y del 0,25 % de la tasa de empleo. Además, sugiere un efecto positivo (aunque relativamente pequeño) sobre la recaudación fiscal.

Un efecto que puede reducir el impacto positivo de una mayor eficiencia energética sobre el empleo está asociado con las ganancias de productividad, la transformación digital y la mayor automatización en los procesos industriales. En general, la transformación de los procesos industriales en procesos más eficientes y “verdes” podría generar empleo en el corto plazo y dar lugar a menores tasas de empleo en el medio y largo plazo, con requerimientos de mayores capacidades y nivel especialización en los puestos de trabajo (OECD, 2012).

Algunos estudios más recientes intentan estimar el impacto sobre el empleo de inversiones verdes. Garrett-Peltier (2017) por ejemplo, utiliza tablas input-output para estimar multiplicadores de empleo de inversiones en EE.UU. (en el conjunto de la economía) en eficiencia energética (7,72 empleos a tiempo completo equivalentes por cada millón invertido) y energías renovables (7,49 empleos/M\$ invertido), que superan al estimado para las inversiones en combustibles fósiles (2,65 empleos/M\$).

Ungar et al. (2020) analizan el impacto de diversos programas de eficiencia energética en EE.UU. en los sectores residencial, del transporte, industrial<sup>43</sup> y otros programas transversales sobre variables como el número de nuevos empleos, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas o los costes energéticos. Los 83.500 M\$ previstos en el conjunto de programas de eficiencia energética darían lugar a lo largo del periodo 2020-2030 a un total de 1.333.000 empleos-año (660.000 en el periodo 2020-2023), 906 millones de t/CO<sub>2</sub> evitadas y a un ahorro en la factura energética de 123.300 M\$. Los multiplicadores de las inversiones previstas en el sector industrial (1.100 M\$ en el periodo 2020-2030) son significativamente más elevados que en el resto del sectores (alcanzándose 66.000 empleos totales -43.000 en 2020-2023--, 186 MtCO<sub>2</sub> de emisiones evitadas y un ahorro en la factura de 13.500 M\$), sugiriendo que las inversiones en eficiencia energética en la industria son especialmente rentables en términos económicos (número de empleos creados por unidad de recursos invertidos) y medioambientales (emisiones evitadas y ahorro energético).

---

<sup>43</sup> En particular, los programas centrados en la industria se refieren a auditorías energéticas en grandes instalaciones, contratación de gestores de energía, préstamos para pymes e inversiones para mejorar la flexibilidad y resiliencia de las cadenas de suministro.

### 3.2.3. Impactos microeconómicos

En el plano microeconómico, el efecto más directo de inversiones de las empresas industriales en eficiencia energética es el aumento de su productividad y, por tanto, su competitividad. Esto puede deberse a un incremento en la escala de las operaciones o a un incremento de la eficiencia técnica asociada a un mejor uso de los recursos. Al igual que en los casos anteriores, no existen demasiados estudios que analicen el impacto microeconómico de inversiones en eficiencia energética en la industria.

Worrell et al. (2003) analizaron el impacto de medidas de eficiencia energética a través de 77 casos de empresas en distintos sectores (manufactura de alimentos, materiales de construcción, acero, papel, químico y textil) en varios países de la OCDE. Su análisis concluye que las inversiones en eficiencia energética pueden incrementar la productividad de las empresas de forma significativa a través de distintas vías (adicionales a un mejor rendimiento productivo y medioambiental) relacionadas con los procesos internos de operación y mantenimiento, la generación de residuos, etc., y muchos otros beneficios no energéticos (ver la Tabla 3).

Filippini et al. (2020) llevan a cabo un análisis del impacto de un programa de eficiencia energética en China sobre la productividad de las empresas en el sector del hierro y el acero. El programa, "Top 1000 Firms Energy Conservation Program", estableció obligaciones en materia de eficiencia energética a las empresas industriales con el objetivo de alcanzar determinados niveles de ganancias de eficiencia energética en el periodo 2006-2011 (Cao et al., 2009; Zhang et al., 2011). El análisis realizado indica que la tasa de crecimiento anual media en la productividad total de los factores de estas empresas se situó en un 3,1 % en ese periodo, con periodos de recuperación de las inversiones inferiores a un año para la empresa media y que la eficiencia técnica y la asociada a la escala de las operaciones contribuyeron de igual manera a las ganancias de productividad observadas.

### 3.2.4. Otros impactos

#### *Beneficios ligados al bienestar del personal trabajador*

Además de los efectos revisados en los apartados precedentes, existen otros impactos positivos asociados a las inversiones en la eficiencia energética en la industria.

El trabajo citado anteriormente de Worrell et al. (2003) por ejemplo, identifica distintas fuentes de beneficios no energéticos ligados a las inversiones en eficiencia energética. Algunos de ellos ya han sido tratados en apartados anteriores (los que tienen que ver con ganancias de productividad o reducción de costes, por ejemplo) (Tabla 3). Otros efectos positivos adicionales están relacionados con el ambiente y las condiciones en los lugares de trabajo (iluminación, niveles de ruido, control de temperatura, calidad del aire...) o con otros factores reputacionales, de seguridad laboral, relacionados con el bienestar de los trabajadores, etc. Algunos de estos efectos, como una mayor calidad del aire o una mejor climatización de los

espacios de trabajo, puede a su vez dar lugar a incrementos en la salud de los trabajadores y a una mayor productividad.

### *Efectos derivados de la digitalización*

IEA (2019) revisa otros impactos relacionados con transformaciones en marcha, como la llamada “transición digital”, que incrementan la eficiencia operativa y energética de las empresas y, por tanto, generan, de manera indirecta, beneficios como los comentados en secciones precedentes, incluyendo una mayor eficiencia en el uso de los recursos, menores costes operativos y mejoras en la salud y en la seguridad laboral.

El impacto en cada sector industrial depende de múltiples factores, incluyendo las tecnologías utilizadas (sistemas de recolección, gestión y tratamiento de datos, sistemas de control y automatización, *digital twins*, *blockchain*, etc.), aunque se estima que las ganancias en términos de ahorro de costes energéticos podrían alcanzar el 30 % de la factura energética en muchos casos. La utilización de inteligencia artificial podría dar lugar a una reducción de los costes energéticos del 10 %, mientras que las soluciones digitalizadas de gestión de la energía podrían dar lugar a reducciones adicionales entre el 10 % y el 30% de los costes energéticos (IEA, 2019a).

Las nuevas tecnologías digitales abren también la puerta a nuevos servicios (como la “refrigeración como servicio” o “*cooling as a service (CaaS)*”)<sup>44</sup> que pueden facilitar las inversiones en eficiencia energética, a través de la servitización de activos y modelos de pago por uso de servicios de eficiencia energética (como la refrigeración) a terceras partes que se encargan de realizar las inversiones (BASE, 2019).

### 3.2.5. Resumen

La Tabla 8 en la siguiente página resume los principales resultados cuantitativos comentados en esta sección.

### 3.3. El efecto rebote

Una de las consecuencias del incremento en la eficiencia energética es que la liberación de recursos que supone (energéticos, financieros, en términos de mano de obra, etc.) puede dar lugar a un incremento en la actividad económica que implique un mayor consumo de energía que compense, parcialmente, las ganancias iniciales. Esto se conoce como “efecto rebote” (Greening et al., 2000).

---

<sup>44</sup> Ver algunos ejemplos de estas innovadoras propuestas en <https://www.caas-initiative.org/case-studies>.

**Tabla 8. Impacto de las inversiones en eficiencia energética en la industria\***

<b>Impacto medioambiental</b>	
Ahorro en el consumo de energía	10 % - 20 %
Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	10 % - 20 %
<b>Impacto macroeconómico</b>	
PIB	-1,2 % -4,4 % (horizonte de 10 años)
Empleo	0,3 % - 1,3 % (horizonte de 10 años)
<b>Impacto microeconómico</b>	
Incremento de la productividad (PTF**)	3 %
<b>Otros impactos</b>	
Reducción del coste energético (uso de IA)	10 %
Reducción del coste energético (digitalización)	10 % - 30 %

*Fuente: estudios citados en esta sección. \* los rangos de impacto que se muestran son orientativos y resumen los principales resultados revisados en este trabajo; los valores concretos para cada inversión dependen del sector y la actividad, la empresa, la solución tecnológica empleada, el coste de la energía, etc. \*\* PTF= productividad total de los factores.*

El efecto rebote puede ser directo o indirecto. El efecto directo se refiere al incremento en el consumo de energía en la misma actividad o en los mismos procesos productivos, por sustitución de activos e infraestructuras o por un aumento de la producción. El efecto rebote indirecto está asociado al efecto renta que implica el menor coste de los bienes y servicios derivado de la mayor eficiencia energética y que da lugar a un mayor consumo de otros bienes y servicios<sup>45</sup>. Linares y Labandeira (2010) añaden un efecto adicional (macroeconómico) ligado a los cambios en los precios relativos de los insumos, que inducen cambios en la demanda de los mismos y en la demanda de energía.

La literatura académica ha estudiado desde hace muchos años hasta qué punto las inversiones en eficiencia energética dan o no lugar a un efecto rebote significativo en distintos sectores económicos.

Esta es una cuestión de gran relevancia desde el punto de vista del diseño de políticas relacionadas con la eficiencia energética y con el medio ambiente, no solo para poder valorar adecuadamente la rentabilidad de las inversiones, sino también para evaluar la efectividad de las políticas orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pues estas están relacionadas en gran medida con el consumo de energía. En general, las políticas óptimas serán aquellas que consigan los mejores resultados teniendo en cuenta la ganancia total de eficiencia energética (y de bienestar social) y todos los costes, incluyendo los costes de inversión y los asociados a los efectos rebote indirectos, y los costes medioambientales (p. ej., en términos de emisiones de gases de efecto invernadero).

<sup>45</sup> Por ejemplo, en el caso de un hogar, el efecto rebote indirecto asociado a la inversión en sistemas de climatización más eficientes y que generan un ahorro económico está ligado al incremento en el consumo de energía que implica el mayor consumo de otros bienes y servicios.

La magnitud de los efectos rebote directos estimados depende del sector en el que tengan lugar las mejoras en eficiencia energética y de la metodología para calcular las ganancias y los efectos derivados de inversiones en eficiencia energética.

La evidencia empírica concluyente sobre el efecto rebote ha sido durante años escasa y está sujeta a debate (Sorrell et al., 2009; Linares y Labandeira, 2010). En los últimos tiempos, sin embargo, está apareciendo nueva evidencia que indican que el efecto rebote en distintos sectores, incluyendo el industrial, puede ser significativo.

Las inversiones en eficiencia energética en el sector del transporte privado, por ejemplo, pueden dar lugar a un efecto rebote directo (mayor kilometraje) relativamente poco significativo. Craglia y Cullen (2020) estiman que el efecto rebote directo de inversiones en eficiencia energética de los vehículos se sitúa en el orden del 5% en el Reino Unido.

Druckman et al., (2011) estimaron que el efecto rebote de una serie de medidas de reducción del consumo de energía por los hogares en el Reino Unido podría dar lugar a un incremento en el consumo de bienes y servicios que podría dar lugar a un efecto rebote (incremento del consumo de energía) del 30%.

En el ámbito del sector industrial, Liu et al. (2019) estimaron un efecto rebote en el sector industrial en China del 37%, del que un 13% se asoció al “efecto sustitución” (de tecnologías, etc.) y un 24% correspondía al “efecto producción” (al incrementarse la productividad, se produce más con el mismo volumen de recursos). Sin embargo, existían diferencias entre la industria pesada (en la que el efecto rebote está relacionado con el efecto producción) y la industria ligera (donde tiene más relevancia el efecto sustitución). Zhang et al. (2019) estimaron que el efecto rebote en el sector industrial chino varió entre el 20% y el 76% entre 1995 y 2012 (un 39%, en promedio), con un valor inferior en el sector manufacturero (28% en promedio) y una tendencia descendente. Yang y Li (2017), por su parte, estimaron un efecto rebote en el sector de generación de energía eléctrica en China del 12%.

La magnitud del efecto rebote también depende de las preferencias de los consumidores. En el caso del sector residencial, por ejemplo, Kulmer y Seebauer (2019) estimaron un efecto rebote medio del 65% para el conjunto de la economía austriaca derivado de incrementos en la eficiencia energética, siendo la mayor parte (entre el 53% y el 57%) atribuible a los efectos indirectos.

En general, la evidencia empírica sobre el efecto rebote apunta a la gran variabilidad de los resultados en términos de ganancias de eficiencia energética en los distintos sectores y a la necesidad de diseñar programas y medidas de eficiencia energética específicas para cada sector y, en particular, para cada sector industrial, debido a las características diferentes de los procesos productivos en cada uno de ellos. El diseño de este tipo de medidas y políticas de fomento de la eficiencia energética debería, además, tener en cuenta el “efecto rebote” en una escala agregada (p. ej., para el conjunto de la economía).

### 3.4. El *energy efficiency gap* o hueco de eficiencia energética

Pese a los beneficios económico-financieros, medioambientales y sociales (para las empresas y para todos los sectores económicos y la economía en conjunto) que se asocia habitualmente a las mejoras en eficiencia energética, existe una creencia generalizada de que el volumen de inversiones en equipamientos más eficientes ha sido menor que el esperado e inferior al nivel óptimo desde el punto de vista social.

Se utiliza la expresión "hueco de eficiencia energética" (*energy efficiency gap*, en inglés) para referirse a la diferencia observada entre el nivel de inversión efectivo en eficiencia energética y un nivel óptimo teórico de eficiencia energética (Jaffe et al., 2004; Gillingham et al., 2009; Giraudet y Missemmer, 2019).

Existe un gran número de estudios, muchos basados en modelos ingenieriles, que trata de aportar evidencia empírica sobre la magnitud e incidencia del *energy efficiency gap* (IEA, 2007a; McKinsey, 2009a<sup>46</sup>; Gillingham et al, 2009; Gillingham et al, 2014; Gerarden et al., 2014) aunque resulta difícil medirlo en la práctica, ya que requiere definir ex ante una referencia de cuál es el nivel de inversión socialmente óptimo. La magnitud del *energy efficiency gap* dependerá del tipo de consumidor (p. ej., doméstico, comercial o industrial), de la inversión concreta y también del sector económico o industrial del que se trate.

Otra manera de evaluarlo es comparar la tasa de descuento del mercado y las tasas de descuento implícitas en las decisiones de consumo o inversión de los agentes económicos (Gillingham et al., 2009). La evidencia empírica, utilizando distintas metodologías de análisis, sitúa las tasas de descuento implícitas en las decisiones de consumo de aparatos domésticos en un rango entre 25 % y 100 % (Train, 1985; Sandstad et al., 2006).

El *energy efficiency gap* puede asociarse también a la diferencia estimada entre las ganancias de eficiencia energética esperadas (a partir de las especificaciones técnicas e ingenieriles de los equipamientos, por ejemplo) y las observadas en la realidad, aunque no están claras las verdaderas razones por las que se observa esa diferencia (Metcalf y Hassett, 1999; Gillingham et al., 2009; Houde y Aldy, 2014; Fowlie et al., 2018; Maher, 2016; Zivin y Novan, 2016).

Algunos autores (p. ej., Allcott y Greenstone, 2012) han defendido la posición de que el hueco de eficiencia energética es significativamente menor que el estimado en la literatura académica, debido a errores de medida o de modelización<sup>47</sup>, y otros directamente argumentan que no puede existir ese hueco porque los agentes racionales no ignorarían los beneficios netos derivados de las inversiones en eficiencia energética, si existieran, al tomar decisiones para maximizar su bienestar o sus beneficios si existieran (Sutherland, 1991).

---

<sup>46</sup> McKinsey estimaba, por ejemplo, que el 23% de la demanda de energía en los EE. UU., excluyendo el sector del transporte, podría ser eliminada a un coste negativo.

<sup>47</sup> Por ejemplo, muchos modelos ingenieriles no tienen en cuenta costes de oportunidad derivados de las inversiones u otras fuentes de coste (p. ej., asociados a los riesgos percibidos o costes no observables).

Recientemente, Fowlie et al. (2018) publicaron un estudio que aporta nueva evidencia sobre los factores que pueden dar lugar a un *energy efficiency gap*. Utilizando datos de un programa experimental de eficiencia energética en Michigan (EE. UU.) en el que participaron unos 30.000 hogares (*Weatherization Assistance Program*), estiman que los costes de inversión iniciales fueron aproximadamente el doble que las ganancias obtenidas y que el ahorro energético que predecían los modelos ingenieriles fue tres veces mayor que el ahorro real<sup>48</sup>. La rentabilidad media estimada de las inversiones, incluso teniendo en cuenta los beneficios medioambientales asociados a la reducción de emisiones, se situó en casi un -8 %. Estos resultados están en línea con los presentados por Davis et al. (2014), Zivin y Novan (2016) o Giraudet et al. (2018).

Pese a la dificultad de medir de forma inequívoca y concluyente el *energy efficiency gap*, el consenso es generalizado en el mundo académico (y en el sector de la energía) sobre la existencia de niveles subóptimos (desde el punto de vista social) de inversión en tecnologías eficientes, incluso en situaciones en las que parecería justificado desde el punto de vista financiero, sin tener en cuenta otros potenciales beneficios (p. ej., medioambientales) (Gerarden et al., 2017).

El debate sobre el *energy efficiency gap* se centra, entonces, en cuáles son las causas de que los niveles de inversión observados en eficiencia energética se sitúen por debajo del óptimo social, dando lugar a una menor tasa de adopción de tecnologías más eficientes.

### 3.5. Barreras a la inversión en eficiencia energética

Para resolver el “hueco de eficiencia energética” deben analizarse los factores y las condiciones que actúan como barreras a la inversión en soluciones de eficiencia energética.

La literatura académica ha explorado en profundidad las distintas posibles causas de los bajos niveles de inversión observados en la realidad (Gillingham et al., 2009). En el conjunto de potenciales factores que inhiben la inversión se incluyen explicaciones muy variadas como: (a) la existencia de costes no visibles (*hidden costs*), incluidos los costes de transacción asociados a la identificación de soluciones adecuadas (Jaffe et al., 2004); (b) ahorros energéticos en el mundo real menores que los estimados, debido a la heterogeneidad de los consumidores (Hausman y Joskow, 1982); (c) ahorros futuros inciertos que dan lugar a un mayor peso del coste inicial de inversión en el proceso de decisión (Sutherland, 1991); (d) la irreversibilidad de las inversiones y el valor de opción de retrasar la decisión de invertir (Hassett y Metcalf, 1993, 1995; van Soest y Bulte, 2001); (e) una divergencia entre las expectativas reales de precios de los consumidores y las de los analistas, posiblemente

---

<sup>48</sup> En parte, esto puede atribuirse a un “efecto rebote” (ver el Capítulo 4).

basadas en *proxies* incorrectas (Jaffe et al., 2004); (f) fallos de mercado como el riesgo moral de los agentes<sup>49</sup> (Giraudet y Houde, 2016).

Linares y Labandeira (2010), estudiando la “paradoja de la eficiencia energética”, indican que hay dos posiciones en el debate académico: (1) los mercados son eficientes y las inversiones en eficiencia energética son óptimas, por lo que, en caso de diferir de las esperadas, se debe a que no se tiene en cuenta de forma adecuada el comportamiento de los agentes (i. e., su racionalidad) (Joskow, 1994; Metcalf y Hassett, 1999); (2) existen fallos de mercado que explican esa diferencia (Kooimey y Sanstad, 1994; Banfi et al., 1998).

Entre los factores que explican la divergencia entre los niveles de inversión reales y los esperados y que no pueden considerarse fallos de mercado pueden citarse unos precios bajos de la energía, costes elevados de inversión que incluyen costes ocultos (p. ej., ligados a los niveles de servicio, etc.), la incertidumbre e irreversibilidad de algunas inversiones cuando los riesgos asociados a estas no son sistemáticos (es decir, no pueden diversificarse), procesos lentos de difusión de nuevas tecnologías o divergencias entre las tasas de descuento privadas y sociales<sup>50</sup>. Otros factores, como información imperfecta, asimétrica o miópica, racionalidad acotada, el problema principal-agente<sup>51</sup> o imperfecciones en los mercados de capital caerían dentro de la categoría de fallos de mercado.

En una línea similar, Gerarden et al. (2017) agrupan las posibles explicaciones a por qué los niveles de inversión en tecnologías eficientes son bajos en relación con las predicciones de modelos ingenieriles y económicos en tres categorías: (1) fallos de mercado (p. ej., información asimétrica, mercados de energía con externalidades y precios basados en costes medios, mercados de capital sujetos a restricciones de liquidez o fallos en los mercados de innovación debidos a la difusión de información sobre actividades de I+D, etc.); (2) explicaciones relacionadas con el comportamiento de los agentes (falta de atención, miopía, racionalidad acotada y métodos de decisión heurísticos, sesgos sistemáticos en la visión y creencias sobre mercados y tecnologías, etc.); (3) errores de modelización y de medidas (p. ej., supuestos incorrectos sobre costes, perfiles de uso, atributos de los productos o características de los consumidores, uso de tasas de descuento incorrectas, incertidumbre, irreversibilidad y el valor de la opción de esperar, etc.).

Además, Gerarden et al. (2017) indican en su análisis hasta qué punto las principales potenciales explicaciones tiene un mayor impacto sobre el “hueco de eficiencia privado” (inversiones que benefician a un consumidor individual no se llevan a cabo), el “hueco de

---

<sup>49</sup> El riesgo moral ocurriría cuando las decisiones de inversión (en eficiencia energética) dan lugar a comportamientos no orientados al ahorro energético. Por ejemplo, la inversión en un vehículo con menor consumo da lugar a una conducción más agresiva y, por tanto, a un mayor consumo unitario.

<sup>50</sup> Linares y Labandeira (2010) argumentan que, dado que este es un problema que afecta a todas las inversiones, la cuestión relevante no es si la divergencia está justificada, sino si la rentabilidad social de las inversiones en eficiencia energética excede o no la de otro tipo de inversiones sociales alternativas.

<sup>51</sup> Este problema surge si el agente que realiza la inversión no es el mismo que el agente que recibe los beneficios de la misma. Esto puede producirse, por ejemplo, entre arrendatarios y arrendadores de locales comerciales o para usos industriales.

eficiencia público” (no se producen inversiones que serían eficientes desde el punto de vista de los bienes públicos) o el “hueco de eficiencia social” (no se producen inversiones que serían eficientes desde el punto de vista social) (Tabla 9).

**Tabla 9. Posibles explicaciones del “hueco de eficiencia energética” e impacto privado y social**

Explicación potencial	Hueco privado	Hueco público	Hueco social
Efectos ligados a la innovación y adopción de tecnologías, poder de mercado, información imperfecta		X	X
Precios de energía bajos debido a externalidades		X	X
Percepciones sesgadas sobre precios y uso de la energía	X		X
Falta de atención a los costes operativos, miopía y limitaciones cognitivas	X		X

Fuente: Gerarden et al. (2017).

**Tabla 10. Barreras a las inversiones en eficiencia energética**

Económicas (no asociadas a fallos de mercado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heterogeneidad en la rentabilidad de las inversiones en función del caso concreto</li> <li>• Costes ocultos (de estructura, costes de transacción y recolección de información, costes de interrupción de la producción, etc.)</li> <li>• Restricciones en el acceso a la financiación</li> <li>• Aversión al riesgo, excluyendo inversiones con periodos de pay-back largos</li> </ul>
Económicas (asociadas a fallos de mercado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información imperfecta o asimétrica</li> <li>• Incentivos divididos (p. ej., personas o departamentos relevantes en el proceso de decisión no se benefician de las inversiones)</li> <li>• Selección adversa (si los suministradores tienen más información sobre los equipos que los compradores, estos pueden tomar las decisiones únicamente en función del precio)</li> <li>• El problema principal-agente puede dar lugar a niveles bajos de inversión, según sean los incentivos de cada uno</li> </ul>
Relacionadas con el comportamiento de los agentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Racionalidad acotada o limitada, uso de reglas de decisión heurísticas</li> <li>• Tipo y forma de presentación de la información (mayor probabilidad de aceptación cuanto más específica, clara, simple y personal sea)</li> <li>• Credibilidad y confianza de la fuente de información</li> <li>• Inercia contraria al cambio</li> <li>• Valores de los gerentes y la alta dirección</li> </ul>
Relacionadas con las organizaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura de poder en las organizaciones (p. ej., si el departamento de gestión de energía o compras tiene poco peso en la organización, es más difícil obtener apoyo a inversiones en eficiencia energética)</li> <li>• Cultura empresarial (determinados valores, como la sensibilidad medioambiental, pueden favorecer las decisiones de inversión)</li> </ul>

Fuente: Rohdin y Thollander (2006).

Rohdin y Thollander (2006) realizan una revisión de la literatura académica sobre las barreras a la eficiencia energética y llegan a un compendio bastante detallado de razones que agrupan en económicas (asociadas o no a fallos de mercado), relacionadas con el comportamiento de los agentes y relacionadas con la organización interna de empresas, instituciones y administraciones (Tabla 10).

Otros estudios analizan cuáles son los factores específicos que incrementan la probabilidad de que una empresa invierta en eficiencia energética. Por ejemplo, Trianni et al. (2013) analizaron las decisiones de inversión en eficiencia energética de 48 pymes en el norte de Italia y concluyen que las principales barreras *percibidas por las empresas* a la inversión en tecnologías más eficientes son las económicas y las relacionadas con la información, mientras que las relacionadas con el comportamiento son menos relevantes desde el punto de vista de las empresas. Sin embargo, los autores argumentan que, en realidad, existe poco interés en la eficiencia energética y que la existencia de otras prioridades hace que aquella se vea relegada en importancia en la toma de decisiones. Además de la divergencia entre las barreras percibidas y las barreras reales, Trianni et al. (2013) encuentran evidencia de una correlación positiva entre el tamaño de la empresa y el gasto en energía y las decisiones de inversión, por un lado, y, por otro, menores barreras reales a la inversión cuanto más compleja es la cadena de valor en la que opera la empresa (mayor complejidad en la producción, variabilidad en la demanda y nivel de competencia).

Trianni et al. (2013) argumentan que se ha prestado hasta ahora más atención a los factores externos a las empresas que limitan las inversiones que a los factores internos a las organizaciones. Trianni y Cagno (2012) estudian las barreras internas a las empresas que limitan las inversiones en eficiencia energética y que agrupan en: (a) económicas (acceso a la financiación, costes ocultos y riesgos ligados a la intervención en los equipos, procesos, etc.); (b) de comportamiento en las organizaciones (falta de interés, otras prioridades, inercia, criterios de evaluación imperfectos, intereses divergentes, procesos de decisión complejos, falta de control interno y de tiempo, etc.); (c) de competencias en las empresas (para identificar correctamente las ineficiencias y las oportunidades y para implementar los cambios); (d) falta de concienciación y conocimiento sobre eficiencia energética.

Hrovatin et al. (2016) estudian también cuáles son los factores que tienen impacto sobre las decisiones de las empresas de invertir en eficiencia energética. Estudian tres tipos de variables: económicas (características de las empresas y factores del mercado), organizativas y regulatorias. Utilizando datos de panel correspondientes a 848 empresas manufactureras eslovenas para el periodo 2005-2011, analizan las decisiones de inversión y concluyen que (1) las características de cada industria explican parte de las diferencias observadas (debido a la regulación medioambiental, por ejemplo); (2) las decisiones de inversión en eficiencia energética y tecnologías limpias no se ven afectadas por otras decisiones de inversión (excepto en expansión de la capacidad de producción); y (3) los factores que afectan a las inversiones en eficiencia energética no son los mismos necesariamente que los que afectan a las inversiones en tecnologías limpias (Tabla 11).

**Tabla 11. Factores que afectan a las decisiones de inversión en eficiencia energética y tecnologías limpias**

<b>Afecta a las decisiones de inversión en:</b>	<b>Eficiencia energética</b>	<b>Tecnologías limpias</b>
Costes energéticos (% sobre el total)	Sí	Sí
Cuota de mercado	Sí	Sí
Nivel de exportaciones	Sí	Sí
Propiedad extranjera	Sí	No
Expectativas sobre la demanda futura	Sí	No
Expectativas sobre la posición futura de la empresa en el mercado	No	Sí
Crisis económica y financiera	No	Sí
Costes energéticos elevados	No	Sí

*Fuente: Hrovatin et al. (2016).*

## 4. ESTRATEGIA Y POLÍTICAS SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL

En esta sección se analizan algunas de las estrategias y políticas orientadas a mejorar la eficiencia energética en el sector industrial en la Unión Europea, en España y en otros países europeos.

### 4.1. Estrategia de eficiencia energética en el sector industrial en la Unión Europea

#### 4.1.1. Directivas de eficiencia energética y otras directivas

El marco de impulso a la eficiencia energética en el sector industrial en la UE se encuadra en la actualidad principalmente en la directiva sobre eficiencia energética de 2012, actualizada en 2018, y en los desarrollos previstos en el Pacto Verde Europeo (PVE).

Además de la directiva sobre eficiencia energética, existe un conjunto de normas de carácter horizontal que definen el marco regulatorio y de incentivos relativo a la eficiencia energética en el sector industrial, incluyendo la directiva sobre el rendimiento de los edificios, el Paquete de Energía Limpia, la directiva de ecodiseño, el reglamento sobre etiquetado energético, la directiva que regula el esquema de comercio de derechos de emisión de CO<sub>2</sub>, el reglamento sobre el esfuerzo compartido ("*effort-sharing regulation*"), la directiva sobre energías renovables o la directiva sobre emisiones industriales (Tsemekidi Tzeiranaki et al., 2020).

La Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética (Directiva de Eficiencia Energética o DEE) estableció diversas medidas y obligaciones relacionadas con el impulso de la eficiencia energética, incluyendo la obligación de fijar objetivos orientativos, la puesta en marcha mecanismos de ahorro de energía, las políticas generales de eficiencia energética, auditorías energéticas, el impulso de la cogeneración, los sistemas de gestión de la energía, medidas para incentivar el aprovechamiento de calor residual en la industria, etc. (Malinauskaite et al., 2020).

Los Estados miembros de la UE pueden implementar distintas políticas y utilizar distintos instrumentos para alcanzar los objetivos de eficiencia energética fijados en el marco de la DEE. Entre ellos se pueden señalar los esquemas obligatorios de ahorro de energía, programas específicos (e. g., orientados al aprovechamiento del calor residual en la industria), imposición sobre el carbono, certificados blancos, esquemas de financiación de nuevas tecnologías, incentivos fiscales, acuerdos voluntarios, programas de formación y concienciación y diversas regulaciones (e. g., auditorías energéticas, estándares de eficiencia, normas, etiquetados, etc.).

Por otro lado, la actualización de esta directiva (Directiva (UE) 2018/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018) dentro del llamado Paquete de Energía Limpia, fijó un objetivo de ganancia de eficiencia energética para toda la UE y para 2030 del 32,5 % respecto de la referencia fijada en 2007. Este objetivo cuantitativo puede ser

modificado al alza en 2023. Los Estados miembros de la UE están obligados a alcanzar reducciones anuales netas del 0,8 % en el consumo final de energía en el periodo 2021-2030 y deben fijar en sus PNIEC (Planes Nacionales Integrados de Energía y Clima) los objetivos concretos en materia de eficiencia energética en los distintos sectores de la economía y las medidas y planes concretos para alcanzarlos.

Un aspecto relevante en la definición del alcance de las obligaciones relativas al ahorro de energía es que aquellos Estados miembros donde haya industrias intensivas en energía y expuestas al comercio internacional (e. g., aluminio), los gobiernos podrán eximir a estas industrias de las obligaciones para proteger su competitividad en los mercados internacionales (European Commission, 2019a, 2019b).

#### 4.1.2. El Pacto Verde Europeo

El Pacto Verde Europeo (PVE) vuelve a situar la eficiencia energética como una de las palancas de competitividad en la estrategia de crecimiento a medio y largo plazo que propone, centrada en el desarrollo de una economía sostenible y, específicamente, en impulsar un sector industrial puntero en la adopción de equipamientos y soluciones digitales, de energías con bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero y con una mayor eficiencia en el uso de materiales y de la energía.

En particular, la urgencia y relevancia de impulsar la eficiencia energética en el sector industrial (y en toda la economía) se refleja en varias de las estrategias y planes de acción propuestos en el PVE:

- En la **estrategia industrial europea** se reconoce que la reducción de las emisiones en la industria dependerá de la aplicación del principio “primero, la eficiencia energética” (*energy efficiency, first*) y de un suministro de energía bajo o nulo en emisiones. El impulso de la sostenibilidad en la industria, en general, está ligado, en parte a una mayor eficiencia energética y en el uso de materiales. (Comisión Europea, 2020b).
- El **plan de acción sobre economía circular** está orientado a facilitar la transición a una economía una climáticamente neutra, eficiente en el uso de los recursos y circular, mejorando la durabilidad, reutilizabilidad, actualizabilidad y reparabilidad de los productos, reduciendo la presencia en ellos de sustancias químicas peligrosas e intensificando su eficiencia en relación con el uso de energía y de otros recursos (Comisión Europea, 2020c).
- La **estrategia de integración del sector energético**, por su parte, tiene como objetivo desarrollar “...un sistema energético más circular, con la eficiencia energética en el centro, en el que se prioricen las opciones menos intensivas en energía, se reutilicen los

*residuos para usos energéticos<sup>52</sup> y se exploten las sinergias entre todos los sectores..."*  
(Comisión Europea, 2020d).

### *Revisión de la directiva europea sobre eficiencia energética*

La propuesta de Ley del Clima europea presentada por la Comisión Europea en septiembre de 2020<sup>53</sup> prevé fijar un objetivo vinculante de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de entre un 50 % y un 55 % en 2030 en comparación con los niveles registrados en 1990. Además, el plan de desarrollo del Pacto Verde Europeo incluye la revisión de la legislación relevante para alcanzar estos objetivos, incluyendo la directiva de eficiencia energética.

El principal objetivo de la revisión de la DEE (prevista para junio de 2021) es evaluar si ofrece *"...un marco adecuado para superar las barreras regulatorias y no regulatorias y los fallos de mercado que no permiten que la eficiencia energética sea parte de los sistemas energéticos..."* (European Commission, 2020b) [traducción propia] y que asegure que se alcancen los objetivos previstos en términos de ahorro energético y descarbonización y se capitalicen los impactos positivos esperados sobre el crecimiento económico, las inversiones y la competitividad de la economía y, en el plano sectorial, las oportunidades para pymes en materia de innovación en tecnologías con bajas o nulas emisiones de GEI y digitalización y creación de nuevos modelos de negocio centrados en la eficiencia energética.

La consulta pública lanzada en noviembre de 2020 pretende recopilar distintas visiones sobre un paquete de políticas que incluiría:

- la actualización de las disposiciones de la DEE sobre renovación de edificios públicos, contratación pública, auditorías energéticas, climatización (heating and cooling), recuperación de calor residual, servicios energéticos y capacidades; y
- la adopción de medidas no regulatorias y la utilización de instrumentos como programas de formación, diseminación de información, campañas de concienciación, medidas de financiación, servicios de apoyo y asesoramiento.

## 4.2. Estrategias de eficiencia energética en algunos países europeos

A continuación presentamos una breve descripción de las principales estrategias y medidas para incentivar las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial adoptadas en

---

<sup>52</sup> Por ejemplo, aprovechando el calor residual de los procesos industriales, de los centros de tratamiento de datos o la energía producida en los residuos de origen biológico o en plantas de tratamiento de agua y otras fuentes de energía que se pierde en la actualidad.

<sup>53</sup> Amended proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law) COM/2020/563 final (ver <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020PC0563>).

algunos de los principales países de nuestro entorno con un peso significativo del sector industrial: Reino Unido, Francia y Alemania.

Los instrumentos más habituales son los incentivos y ayudas a la inversión en nuevos equipamientos y tecnologías eficientes. Por otro lado, las principales medidas orientadas al mercado son, además de las obligaciones impuestas por las directivas antes mencionadas, el sistema de comercio de derechos de emisión de la UE (aplicable a todos los Estados miembros de la UE) y el sistema de certificados de eficiencia energética (aplicado en Francia e Italia, por ejemplo).

#### 4.2.1. España

En España, el marco legislativo vigente relativo al fomento de la eficiencia energética se basa en la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, y el Real Decreto 56/2016, que traspusieron y desarrollaron las principales disposiciones de la Directiva de Eficiencia Energética relativas a los objetivos de eficiencia energética (artículo 7 de la Directiva), auditorías energéticas y sistemas de gestión de la energía (artículo 8) y eficiencia en calefacción y refrigeración a través de cogeneración, sistemas de calefacción y refrigeración comunales y recuperación de calor residual de procesos industriales.

De acuerdo con la DEE, la Ley 18/2014 estableció un sistema nacional de obligaciones de eficiencia energética<sup>54</sup> y el Fondo Nacional de Eficiencia Energética, instrumento para ofrecer apoyo económico y financiero, asistencia técnica, formación e información y desarrollar otras medidas orientadas a aumentar la eficiencia energética en todos los sectores económicos.

El Real Decreto-ley 23/2020, de 23 junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica, extendió la vigencia del sistema nacional de obligaciones de eficiencia energética para el periodo 2021-2030 para dar cumplimiento a lo dispuesto en la Directiva (UE) 2018/2002. De acuerdo con este sistema:

- se asigna a las empresas comercializadoras de gas y electricidad, a los operadores de productos petrolíferos al por mayor, y a los operadores de gases licuados de petróleo al por mayor, en adelante, sujetos obligados del sistema de obligaciones, una cuota anual de ahorro energético de ámbito nacional, denominada obligaciones de ahorro;
- el objetivo anual de ahorro para cada sujeto obligado se calcula como:

$$\text{Ventas de energía del sujeto obligado (año } n - 2) \times \left( \frac{\text{Promedio del objetivo de ahorro anual 2015 - 2020}}{\text{Promedio del volumen de ventas de todos los sujetos obligados 2015 - 2020}} \right) \times C$$

<sup>54</sup> Anualmente se definen mediante Orden ministerial los objetivos anuales de ahorro de energía, los porcentajes de reparto entre los sujetos obligados y las cuotas u obligaciones de ahorro resultantes y su equivalencia financiera.

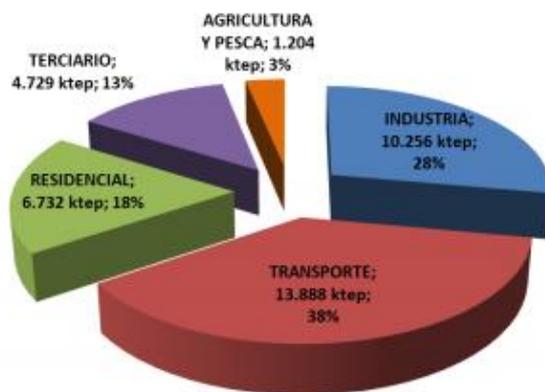
donde C es proporcional al aumento del objetivo de ahorro necesario para cumplir con lo establecido por la DEE para 2021-2030;

- los sujetos obligados deberán realizar una contribución financiera anual al Fondo Nacional de Eficiencia Energética por un importe igual al producto de su obligación de ahorro anual por la equivalencia financiera que se establezca regulatoriamente;
- además, se abre la puerta a la posibilidad de que el Gobierno establezca un mecanismo de acreditación de la consecución de ahorros energéticos basado en Certificados de Ahorro Energético (CAE).

Hasta la fecha, las líneas de acción para alcanzar los objetivos de la Directiva de Eficiencia Energética se han detallado en los planes nacionales de acción de eficiencia energética<sup>55</sup>, dando cumplimiento al artículo 24.2 de la Directiva de Eficiencia Energética.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, por su parte, detalla las estrategias previstas por el Gobierno de España durante ese periodo para dar cumplimiento a los objetivos de ahorro energético marcados en él, y, en particular, alcanzar una reducción en el consumo de energía primaria en 2030 del 39,5 % respecto del escenario europeo de referencia fijado por el modelo PRIMES en 2007 (equivalente a un 1,9 % anual desde 2017) (MITECO, 2020).

**Figura 12. Ahorro de energía previsto en el PNIEC 2021-2030 por sector**



Fuente: MITECO (2020).

El PNIEC 2021-2030 prevé que el sector industrial contribuya con el 28 % del ahorro total de energía previsto en el horizonte 2021-2030 (Figura 12), a través de mejoras en la tecnologías

<sup>55</sup> Hasta la fecha ha habido dos: 2014-2017 y 2017-2020. Ver, p. ej., <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/plan-nacional-de-accion-de-eficiencia-energetica-2017-2020>.

y los sistemas de gestión de los procesos industriales. Para alcanzar estos objetivos, el PNIEC 2021-2030 propone diez medidas con enfoque sectorial.

En el caso del sector industrial, se busca facilitar la introducción de nuevas tecnologías y sistemas de gestión de la energía en pymes y grandes empresas industriales (especialmente en el sector manufacturero) no incluidas en el régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE). La medida también se dirige a las empresas de servicios energéticos que realicen inversiones por cuenta de clientes industriales.

Las inversiones previstas (7.370 M€ en total, con financiación pública por valor de 1.647 M€) se fomentarán a través de programas públicos de ayudas a fondo perdido o a través de préstamos reembolsables a bajo interés y acuerdos voluntarios.

#### 4.2.2. Reino Unido

La estrategia del gobierno británico para mejorar la eficiencia energética en los distintos sectores económicos se estructura en torno a diversas propuestas y medidas orientadas principalmente a facilitar el cumplimiento de los “presupuestos de carbono” que fija su Estrategia de Crecimiento Limpio (*Clean Growth Strategy*) (HM Government, 2017).

En el caso específico del sector industrial, diversas herramientas de mercado y fiscales y otras medidas generan incentivos para que las empresas inviertan en activos y otras medidas que mejoren su eficiencia energética. A continuación, se describen brevemente las más relevantes<sup>56</sup>.

##### ***Energy Savings Opportunity Scheme (ESOS)***

Este programa, basado en el Artículo 8 de la Directiva de Eficiencia Energética, obliga a las grandes empresas a realizar auditorías energéticas para identificar medidas que permitan reducir los costes energéticos en áreas como el uso de energía en los edificios, los procesos industriales o el transporte.

##### ***Climate Change Levy (CCL)***

El Climate Change Levy (CCL) es un impuesto sobre el consumo de energía en la industrial, el sector comercial y el sector público. Los ingresos fiscales se “reciclan” en forma de reducciones en los costes laborales (en particular, en las National Insurance Contributions, NIC) y en ayudas a la inversión en eficiencia energética y en tecnologías bajas en carbono.

---

<sup>56</sup> Ver [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/uk\\_eeo\\_annual\\_report\\_2019\\_-\\_final\\_003.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/uk_eeo_annual_report_2019_-_final_003.pdf) y <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/united-kingdom-country-profile-english.pdf>.

### ***Climate Change Agreements (CCA)***

Los Climate Change Agreements (CCAs) son acuerdos sectoriales que implican una exención parcial del CCL. Se han implementado en determinados sectores intensivos en energía que acuerdan alcanzar objetivos de mejora de la eficiencia energética y de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### ***Enhanced Capital Allowances (ECA)***

El programa Enhanced Capital Allowance (ECA) ofrece una reducción en el impuesto de sociedades del 100% de la anualidad del coste (o del valor máximo determinado por la normativa) de determinadas tecnologías y equipamientos limpios en el año en el que se produce la compra. Solo son elegibles para esta reducción las inversiones en bienes de equipo nuevos.

### ***The Industrial Heat Recovery Support (IHRS) Programme***

Este programa, puesto en marcha en octubre de 2018, tiene como objetivo impulsar el despliegue de tecnologías de recuperación y reutilización de calor residual procedente de procesos industriales en Inglaterra y Gales y está dotado con 18 millones de libras esterlinas.

### ***The Industrial Energy Transformation Fund (IETF)***

El Industrial Energy Transformation Fund (IETF) es un programa lanzado en el otoño de 2018 que ofrece ayudas a las empresas industriales para que inviertan en eficiencia energética y tecnologías bajas en carbono, con un presupuesto de 315 millones de libras para el periodo 2019-2024

## 4.2.3. Francia

En Francia, la estrategia para incrementar la eficiencia energética de la economía se encuadra dentro de la estrategia de transición energética definida en la Ley de Transición Energética para el Crecimiento Verde (LTECV), de 2015. Uno de los principales objetivos de esta ley es la consecución de mejoras significativas en la eficiencia energética en los distintos sectores económicos, incluido el industrial.

La principal herramienta para avanzar en el cumplimiento de los objetivos de la LTECV es el Plan de Energía Multianual (PEM), que establece una serie de objetivos cuantitativos relacionados con distintas variables energéticas y medioambientales, como la eficiencia energética, el uso de combustibles fósiles, las energías renovables, el transporte limpio, la seguridad energética o la preparación para el sistema energético del futuro, entre otros, que deberán alcanzarse a lo largo de periodos de cinco años. El PEM actual corresponde al periodo 2019-2023 (*Ministère de la Transition écologique et solidaire*, 2018).

En el área de la eficiencia energética, en concreto se busca una reducción en el consumo de energía final de más del 12% en el periodo, en línea con el objetivo de alcanzar un 20% en 2030. Además, debe reducirse la demanda primaria de combustibles fósiles un 23%, reducir

el consumo de los edificios un 15%, mejorar la financiación de iniciativas de eficiencia energética (fondos para garantías, financiación de terceras partes, etc.) e imponer objetivos más ambiciosos del esquema de certificados de eficiencia energética.

En el ámbito industrial, la estrategia de Francia para la reducción de emisiones se basa en techos de emisiones para instalaciones industriales (a través del mecanismo de comercio de derechos de emisión), programas de mejora de la eficiencia energética (préstamos verdes para pymes, ayudas a la I+D+i en eficiencia energética de la agencia medioambiental ADEME), reducciones en los peajes eléctricos para empresas intensivas en energía que apliquen medidas de eficiencia energética y recuperación de calor residual (con análisis coste-beneficio obligatorios de la posibilidad de reutilizarlo en redes comunales de calefacción y refrigeración) (Gobierno de Francia, 2020).

En resumen, las políticas actuales en Francia sobre eficiencia energética en el sector industrial se basan en una combinación de instrumentos de mercado (el EU-ETS), incentivos financieros, medidas regulatorias en el ámbito de la Directiva de Eficiencia Energética, medidas de normalización y apoyo al desarrollo de tecnologías eficientes innovadoras.

A continuación, se describen brevemente las más herramientas y medidas más relevantes<sup>57</sup>.

### **Certificados de Eficiencia Energética (CEE)**

Para el periodo 2014-2020, Francia estableció un objetivo de ahorro energético de 365 TWh, que se cubrirá principalmente a través de certificados de eficiencia energética.

Los certificados CEE o certificados blancos (*certificats d'économies d'énergie* o *certificats blancs*) obligan a los comercializadores de energía (electricidad, gas natural, gasolinas y diésel, calor, otros combustibles...) a certificar un volumen de ahorro energético determinado en función de su cuota de ventas en los sectores residencial y terciario en periodos de tres años de duración.

El objetivo de cada empresa para cada periodo puede alcanzarse de tres maneras (Figura 13): (1) financiando proyectos de eficiencia energética con consumidores finales (industriales, comerciales, etc.); (2) reduciendo el consumo propio (en edificios, p. ej.); (3) comprando certificados CEE.

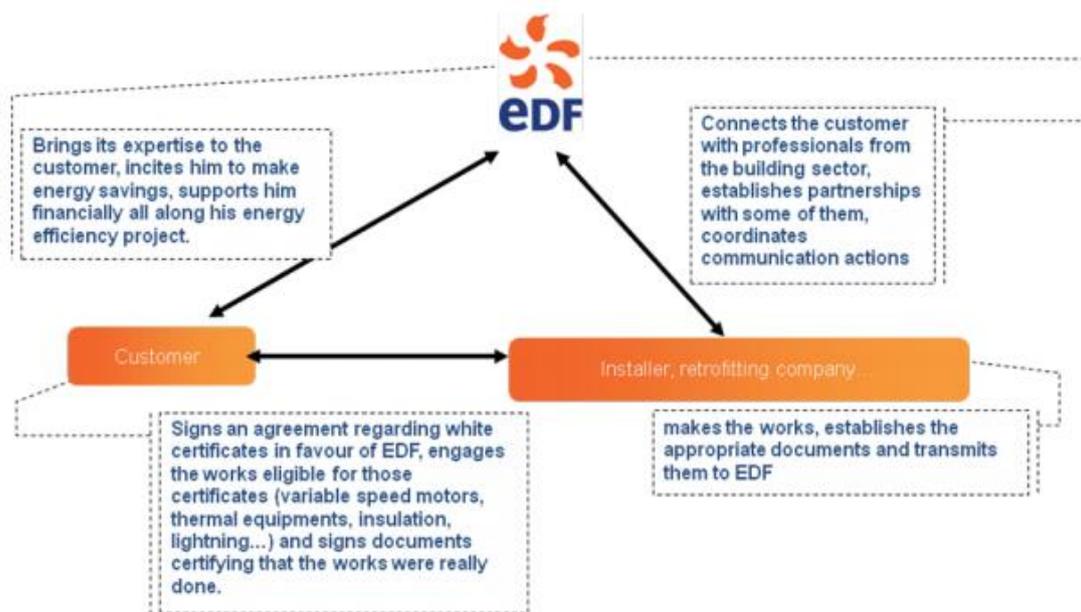
El Gobierno francés (*Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie*) emite certificados en función de los proyectos. Posteriormente, pueden negociarse estos certificados en el mercado secundario. En caso de que no se alcancen los objetivos asignados al final de cada periodo, se aplican penalizaciones. Para el periodo actual (2018-2021), se emitirán certificados para una reducción del consumo de 1.600 TWh (frente a solo 54 TWh en el periodo 2006-2009). En el periodo entre enero-2015 y diciembre-2018, el sector

---

<sup>57</sup> Ver [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr\\_anual\\_report\\_2019\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_anual_report_2019_en.pdf) y <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/france.html>.

industrial acaparó el 21% de los certificados emitidos (frente a un 65% del sector doméstico-residencial) (*Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019*).

**Figura 13. Ilustración del modelo de aplicación de certificados blancos de EDF**



Fuente: Sicard y Escudero (2012).

**Fondo para inversiones en soluciones de calor**

Este fondo ofrece ayudas al despliegue de soluciones energéticas basadas en biomasa (forestal, agrícola, biogás, etc.), geotermia (mediante uso directo del calor o bien a través de bombas de calor), energía solar térmica, energía residual recuperada y al desarrollo de redes de calor utilizando estas fuentes de energía.

**Ayudas "eco-energéticas" para pymes**

Este programa ofrece ayudas a pymes con más de 3 años de operación, a través de Bpifance<sup>58</sup>, que inviertan en eficiencia energética (nuevos equipamientos eficientes para iluminación, sistemas de calor, climatización, motores eléctricos). Las ayudas, entre 10.000 y 100.000 €, se financian mediante préstamos no garantizados con un tipo fijo.

<sup>58</sup> El programa se llama, en concreto, Prêt Éco-Énergie (PEE). Ver <https://www.bpifrance.fr/Toutes-nos-solutions/Prets/Prets-thematiques/Pret-Eco-Energie-PEE>.

### ***Auditorías energéticas obligatorias***

Las grandes empresas francesas (con más de 250 empleados o ingresos de más de 50 M€), unas 5.000 empresas, en total, están obligadas a llevar a cabo auditorías energéticas cada cuatro años.

### ***Apoyo a grandes consumidores de energía eléctrica***

La ley LTECV (artículo 156) contempla la posibilidad de que los grandes consumidores de energía eléctrica puedan beneficiarse de condiciones particulares en el suministro de electricidad, a cambio de adoptar las mejores prácticas de eficiencia energética. Para ello, deben cumplir determinadas condiciones (p. ej., disponer de sistemas y procesos de gestión de energía), establecidas por el artículo 356-1 del Código de la Energía (*Code de l'énergie*). Los beneficios dependen de diversos factores, como el consumo de energía, el grado de exposición a la competencia internacional, los procesos industriales, etc.

## 4.2.4. Alemania

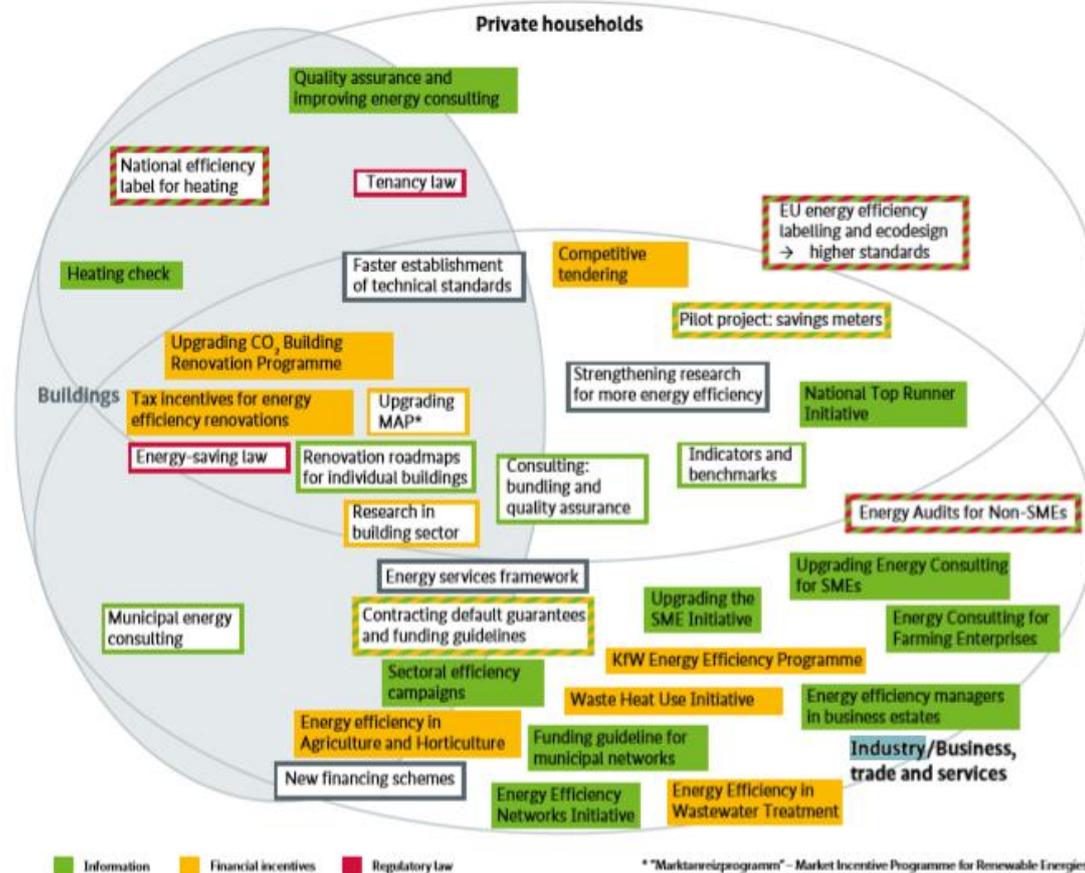
La estrategia actual de Alemania para incentivar la eficiencia energética en la industria está recogida en la Estrategia de Eficiencia Energética 2050, aprobada a finales de 2019. Esta estrategia establece objetivos cuantitativos concretos para el año 2030. La principal herramienta para la consecución de los objetivos de esta estrategia de largo plazo es el nuevo Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética (conocido como NAPE 2.0, aprobado en diciembre de 2019) y sucesor del primer NAPE, aprobado en 2014.

Además, el PNIEC 2021-2030 resume el conjunto de actuaciones en el ámbito del sector industrial orientadas a la consecución de los objetivos de eficiencia energética y que incluyen las siguientes (Gobierno de Alemania, 2020): (1) programas de apoyo a la innovación (programa NER300) para reducir emisiones de GEI y el consumo de energía primaria; (2) programa nacional de descarbonización; (3) programa de reducción de emisiones y uso de energía en industrias primarias; (4) desarrollo de las redes de eficiencia energética (Energy Efficiency Networks Initiative); (5) programas de financiación y apoyo a la sustitución y la eficiencia de recursos; (6) programas de asesoramiento e información, especialmente para pymes (p. ej., a través del Centro de Eficiencia de Recursos); (7) programas de financiación de proyectos de digitalización e industria 4.0; (8) programas de formación avanzada (en las empresas y a través de los programas de formación profesional); (8) revisión de los incentivos fiscales relacionados con la imposición sobre la energía para fuentes fósiles, analizados para cada caso.

En 2019, el Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Energía de Alemania adaptó sus programas de apoyo a la eficiencia energética para alinearlos mejor con la estrategia de largo plazo e incentivar, de una manera más eficiente el uso de calor residual en la industria y mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales.

**Figura 14. Medidas de eficiencia energética de corto y largo plazo dentro del NAPE**

**Figure 1: Short-term measures and long-term work processes of NAPE for the 18th legislative term**



Source: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

Fuente: BMWi (2014).

Los principales programas de apoyo a la eficiencia energética en la industria en Alemania eran los siguientes<sup>59</sup> (Figura 14):

- **Programas de apoyo a la reestructuración en la industria.** Estos programas, con una financiación de 600 M€ en 2019-2023 se orientan al despliegue y la promoción de: (1) tecnologías multisectoriales; (2) uso de calor para procesos procedente de energías renovables; (3) tecnologías de medida, regulación y control y software de gestión de la energía; (4) optimización de procesos e instalaciones.
- **Contadores avanzados.** Este programa incentiva la transformación digital, orientada al ahorro energético (electricidad, gas natural, calor y frío): sistemas inteligentes, contadores inteligentes, edificios inteligentes y tecnologías avanzadas

<sup>59</sup> Ver [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/de\\_annual\\_report\\_2019\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/de_annual_report_2019_en.pdf) y BMWi (2014).

de medida, regulación y control. La ayuda es de un máximo de 2 M€ por proyecto y puede cubrir hasta el 75% de los costes elegibles.

- **Aire acondicionado y ventilación.** Un paquete de medidas (ayuda técnica y operativa, herramientas de planificación, etc.) para facilitar e incentivar que los operadores de edificios no residenciales adopten medidas para mejorar la eficiencia energética en nuevos edificios en los procesos de climatización.
- **Medidas de eficiencia energética en la agricultura y la horticultura.** Programas con financiación de inversiones (81,6 M€ en 2019-2021) en edificios (p. ej., invernaderos y plantas de secado y enfriado).
- **Mejora de la eficiencia de procesos e instalaciones.** Este programa ofrece ayudas por parte del banco de promoción alemán KfW para financiar inversiones en nuevas tecnologías que permitan reducir el consumo energético en procesos e instalaciones, fijando el nivel de ayuda en función del ahorro energético y fijando estándares de eficiencia básico (10% de ahorro energético) y premium (30% de ahorro energético).
- **Iniciativa para la utilización de calor residual.** Esta iniciativa está orientada a optimizar el aprovechamiento de calor residual. Este programa busca racionalizar el uso de calor en los procesos industriales, que copan dos tercios del consumo total de energía en la industria. El programa ofrece financiación para el aislamiento térmico en instalaciones industriales, el despliegue de tecnologías y procesos para la recuperación del calor residual y una utilización más eficiente del calor.
- **Otras medidas y programas.** Entre estas pueden citarse programas ligados a la Ley de Calor Renovable (EEWärmeG), programas de financiación de KfW para construcciones eficientes, incentivo al uso de renovables en el mercado de calor, programas de asesoramiento (sobre optimización del consumo energético, control de calidad, etc.)<sup>60</sup> y otras medidas de apoyo a la inversión por parte de empresas.

El nuevo Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética 2050 (NAPE 2.0) establece un objetivo de reducción del consumo primario de energía en 2030 y en 2050 del 30 % y el 50 %, respectivamente, en comparación con 2008. En parte, la actualización del plan responde al fracaso en el cumplimiento del objetivo del primer NAPE (una reducción en el consumo primario del 20 % en 2020 respecto de 2008)<sup>61</sup>.

---

<sup>60</sup> En diciembre de 2014, el gobierno federal alemán (BMW i y BMU) puso en marcha una alianza con unas 20 asociaciones y organizaciones empresariales para establecer “redes de eficiencia energética” en toda Alemania. Cada una de estas redes incluye entre 8 y 15 empresas que reciben asesoría por parte de consultores expertos en relación con la eficiencia energética que facilita que las empresas fijen objetivos de eficiencia energética y planes de acción concretos para alcanzarlos (IEA, 2020). En la actualidad, existen más de 200 redes de eficiencia energética.

<sup>61</sup> En 2018, se había alcanzado únicamente un 10% (IEA, 2020i).

Las principales medidas incluidas en el NAPE han sido traspasadas al NAPE 2.0, aunque están en proceso de revisión para incrementar su efectividad (Gobierno de Alemania, 2020)

. La nueva estrategia incluye medidas de eficiencia energética para el periodo 2021-2030, estrechamente ligadas a los objetivos del Programa de Protección del Clima 2030. Además, se ha puesto en marcha en mayo-junio de 2020 un proceso de diálogo con las empresas y la sociedad civil, liderado por el Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Energía, que culminará en otoño de 2022 con la elaboración de la "Hoja de Ruta de Eficiencia Energética 2050".

## 5. ALGUNAS REFLEXIONES Y CONCLUSIONES

En esta sección se resumen las principales ideas del trabajo y se presenta una serie de conclusiones y reflexiones orientadas a facilitar la toma de decisiones de los distintos agentes sobre las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial en los próximos años.

*El concepto de eficiencia energética, entendido en sentido amplio, debe incluir la eficiencia técnica y económica, el impacto medioambiental y otros beneficios no energéticos o medioambientales*

Aunque tradicionalmente el concepto de eficiencia energética se ha interpretado desde el punto de vista técnico (relación entre *inputs* y *output*) o bien económico (utilización de la energía de la manera más coste-eficiente para producir bienes y servicios), en los últimos tiempos se tiende a interpretar este concepto desde un punto de vista más general, incorporando en el análisis objetivos como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o la mejora en la seguridad de suministro (Marchi et al., 2019).

La tendencia, imparable, a avanzar en la valoración económica (explícita) del coste de las emisiones de GEI (World Bank, 2020) y los objetivos cada vez más exigentes de reducción de las emisiones de las mismas en todo el mundo, hacen que la valoración de la viabilidad y del impacto de las inversiones en equipamientos, tecnologías y procesos orientados a mejorar la eficiencia en el uso de la energía deba incluir los aspectos medioambientales (valor de las emisiones evitadas o coste evitado por las empresas industriales). La eficiencia energética se entiende, entonces, como un instrumento más para alcanzar ventajas competitivas y, al mismo tiempo, como una herramienta para avanzar en el proceso de descarbonización del sector industrial.

*La eficiencia energética jugará un rol cada vez más relevante de en la transición energética y en la transformación del sector industrial en uno más sostenible*

En la actualidad, las actividades ligadas a la mejora en la eficiencia energética tienen un peso cada vez mayor en la economía. En EE.UU., por ejemplo, existían 2,4 millones de empleos en este subsector en 2019 (NASEO y EFI, 2020). En la UE, puede existir un nivel similar de empleos directa o indirectamente relacionados con la eficiencia energética (Cambridge Econometrics, 2015a, 2015b).

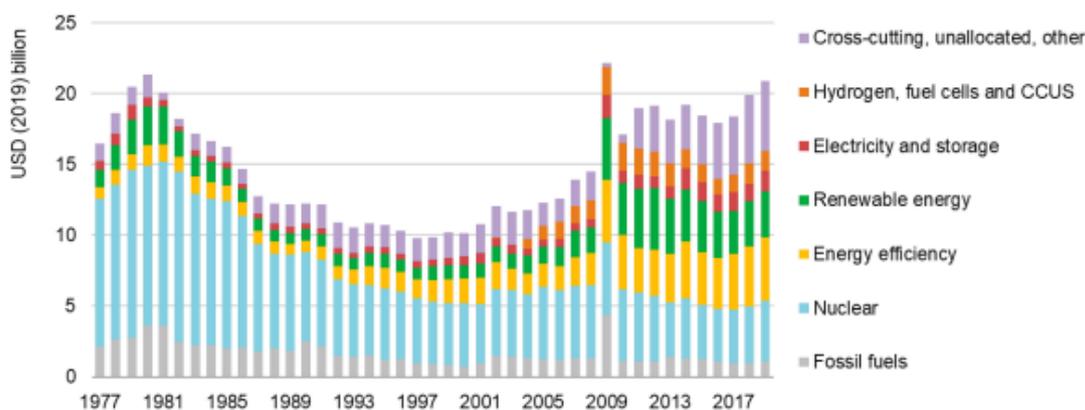
Existe una visión cada vez más generalizada entre los distintos agentes del sector energético sobre el papel protagonista y con creciente relevancia que jugará a lo largo de las próximas décadas la eficiencia energética en la transición energética y en la transformación de las economías en economías sostenibles y con cero emisiones netas.

Así, la descarbonización del sector industrial global en el medio y largo plazo, en un contexto de decrecimiento limitado en el consumo de energía en términos absolutos<sup>62</sup>, requerirá la combinación de tres tipos de soluciones (IEA, 2020c):

- a) incremento generalizado de la eficiencia energética;
- b) aumento de la penetración de las energías renovables en el mix de usos finales;
- c) desarrollo de nuevas tecnologías limpias (p. ej., baterías avanzadas que faciliten la electrificación de consumos finales, soluciones de captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub>, tecnologías del hidrógeno y bioenergía).

La creciente importancia de la eficiencia energética como herramienta de cambio de los sistemas energéticos se refleja en mayores niveles de inversión, tanto privada como pública, en tecnologías y soluciones para mejorar la eficiencia energética y en actividades de I+D relacionadas (Figura 15). Así, la AIE prevé que las inversiones aumenten en 2025-2030 hasta 2,5 veces respecto de los niveles observados en 2015-2020 (IEA, 2020, World Energy Model).

**Figura 15. Gasto público en I+D por tecnología energética**



Fuente: IEA (2020c).

*Las inversiones en eficiencia energética tendrán efectos beneficiosos para el medio ambiente y la economía, también en el corto plazo*

El impacto esperado sobre el medio ambiente de las mejoras de eficiencia energética como herramienta de cambio en los sistemas energéticos es significativo en todos los sectores económicos, incluyendo los sectores industriales, que contribuirán de manera similar al sector del transporte y el sector de edificación y equipos y electrodomésticos a la caída esperada en

<sup>62</sup> En el Escenario de Desarrollo Sostenible (Sustainable Development Scenario) de la AIE, el consumo global de energía en el sector industrial alcanzaría en 2070 3.077 Mtep (-6,1 % respecto de los 3.278 Mtep de consumo en 2019) (IEA, 2020c).

la demanda de energía en las próximas décadas (IEA, 2020b) y a la mejora de la intensidad energética de todos los procesos productivos.

Las mejoras en eficiencia energética en el sector industrial generarán un impactos positivos sobre el medio ambiente y sobre la economía (tanto macroeconómicos como microeconómicos), además de diversos beneficios “no energéticos” adicionales (ver la Sección 3.2), incluyendo efectos sociales relacionados con la reducción de la pobreza energética y la mejora en el acceso a la energía.

En el **ámbito medioambiental**, la evidencia empírica disponible sugiere que tanto el ahorro energético como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> observadas y ligadas a inversiones en eficiencia energética coste-eficientes pueden situarse por encima del 10 % en la mayor parte de los sectores industriales, alcanzando valores muy superiores en algunos casos (p. ej., industria del papel y la impresión). Resulta significativo que estos valores se sitúan por debajo del potencial técnico de reducción del consumo de energía, que puede situarse según algunos estudios entre el 20 % y el 30 % en la mayor parte de los sectores industriales.

En el **plano macroeconómico**, se espera que las inversiones en eficiencia energética generen un impacto relevante sobre la actividad económica y el empleo tanto en el medio y largo plazo como en el corto plazo. De hecho, los programas orientados a mejorar la intensidad energética de los distintos sectores forman parte protagonista de los programas de recuperación económica post-Covid 19 en la Unión Europea, en España y en el País Vasco.

Las estimaciones de instituciones públicas y la evidencia académica disponible sugieren que estos impactos en términos de PIB y empleo serán significativos a medio plazo, en el horizonte 2030. Además, en el corto plazo, la AIE espera que los programas de inversiones anunciados para dar respuesta a la crisis del coronavirus den lugar a la creación de hasta unos 230.000 empleos en el conjunto del sector industrial europeo (EIA, 2020e).

Por otra parte, estudios recientes indican que la rentabilidad de las inversiones en eficiencia energética es muy elevada, tanto en términos de empleo (casi 8 empleos netos por cada millón de dólares invertido; Garrett-Peltier, 2017) como en términos económicos y medioambientales; Ungar et al., 2020).

En el **plano microeconómico** no existe tanta evidencia empírica sobre el efecto sobre la productividad y la competitividad empresarial e industrial de mejoras en la eficiencia energética, en parte debido a la dificultad de medir los efectos directos e indirectos de estas mejoras y a otros aspectos como el “efecto rebote”. Sin embargo, tanto los análisis cualitativos como cuantitativos disponibles sugieren un impacto significativo sobre la productividad de las empresas industriales, especialmente en los sectores más intensivos en energía, como el sector del hierro y el acero, y con periodos de recuperación de las inversiones inferior a un año, en muchos casos (Filippini et al., 2020).

Los beneficios de mejoras en la eficiencia energética relacionados con la competitividad, tanto de la economía en conjunto como de las empresas industriales, están especialmente relacionados con la innovación tecnológica (tecnologías más eficientes y con menores emisiones e impacto medioambiental), el avance en la implementación de soluciones digitales

y basadas en la explotación de *big data*, inteligencia artificial y automatización, etc., (lo que se conoce como “industria 4.0”), además de con la utilización de nuevos materiales en los procesos productivos y la innovación no tecnológica (nuevas formas de organización, nuevos procesos, servitización, etc.).

Finalmente, entre los **beneficios no energéticos** de las inversiones en eficiencia energética cabe destacar la mejora de las condiciones y la seguridad laboral y, en general, del bienestar de los trabajadores (p. ej., derivados de mejor iluminación, menores niveles de contaminación acústica, control de temperatura y calidad del aire, etc.), las implicaciones (positivas) sobre la salud de menores residuos y sustancias peligrosas, menores emisiones y menores niveles de contaminación y, desde el punto de vista de las empresas, beneficios reputacionales y de imagen y menores riesgos legales y comerciales.

*Existen tecnologías maduras y soluciones tecnológicas que pueden permitir mejorar la eficiencia energética de forma significativa en el sector industrial en los próximos años, con un impacto potencial positivo sobre la competitividad industrial*

Las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial pueden centrarse en la sustitución o adaptación de equipamientos físicos, el cambio o desarrollo de nuevos procesos de producción (y otros procesos empresariales e industriales), los cambios en las fuentes de energía o en una mejor utilización de los materiales en los procesos productivos, incluyendo nuevos materiales innovadores.

En todas estas áreas existen tecnologías y soluciones tecnológicas maduras y en fase de comercialización que pueden facilitar la captura de niveles significativos de ganancias en la eficiencia energética.

Así, la evidencia disponible sugiere que la ganancia potencial de eficiencia técnica en la mayor parte de los sectores industriales más intensivos en energía puede situarse en una horquilla entre el 10 % y el 30 % (Cambridge Econometrics, 2015a; ICF Consulting, 2015), dependiendo del sector, aunque cuando se introducen parámetros financieros y económicos (i.e., el precio de la energía y el coste de las inversiones), la ganancia potencial de eficiencia energética baja significativamente y se sitúa por debajo del 10 %.

Entre las tecnologías que pueden ofrecer la mayor rentabilidad (relación entre ganancias de eficiencia y tiempo de recuperación de la inversión) se encuentran los sistemas de control integral de procesos y los contadores por intervalos, que facilitan la optimización del uso de la energía, los sistemas de monitorización de gases o los quemadores de alta eficiencia (Tabla 12). Resultan también rentables las inversiones en sistemas de gestión de energía y los equipamientos que optimizan los procesos de combustión, de utilización de calor y de recuperación de gases.

**Tabla 12. Ganancias potenciales de eficiencia energética de distintos sistemas y equipamientos industriales con periodos de *payback* cortos**

Nivel de ganancias de eficiencia	Sistemas y equipamientos industriales
Ganancias de eficiencia bajas	Revisión y reparación de trampas de vapor Mantenimiento preventivo de hornos
Ganancias de eficiencia medias	Recuperación de gases (en hornos y calderas) Sistemas de gestión de la energía (EMS) Control avanzado de procesos de calor en hornos Optimización de la combustión (hornos)
Ganancias de eficiencia altas	Monitorización de gas cloro (hornos y calderas) Quemadores de alta eficiencia (hornos)
Ganancias de eficiencia muy altas	Sistemas de control integral Contadores por intervalos

*Fuente: ICF Consulting (2015).*

Otras inversiones, como sistemas de control avanzados con ajustes de velocidad automáticos (en bombas, ventiladores, motores, etc.) generan también ganancias de eficiencia significativas en distintas industrias, aunque requieren mayores periodos de recuperación de las inversiones.

En cualquier caso, debe destacarse que el impacto de las inversiones en eficiencia energética y, por tanto, su rentabilidad, varía significativamente entre sectores y procesos productivos y las condiciones concretas de cada caso (sector industrial, tecnologías desplegadas, marco regulatorio, entorno macro y microeconómico), por lo que no todas las soluciones son exportables de una industria a otra.

Este tipo de estudios y evidencia empírica sugiere criterios para la priorización de los recursos disponibles para implementar programas de inversiones en eficiencia energética, tanto por parte de las empresas como por parte de la Administración.

*Para materializar los beneficios potenciales de una mayor eficiencia energética y avanzar en la descarbonización en la industria deberán afrontarse y resolverse retos en distintas dimensiones: (a) tecnológica; (b) financiera; (c) regulatoria; (d) modelos de negocio.*

Pese a la existencia de tecnologías maduras y disponibles en el mercado, no se materializa un nivel suficiente de inversión en eficiencia energética por parte de las industrias más intensivas en energía y en emisiones de GEI para avanzar rápidamente en la descarbonización de estos sectores.

Cambiar esta tendencia requerirá superar el llamado “energy efficiency gap” y conseguir que las empresas industriales inviertan en eficiencia energética porque lo consideren óptimo desde el punto de vista de un análisis coste-beneficio. Para ello, deberán afrontarse y

superarse retos tecnológicos, financieros, regulatorios y relacionados con los modelos de negocio en los próximos años.

### ***Reto 1. Impulso de las actividades de I+D+i relacionadas con nuevos combustibles y nuevas tecnologías limpias y eficientes***

La descarbonización del sector industrial requerirá desarrollos tecnológicos e innovación (tanto tecnológica como no tecnológica –o referida al diseño de procesos, organización de las actividades empresariales e industriales, diseño de productos, nuevos servicios...) que permitan acometer, de forma rentable, transformaciones

Para entender dónde deben centrarse los esfuerzos de innovación, deben tenerse en cuenta las siguientes cuestiones:

- La mayor parte de las emisiones en el sector industrias se concentran en unos pocos sectores, intensivos en energía (hierro y acero, metales no ferrosos –especialmente, aluminio--, química y petroquímica y minerales no metálicos, como el cemento).
- Las soluciones más rentables para alcanzar mejoras en eficiencia energética en la industria (p. ej., sistemas de control de procesos, sistemas de gestión de energía, optimización de los procesos de calor con baja y media temperatura) ya se han implementado en muchos lugares y en muchos sectores, aunque queda camino por recorrer. La aplicación de estas soluciones no es suficiente para descarbonizar el sector industrial.
- Por otra parte, las soluciones de eficiencia energética en el sector industrial son muy específicas para cada sector, debido a la heterogeneidad en los procesos productivos.
- La sustitución de combustibles fósiles, la captura, almacenamiento y uso de CO<sub>2</sub> y la reutilización de calor residual de alta temperatura aparecen como las vías más prometedoras para desarrollar soluciones de gran escala que permitan reducir las emisiones en la industria, especialmente en los sectores más intensivos en energía.

IRENA (2020) identifica algunas de las vías de desarrollo tecnológico más prometedoras en sectores industriales clave en términos de consumo de energía y emisiones, como el sector del cemento, el químico y petroquímico, el del hierro y el acero o el del aluminio.

Las reducciones potenciales de emisiones de CO<sub>2</sub> pueden tener lugar en los procesos de combustión de combustibles fósiles que dan lugar a calor de proceso (bien a través de agua caliente, vapor o calor directo), en procesos industriales específicos o bien durante el ciclo de vida de los productos industriales (p. ej., emisiones fugitivas de disolventes, lubricantes, incineración de plásticos, etc.)

La Tabla 13 resume algunas de las vías para reducir las emisiones directas en los cuatro sectores industriales señalados anteriormente. Además de mejorar la eficiencia de los equipamientos actuales, los esfuerzos de I+D+i deberían enfocarse a áreas como la sustitución de combustibles fósiles por energías renovables, biocombustibles o hidrógeno, la electrificación de procesos y el desarrollo de soluciones de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 13. Alternativas tecnológicas para reducir emisiones en algunos sectores industriales intensivos en energía**

<b>Cemento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El principal proceso emisor de CO<sub>2</sub> es la producción de las escorias mediante procesos de calcinación con temperaturas muy elevadas (&gt; 1000 °C).</li> <li>• La alternativa a las escorias en la producción de cemento podrían ser nuevos materiales metálicos cementosos (p. ej., basados en cobalto, titanio o níquel) y nuevas fórmulas para el cemento. Pero el desarrollo de estos nuevos materiales está aún en fases tempranas del proceso de innovación.</li> <li>• En ausencia de materiales alternativos a las escorias, la captura, almacenamiento y uso (CCUS) de CO<sub>2</sub> parece la única opción viable en el corto plazo para descarbonizar este sector. La utilización de CCUS puede combinarse con el uso de biocombustibles (y generar emisiones negativas).</li> <li>• Otras vías para descarbonizar este sector es la utilización de hornos más eficientes, sustituir combustibles fósiles por biocombustibles o residuos y la utilización de motores y otros equipamientos más eficientes en otros procesos (extracción, trituración, molienda, etc.)</li> </ul>
<b>Químico y petroquímico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La industria química orgánica utiliza procesos de craqueo a vapor de combustibles fósiles para producir olefinas. En la producción de productos químicos inorgánicos (cloruros, fosfatos) se consume menos energía y pueden electrificarse los procesos.</li> <li>• El uso de hidrógeno verde podría ayudar a descarbonizar el sector sustituyendo los combustibles fósiles. Para producir combustibles sintéticos se debe utilizar CO<sub>2</sub> (nitrógeno, en el caso del amoníaco) mediante procesos de captura directa o bien desde instalaciones de almacenamiento de CO<sub>2</sub> procedente de biocombustibles o combustibles fósiles.</li> <li>• El desarrollo de nuevos materiales plásticos que capturan (y fijan) CO<sub>2</sub> o carbono y de bioplásticos (a partir de caña de azúcar o almidón) y la adopción de procesos más circulares también puede contribuir a descarbonizar esta industria.</li> </ul>
<b>Hierro y acero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta industria supuso el 9 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> en 2017. Las emisiones provienen principalmente de la quema de coques en hornos de alta temperatura para fundir el mineral de hierro y producir arrabio.</li> <li>• Existen varias vías para descarbonizar estos procesos. P. ej., la utilización de hidrógeno verde en los hornos permite reducir las emisiones y esta tecnología empieza a aplicarse en distintos lugares<sup>63</sup>.</li> <li>• Otras opciones son la utilización de electricidad procedente de fuentes renovables para alimentar hornos de arco eléctrico, la aplicación de soluciones de CCUS, aunque no es económica todavía, o el uso de biocombustibles que sustituyan al coque.</li> </ul>
<b>Aluminio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las emisiones directas están relacionadas con la producción de alúmina a partir de bauxita, basada en combustibles fósiles, principalmente, y en otros procesos. El procesamiento de la alúmina para producir aluminio supone el 80 % de la energía utilizada (en forma de electricidad, mayoritariamente). Por tanto, la mayor parte de las emisiones son indirectas.</li> <li>• La reducción potencial de emisiones está relacionada con mejoras en la eficiencia de los procesos de electrolisis y fundición y en la reducción en la tasa de emisiones implícita en la electricidad utilizada, que podría reducirse con la reubicación de plantas de producción.</li> <li>• Otras fuentes de reducción de emisiones son la utilización de biocombustibles en los procesos de producción de alúmina a baja y media temperatura o el reciclado y reutilización de materiales.</li> <li>• Los hornos de fundición se pueden utilizar también como "baterías virtuales" para la integración de energía eléctrica de origen renovable (eólica, fotovoltaica)<sup>64</sup>.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia a partir de IRENA (2020).

<sup>63</sup> Ver Gielen et al. (2020).

<sup>64</sup> Ver [https://www.trimet.eu/en/ueber\\_trimet/energiewende/virtuelle-batterie](https://www.trimet.eu/en/ueber_trimet/energiewende/virtuelle-batterie).

## ***Reto 2: Desarrollo de nuevos esquemas y nuevos productos de financiación de inversiones en eficiencia energética***

El segundo gran reto para superar el *“energy efficiency gap”* consiste en asegurar que las empresas industriales puedan acceder a recursos e instrumentos de financiación para llevar a cabo las inversiones en proyectos y actividades que den lugar a mejoras en la eficiencia energética<sup>65</sup>.

Crear un contexto de financiación favorable para estas inversiones puede lograrse a través de actuaciones que generen innovación financiera a lo largo de distintas dimensiones, incluyendo: (a) la mejora en los procesos de identificación, clasificación y evaluación de proyectos relevantes en términos de sostenibilidad (i.e., *“proyectos sostenibles”*); (b) la mejora o mitigación del riesgo crediticio de las empresas; (c) el desarrollo y la aplicación de nuevos esquemas de asignación de riesgos entre agentes participantes en las transacciones; (d) el desarrollo y la utilización de nuevos instrumentos de financiación.

Un marco adecuado para la **evaluación del impacto de los proyectos de eficiencia energética** contribuirá a movilizar capital y recursos, tanto públicos como privados, para financiar nuevas inversiones, ya que las instituciones financieras y los inversores, en general, serán capaces de identificar y valorar de forma adecuada las oportunidades que plantean los distintos proyectos.

En este sentido, el Plan de Acción de Finanzas Sostenibles de la UE estableció una serie de acciones orientadas a fortalecer el ecosistema de financiación de proyectos sostenibles entre las que se incluían<sup>66</sup>: (1) el desarrollo de un sistema de clasificación unificado (*“taxonomía”*) que defina lo que son actividades e inversiones sostenibles; (2) la creación de etiquetas para productos financieros *“verdes”* a partir de la taxonomía; (3) la obligación sobre gestores de activos e inversores institucionales de tener en cuenta la sostenibilidad en el proceso de inversión; (4) la obligación sobre empresas de seguros y de inversión a que asesoren a sus clientes sobre la base de sus preferencias en materia de sostenibilidad; (5) la integración de la sostenibilidad en los requisitos prudenciales para bancos y compañías de seguros; y (6) un aumento de la transparencia de los informes corporativos.

El Reglamento (UE) <sup>67</sup> 2020/852, de junio de 2020, ofrece un conjunto de criterios que pueden utilizar las Administraciones y las empresas para *“a determinar si una actividad económica se considera medioambientalmente sostenible a efectos de fijar el grado de sostenibilidad medioambiental de una inversión”* y para el desarrollo de productos financieros o emisiones de renta fija privada que se ofrezcan como *“medioambientalmente sostenibles”*. Las actividades medioambientalmente sostenibles contribuyen a al menos uno de seis objetivos

---

<sup>65</sup> Junto a esto, las empresas deberán trabajar en eliminar las barreras o restricciones internas (organizativas y operativas) que dificultan la ejecución de proyectos de eficiencia energética.

<sup>66</sup> Ver [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP\\_18\\_1404](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_18_1404).

<sup>67</sup> Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2020 relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/2088.

medioambientales (mitigación del cambio climático, adaptación al cambio climático, uso sostenible y protección de recursos hídricos y marinos, transición hacia una economía circular, prevención y control de la contaminación y protección y recuperación de la biodiversidad y los ecosistemas). La eficiencia energética adquiere en este Reglamento un protagonismo notable, al ser considerada uno de los pilares de la transición hacia una energía más limpia (Artículo 19.2).

El primer Reglamento Delegado<sup>68</sup> que complementa al Reglamento (UE) 2020/852, desarrollando los dos primeros objetivos (mitigación y adaptación al cambio climático), en proceso de debate en el momento de elaborar este informe, desarrolla criterios técnicos específicos (por sector y actividad) para identificar bajo qué condiciones una actividad económica contribuye de manera significativa a la mitigación del cambio climático, a la adaptación al cambio climático y no afecta negativamente a los otros objetivos medioambientales. Los anexos a este Reglamento Delegado incluyen un amplio listado de actividades concretas que pueden calificarse como “sostenibles” en diversos sectores, incluyendo el sector de la manufactura y, dentro de él, subsectores como el de la fabricación de tecnologías relacionadas con las energías renovables, equipamientos para la producción de hidrógeno, tecnologías de bajas emisiones para el transporte, eficiencia energética en edificios, otras tecnologías bajas en emisiones, producción de cemento, hierro y acero y aluminio, producción de hidrógeno, producción de negro de carbon (*carbon black*), carbonato de sodio, cloro, compuestos de química orgánica básica, amoniaco anhidro (puro), ácido nítrico y plásticos primarios.

La **mitigación o reducción del riesgo de crédito de las empresas** es otra vía para impulsar las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial y superar el “energy efficiency gap”. Esto puede llevarse a cabo mediante nuevos esquemas de garantías (p. ej., garantías ofrecidas por la Administración o por instituciones especializadas en la gestión del riesgo de crédito –p. ej., Elkargi<sup>69</sup>, en la CAPV--), nuevos esquemas de seguros que cubren determinados niveles de ganancias en eficiencia energética (Tatje, 2016), o instrumentos de cobertura de riesgos más complejos con cláusulas ligadas a determinadas contingencias.

Por otro lado, se estudian, dentro de los programas de investigación de la Unión Europea<sup>70</sup> **soluciones innovadoras de financiación basadas en esquemas de agregación** que faciliten el cruce (*matching*) entre la demanda y la oferta de financiación de proyectos de eficiencia energética, bien a través de agregadores de proyectos o de entidades que centralicen la información sobre la oferta y la demanda en distintos ámbitos (mercados

---

<sup>68</sup> Ver [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12302-Climate-change-mitigation-and-adaptation-taxonomy#ISC\\_WORKFLOW](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12302-Climate-change-mitigation-and-adaptation-taxonomy#ISC_WORKFLOW). Este Reglamento Delegado se basa, en parte, en el trabajo realizado por el grupo de expertos de la UE sobre finanzas sostenibles. Ver EU Technical Expert Group on Sustainable Finance (2019).

<sup>69</sup> Ver <https://www.elkargi.es/es>.

<sup>70</sup> Ver, por ejemplo, <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/lc-sc3-ee-9-2018-2019>.

regionales, nacionales o supranacionales), con el objetivo de reducir el riesgo de los proyectos de eficiencia energética.

La **innovación en los instrumentos de financiación** será muy relevante para favorecer las inversiones en eficiencia energética en el sector industriales en los próximos años. La tipología de nuevos productos y servicios financieros en el área de las inversiones sostenibles o verdes está creciendo muy rápidamente en los últimos años.

Fernández y Larrea (2021), por ejemplo, exploran el universo de productos de financiación verde (*green financing*) en la actualidad y las opciones para desarrollar un entorno local adecuado para financiar inversiones en actividades y proyectos sostenibles. Además de los esquemas de financiación tradicionales (basados en fondos propios o en deuda), está incrementándose el número de instrumentos innovadores entre los que se pueden incluir desde productos estructurados ofrecidos por entidades financieras hasta bonos verdes, subsidios a la innovación con posibilidad de conversión en deuda o fondos propios (e. g., convertible grants – ver Spiess-Knafl y Scheck (2017)--), esquemas de financiación innovadores basados en resultados que repartan riesgos entre los proyectistas y las empresas (p. ej., esquemas de ahorros garantizados o compartidos), esquemas *on-bill financing*<sup>71</sup>, esquemas de financiación parcial basados en las obligaciones fiscales de las empresas<sup>72</sup> o esquemas de financiación basados en *factoring* o *forfeiting*<sup>73</sup>.

Otros esquemas de financiación innovadores pueden ir ligados a la asignación de derechos sobre ingresos o beneficios (p. ej., esquemas de intercambio de capital por una cuota de ingresos o beneficios), nuevos esquemas de monetización de activos (p. ej., *tolling agreements* o establecimiento de *joint ventures* para la explotación de instalaciones orientadas a mejorar la eficiencia energética) o esquemas basados en servitización (p. ej., como los de “*cooling as a service*” comentados en este trabajo).

### **Reto 3: Actualización de los marcos normativos y regulatorios**

El tercer gran reto que debe superarse para fomentar las inversiones en eficiencia energética en el sector industrial está relacionado con los esquemas normativos y regulatorios que definen el marco de incentivos y normativo de dichas inversiones.

Pese a la proliferación de esquemas regulatorios para impulsar las inversiones en eficiencia energética (p. ej., auditorías energéticas, despliegue de contadores, obligaciones relativas a la puesta en marcha de sistemas de gestión de energía, ganancias de eficiencia energética, esquemas de incentivos económicos y fiscales, certificados blancos, sistemas de

---

<sup>71</sup> Los comercializadores de energía (o agregadores) financian inversiones a través de recargos en las facturas energéticas.

<sup>72</sup> P. ej., esquemas en los que una parte del coste de las inversiones se recupera a través de incentivos integrados en herramientas fiscales.

<sup>73</sup> *Forfeiting* hace referencia a la venta (por parte de un promotor o empresa de servicios energéticos, ESE) de pagarés u otros documentos legales de obligación de pago a una institución financiera, que asume el riesgo de impago. Los esquemas de *factoring* son similares a los de *forfeiting*, excepto que la responsabilidad de reclamar el cobro la asume el promotor (o la ESE). Ver Enerinvest (2018).

ecoetiquetado, etc. -- ver la Sección 4.2), queda aún mucho camino por recorrer en el proceso de descarbonización del sector industrial (Fawkes et al., 2016).

Así, las medidas normativas y regulatorias tradicionales no serán suficientes para avanzar en la descarbonización del sector industrial a la velocidad necesaria. Sin embargo, experiencias pasadas muestran que un diseño adecuado del marco normativo puede dar lugar a resultados positivos en términos de la limitación de emisiones de sustancias contaminantes y gases de efecto invernadero en el sector industrial. Por ejemplo, la emisión de sustancias nocivas para la capa de ozono<sup>74</sup> se redujo sustancialmente tras la firma del Acuerdo de Montreal y el desarrollo de esquemas normativos para su desarrollo e implementación (IRENA, 2020).

La experiencia acumulada en los últimos años debe servir para identificar cuáles son las recetas con mayor probabilidad de éxito. La Agencia Internacional de la Energía ha analizado la efectividad de programas de fomento de la eficiencia energética --ver IEA (2020e)--, concluyendo que **las nuevas políticas deberán, a la vez, aprovechar los elementos que funcionan en los esquemas actuales y ser suficientemente innovadoras**. Esto se traduce en una serie de principios:

- ampliar (con una cantidad significativa de fondos) los programas existentes para maximizar el impacto en el corto plazo;
- incentivar la adopción de tecnologías y soluciones comercialmente maduras y disponibles que puedan implementarse sin inversiones adicionales (e. g., *plug-and-play*).
- fomentar la estandarización de contratos, soluciones, tecnologías, etc.
- reducir barreras regulatorias asociadas a inversiones en el ámbito industrial (p .ej., relacionadas con la planificación y el desarrollo de soluciones;
- establecer objetivos ambiciosos teniendo en cuenta la realidad de mercado (en el lado de la demanda y de la oferta) y tecnológica;
- fijar incentivos suficientemente elevados para inducir inversión sin dar lugar a ciclos excesivamente marcados de inversión;
- incentivar las soluciones de economía circular (reducción de residuos y reutilización de materiales, etc.).

Además, resultará óptimo **utilizar un conjunto de instrumentos variados** para poder afrontar con garantías la heterogeneidad de procesos y tecnologías en el sector industrial. Entre estos se incluyen ayudas económicas o incentivos fiscales, subastas para alcanzar economías de escala, programas de renovación de equipamientos obsoletos, programas de financiación a través de las facturas energéticas o de las obligaciones fiscales, estándares de

---

<sup>74</sup> Entre ellas, se incluyen los clorofluorocarbonos (CFC), halones, otros CFC completamente halogenados, tetracloruro de carbono, metilcloroformo, hidroclorofluorocarbonos (HCFC), hidrobromofluorocarbonos (HBFC), bromoclorometano, metilbromuro y hidrofluorocarbonos (HFC).

eficiencia en el ámbito industrial, o programas dirigidos y con apoyo público para realizar avances en sectores difíciles de descarbonizar y con tecnologías innovadoras.

La **alineación de las políticas y estrategias de I+D+i con los objetivos energéticos y medioambientales, teniendo en cuenta la realidad local** (p. ej., la estrategia de especialización inteligente RIS3 y la estrategia PCTI en la CAPV) es otro factor que contribuirá a desarrollar soluciones innovadoras a los retos de la industria teniendo en cuenta sus características y el contexto tecnológico, económico y empresarial.

Por otro lado, deberá asegurarse la efectividad de los programas y la eficiencia en términos de costes. Esto implica evaluar en qué áreas resultará más eficiente invertir recursos públicos que actúen como impulsores de las inversiones privadas. Así, **la asignación de los recursos disponibles, públicos y privados, debe tener en cuenta la rentabilidad esperada** (económica y medioambiental) de las inversiones, como ha indicado recientemente el Tribunal de Cuentas Europeo (Tribunal de Cuentas Europeo, 2020).

Finalmente, **existen sinergias y una fuerte interrelación con otras nuevas tecnologías, especialmente las relacionadas con las TIC**, tanto en el plano tecnológico (desarrollo de nuevas soluciones que incorporan elementos de automatización, inteligencia artificial, etc.) como en el plano normativo-regulatorio (p. ej., el uso de *blockchain* puede incrementar la eficiencia de los esquemas de certificados blancos y reducir sus costes de implementación – ver Khatoon, Verma, Southernwood, Massey, & Corcoran (2019).

Un aspecto muy relevante para el diseño de esquemas óptimos de fomento de la eficiencia energética es el desarrollo y utilización de herramientas de evaluación y medida que permitan analizar correctamente los impactos de inversiones en determinados equipamientos, procesos y tecnologías y establecer un *"level playing field"* para evitar efectos no deseados sobre la competitividad de los distintos sectores industriales y de las empresas.

Así, políticas basadas en obligaciones sobre las empresas de alcanzar determinados niveles de ganancias de eficiencia (o de reducción de emisiones) deben ser capaces de medir y establecer *benchmarks* que permitan identificar y evaluar correctamente los impactos derivados de programas de eficiencia energética. Para ello, deberán mejorarse los procesos de recogida, transparencia y recolección de datos sobre emisiones de CO<sub>2</sub>, por ejemplo (IEA, 2020k), y desarrollarse metodologías de *benchmarking* de la eficiencia energética y las emisiones de GEI en los procesos industriales en sectores intensivos en energía y emisiones (como el aluminio, cemento, hierro y acero, etc.), una vieja aspiración de la industria (IEA, 2007b).

#### **Reto 4: Innovación no tecnológica, nuevos procesos y nuevos modelos de negocio**

Un reto adicional asociado a las mejoras en la eficiencia energética en el sector industrial es aprovechar las oportunidades que genera el contexto actual de cambio y la necesidad de avanzar en la transformación del sistema energético en uno con cero emisiones netas.

Las inversiones en equipamientos orientados a mejorar la eficiencia energética, en tecnologías limpias y en energías renovables y en soluciones digitales y el uso de *big data* y

*data analytics* para optimizar los procesos de producción y logísticos y el uso de materiales y energía abren la puerta a la adaptación de las propuestas de valor y de los modelos de negocio en múltiples dimensiones.

Entre ellas, cabe destacar las siguientes, que están dando lugar a líneas de investigación innovadoras en el mundo académico:

- Introducción de procesos más circulares en las instalaciones industriales (van Loon et al., 2021).
- Reordenación de las cadenas de valor y captura de ganancias de eficiencia ligadas a infraestructuras, procesos y recursos compartidos y a nuevas formas de operación, colaboración y relación B2B (*business-to-business*) y B2C (*business-to-customer*) (Marchi y Zanoni, 2017; Marchi et al., 2018).
- Servitización de activos y adopción de nuevas formas de operación y de financiación de activos (Hao et al., 2020).
- Innovación en productos y servicios relacionada con el uso masivo de datos y de herramientas analíticas (IEA, 2019a, 2019b).
- Innovación en productos y servicios más sostenibles (i. e., con menor huella medioambiental) (Gerstlberger et al., 2014).
- Generación de nuevo conocimiento y nuevas capacidades ligadas al desarrollo de la “industria 4.0” y a la sostenibilidad (Nota et al., 2020).

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allcott, H. y Greenstone, M. (2012). Is There an Energy Efficiency Gap? *Journal of Economic Perspectives*, 26 (1), 3–28. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.26.1.3>
- Álvaro, R., Larrea, M. y Álvarez, E. (2018). *Autoconsumo eléctrico. Normativa actual y experiencias internacionales de promoción del autoconsumo*. Cuadernos Orkestra 2018/39. Orkestra-Instituto Vasco de Competitividad, Donostia-San Sebastián. Recuperado de: [https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/Alvaro\\_Larrea\\_Alvarez\\_Autoconsumo\\_Electrico.pdf](https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/Alvaro_Larrea_Alvarez_Autoconsumo_Electrico.pdf)
- Álvaro, R. y Menéndez, J. (2020). *Casos de microrredes*. Cuadernos Orkestra 73/2020. Orkestra-Instituto Vasco de Competitividad, Donostia-San Sebastián. Recuperado de: <https://www.orkestra.deusto.es/es/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/2031-200028-casos-microrredes>
- Banfi, S., Farsi, M., Filippini, M. & Jakob, M. (2008). Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics*, 30 (2), 503-516. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.06.001>
- Barthélémy, H. (2012). Hydrogen storage – Industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (22), 17364-17372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.121>
- Barthélémy, H., Weber, M. y Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (11), 7254-7262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- BASE. (2019). Scaling up clean and efficient cooling technologies around the world [página web]. BASE. <https://energy-base.org/projects/cooling-as-a-service-initiative/>
- Bhadbhade, N., Jibrán, M., Zuberi, S. & Patel, M. K. (2019). A bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction potentials for the swiss metals sector. *Energy*, 181, 173-186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.172>.
- Bhadbhade, N. & Patel, M. K. (2020). Analysis of energy efficiency improvement and carbon dioxide abatement potentials for Swiss Food and Beverage sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104967. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104967>.
- BMWi. (2014). *National Action Plan on Energy Efficiency*. Recuperado de: [https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/nape-national-action-plan-on-energy-efficiency.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/nape-national-action-plan-on-energy-efficiency.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Brunke, J. C. & Markus, B. (2014). A plant-specific bottom-up approach for assessing the cost-effective energy conservation potential and its ability to compensate rising energy-related costs in the German iron and steel industry. *Energy Policy*, 67, 431–446. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.024>
- Bühler, F., Müller Holm, F. & Elmegaard, B. (2019). Potentials for the electrification of industrial processes in Denmark. *Proceedings of Ecos 2019 – The 32<sup>nd</sup> International*

- Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Wroclaw (Polonia), 23-28 de junio. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/336552827\\_Potentials\\_for\\_the\\_electrification\\_of\\_industrial\\_processes\\_in\\_Denmark](https://www.researchgate.net/publication/336552827_Potentials_for_the_electrification_of_industrial_processes_in_Denmark)
- Bull, J., Gupta, A., Mumovic, D. & Kimpian, J. (2014). Life cycle cost and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3 (1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2014.07.002>
- Cambridge Econometrics. (2015a). *Assessing the Employment and Social Impact of Energy Efficiency. Final report. Volume 1: Main report*. Cambridge Econometrics, Cambridge. Recuperado de:  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CE\\_EE\\_Jobs\\_main%2018Nov2015.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CE_EE_Jobs_main%2018Nov2015.pdf)
- Cambridge Econometrics. (2015b). *Assessing the Employment and Social Impact of Energy Efficiency. Final report. Volume 2: Appendices*. Cambridge Econometrics, Cambridge. Recuperado de:  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CE\\_EE\\_Jobs\\_appendices%2018Nov2015.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CE_EE_Jobs_appendices%2018Nov2015.pdf)
- Cao, J., Garbaccio, R. y Ho, M. S. (2009). China's 11th Five-Year Plan and the Environment: Reducing SO Emissions. *Review of Environmental Economics and Policy*, 3 (2), 231-250. <https://doi.org/10.1093/reep/rep006>
- Chang, B., Kang, S. J. & Jung, T. Y. (2019). Price and Output Elasticities of Energy Demand for Industrial Sectors in OECD Countries. *Sustainability*, 11 (6), 1786. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1786/pdf>
- Chiaroni, D., Chiesa, M., Chiesa, V., Franzò, S., Frattini, F. & Toletti, G. (2016). Introducing a new perspective for the economic evaluation of industrial energy efficiency technologies: An empirical analysis in Italy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 15, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.02.004>
- Comisión Europea. (2016). *The Macroeconomic and Other Benefits of Energy Efficiency. Final report*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de:  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final\\_report\\_v4\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_v4_final.pdf)
- Comisión Europea. (2020a). *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifica el Reglamento (UE) 2018/1999 («Ley del Clima Europea»)*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=EN>
- Comisión Europea. (2020b). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Un nuevo modelo de industria para Europa. COM/2020/102 final*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1593086905382&uri=CELEX:52020DC0102>

- Comisión Europea (2020c). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva. COM(2020) 98 final*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0018.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF)
- Comisión Europea (2020d). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Impulsar una economía climáticamente neutra: Una Estrategia de la UE para la Integración del Sistema Energético. COM(2020) 299 final*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0299&from=EN>
- Compton, M., Willis, S., Rezaie, B. & Humes, K. (2018). Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.001>
- Craglia, M. & Cullen, J. (2020). Do vehicle efficiency improvements lead to energy savings? The rebound effect in Great Britain. *Energy Economics*, 88, 104775. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104775>
- Davis, L. W., Fuchs, A. y Gertler, P. (2014). Cash for Coolers: Evaluating a Large-Scale Appliance Replacement Program in Mexico. *American Economic Journal: Economic Policy*, 6 (4), 207-238. <http://dx.doi.org/10.1257/pol.6.4.207>.
- de Boer, R. (2016). *Thermal Energy Storage in industrial processes. Contribution to energy efficiency, energy flexibility and increasing the share of renewable energy*. ECN L-16-034. Recuperado de: <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-L--16-034>.
- Doppiu, S. (s. f.). Thermal Energy Storage technologies for industrial heat processes [artículo web]. *CiC energiGune*. Recuperado de <https://cicenergigune.com/en/thermal-energy-storage-technologies-industrial-heat-process>.
- Druckman, A., Chitnis, M., Sorrell, S. & Jackson, T. (2011). Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households. *Energy Policy*, 39 (6), 3572-3581. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.058>
- EEA. (2020a). *EU on track to meet greenhouse gas emissions and renewable energy 2020 targets, progress in 2019 shows more ambitious long-term objectives are reachable* [artículo en web]. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-on-track-to-meet/>
- EEA. (2020b). *Trends and projections in Europe 2020. Tracking progress towards Europe's climate and energy targets. EEA Report No 13/2020*. Publications Office of the European Union, Luxemburgo. Recuperado de: [https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2020/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2020/at_download/file)
- Enerinvest. (2018). *Guía para la financiación de proyectos de energía sostenible*. Recuperado de: <https://www.ecoserveis.net/wp-content/uploads/2019/04/guia-para-la-financiacion-de-proyectos-de-energia-sostenible-2a-edicion.pdf>.

- EPA. (2018) *Quantifying the Multiple Benefits of Energy Efficiency and Renewable Energy. A Guide for State and Local Governments*. EPA, Washington, DC.  
[https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/epa\\_slb\\_multiple\\_benefits\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/epa_slb_multiple_benefits_508.pdf)
- European Commission. (2011). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Energy Efficiency Plan 2011*. COM(2011) 109 final. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:EN:PDF>
- European Commission (2019a). *COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2019/1658 of 25 September 2019 on transposing the energy savings obligations under the Energy Efficiency Directive*. Comisión Europea, Bruselas. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019H1658&from=EN>
- European Commission (2019b). *EUROPEAN COMMISSION Brussels, 25.9.2019 C(2019) 6621 final ANNEX to Commission Recommendation on transposing the energy savings obligations under the Energy Efficiency Directive*. Comisión Europea, Bruselas.  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c\\_2019\\_6621\\_-\\_annex\\_com\\_recom\\_energy\\_savings.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c_2019_6621_-_annex_com_recom_energy_savings.pdf)
- European Commission. (2020a). *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS PART 1/2. Stepping up Europe's 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Brussels, 17.9.2020 SWD(2020) 176 final*. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/eu-climate-action/docs/impact\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/eu-climate-action/docs/impact_en.pdf)
- European Commission. (2020b). *Review of the Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency. Combined Evaluation Roadmap / Inception Impact Assessment. Ref. Ares (2020) 4101900*. Recuperado de: <https://eurovent.eu/sites/default/files/field/file/GEN%20-%20201155.01%20-%20EED%20Review%20Combined%20Evaluation%20Roadmap%20-%20Inception%20Impact%20Assessment.pdf>
- European Parliament y European Council. (2012). *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance*. Publications Office of the European Union, Luxemburgo. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>
- EU Technical Expert Group on Sustainable Finance. (2019). *Taxonomy Technical Report*. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business\\_economy\\_euro/banking\\_and\\_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy_en.pdf).

- EVE. (2020). *Euskadi Energia 2018*. Ente Vasco de la Energía, Bilbao. Recuperado de:  
<https://eve.eus/CMSPages/GetFile.aspx?guid=bced6fe4-8f03-40cf-8acd-5d12e6ef5acc>
- Fawkes, S., Oung, K., Thorpe, D., Zhu, X. (ed.), de la Rue du Can, S. (dd.), & Farrell, T. C. (ed.) (2016). *Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement: An Introduction for Policy Makers*. UNEP DTU Partnership, Copenhagen. Recuperado de:  
[https://orbit.dtu.dk/files/127152472/Best Practises for Industrial EE web 1 .pdf](https://orbit.dtu.dk/files/127152472/Best_Practises_for_Industrial_EE_web_1_.pdf)
- Fernández, J. y Álvaro, R. (2019). *El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV*. Cuadernos Orkestra 61/2019. Orkestra-Instituto Vasco de Competitividad, Donostia-San Sebastián. Recuperado de:  
<https://www.orkestra.deusto.es/es/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/1835-sector-almacenamiento-energia-electrica-capv>
- Fernández, J., Álvaro, R. y Menéndez, J. (2021, próxima publicación). *Perspectivas de desarrollo de un mercado global de hidrógeno. Implicaciones para la CAPV*. Cuadernos Orkestra. Orkestra-Instituto Vasco de Competitividad, Donostia-San Sebastián.
- Fernández, J. y Larrea, M. (2021, próxima publicación). Fostering Green Financing at the Subnational Level. The Case of the Basque Country. *Ekonomiaz-Revista Vasca de Economía*.
- Filippini, M., Geissmann, T., Karplus, V. J. & Zhang, D. (2020). The productivity impacts of energy efficiency programs in developing countries: Evidence from iron and steel firms in China. *China Economic Review*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2019.101364>
- Fowlie, M., Greenstone, M. & Wolfram, C. (2018). Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program. *The Quarterly Journal of Economics*, 133 (3), 1597–1644, <https://doi.org/10.1093/qje/qjy005>
- Garrett-Peltier, G. (2017). Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model. *Economic Modelling*, 61, 439-447. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2016.11.012>
- Gerarden, T. D., Newell, R. G. & Stavins, R. N. (2017). Assessing the Energy-Efficiency Gap. *Journal of Economic Literature*, 55 (4), 1486-1525.  
<https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jel.20161360>
- Gerstlberger, W., Præst Knudsen, M. & Stampe, I. (2014), Sustainable Development Strategies for Product Innovation and Energy Efficiency. *Business Strategy and the Environment*, 23 (2), 131-144. <https://doi.org/10.1002/bse.1777>
- Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E., & Birat, J. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24 (5), 1113-1125. <https://www.doi.org/10.1111/jiec.12997>
- Gillingham, K., Newell, R. G. & Palmer, K. L. (2009). Energy Efficiency Economics and Policy. *Annual Review of Resource Economics*, 1, 597–620.  
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234>.

- Gillingham, K. & Palmer, K. L. (2014). Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8 (1), 18–38. <http://dx.doi.org/10.1093/reep/ret021>.
- Giraudet, L. G. & Houde, S. (2016). *Double Moral Hazard and the Energy Efficiency Gap*. Evidence for Action on Energy Efficiency (E2e) Working Paper 9. Recuperado de: <http://e2e.haas.berkeley.edu/pdf/workingpapers/WP009.pdf>
- Giraudet, L. G., Bourgeois, C. & Quirion, P. (2018). *Long-term efficiency and distributional impacts of energy saving policies in the French residential sector*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01890642>.
- Giraudet, L. G. & Missemmer, A. (2019). *The Economics of Energy Efficiency, a Historical Perspective*. CIRED Working Paper nº 2019-74. Recuperado de: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02301636/document>
- Gobierno de Alemania. (2020). *Integrated National Energy and Climate Plan Pursuant to the REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the governance of the energy union and climate action, amending Directive 94/22/EC, Directive 98/70/EC, Directive 2009/31/EC, Regulation (EC) No 663/2009, Regulation (EC) No 715/2009, Directive 2009/73/EC, Council Directive 2009/119/EC, Directive 2010/31/EU, Directive 2012/27/EU, Directive 2013/30/EU and Council Directive (EU) 2015/652 and repealing Regulation (EU) No 525/2013*. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/de\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/de_final_necp_main_en.pdf)
- Gobierno de Francia. (2020). *INTEGRATED NATIONAL ENERGY AND CLIMATE PLAN for FRANCE March 2020*. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_final_necp_main_en.pdf)
- Gobierno Vasco. (2020). *Berpiztu. Programa para la Reactivación Económica y el Empleo de Euskadi, 2020-2024*. Recuperado de: [https://bideoak2.euskadi.eus/debates/debate\\_1283/Berpiztu\\_es.pdf](https://bideoak2.euskadi.eus/debates/debate_1283/Berpiztu_es.pdf)
- Greening, L. A., Greene, D. L. & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy*, 28 (6–7), 389-401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5).
- Gruber, A., Biedermann, F. & von Roon, S. (2015). Industrielles Power-to-Heat Potenzial. En 9. *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, 1–20. Recuperado de: [https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/517\\_iewt15\\_ag\\_p2h\\_ind/FfE\\_AG\\_i\\_nd\\_p2h\\_potenzial\\_IJWT2015\\_lang.pdf](https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/517_iewt15_ag_p2h_ind/FfE_AG_i_nd_p2h_potenzial_IJWT2015_lang.pdf)
- Hao, Z., Liu, C. & Goh, M. (2021). Determining the effects of lean production and servitization of manufacturing on sustainable performance. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 374-389. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.018>
- Hassett, K. A. & Metcalf, G. E. (1993). Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly? *Energy Policy*, 21 (6), 710-716. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90294-P](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90294-P)

- Hassett, K. A., Metcalf, G. E. (1995). Investment under alternative return assumptions: comparing random walks and mean reversion. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 19 (8), 1471–1488. [https://doi.org/10.1016/0165-1889\(94\)00838-9](https://doi.org/10.1016/0165-1889(94)00838-9)
- Hausman, J. & Joskow, P. (1982). Evaluating the Costs and Benefits of Appliance Efficiency Standards. *American Economic Review*, 72 (2), 220–225. <https://www.jstor.org/stable/1802332>
- Hers, S., Afman, M., Cherif, S. & Rooijers, F. (2015). *Potential for Power-to-Heat in the Netherlands. Technical report 3.E04.1*. CE Delft. Recuperado de: [file:///C:/Users/jorgefernandez/Downloads/CE Delft 3E04 Potential for P2H in Netherlands\\_DEF.pdf](file:///C:/Users/jorgefernandez/Downloads/CE Delft 3E04 Potential for P2H in Netherlands_DEF.pdf)
- HM Government. (2017). *Clean Growth Strategy*. Recuperado de: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/700496/clean-growth-strategy-correction-april-2018.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/700496/clean-growth-strategy-correction-april-2018.pdf)
- Houde, S., & Aldy, J. E. (2014). *Belt and Suspenders and More: The Incremental Impact of Energy Efficiency Subsidies in the Presence of Existing Policy Instruments*. National Bureau of Economic Research Discussion Paper RFF DP 14-34. Recuperado de: <https://media.rff.org/archive/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-14-34.pdf>
- Hrovatin, N., Dolšak, N. & Zorić, J. (2016). Factors impacting investments in energy efficiency and clean technologies: empirical evidence from Slovenian manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, 127, 475-486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.039>
- ICF Consulting. (2015) *STUDY ON ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING POTENTIAL IN INDUSTRY AND ON POSSIBLE POLICY MECHANISMS* Contract No. ENER/C3/2012-439/S12.666002, 1 December 2015. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/151201%20DG%20ENER%20Industrial%20EE%20study%20-%20final%20report\\_clean\\_stc.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/151201%20DG%20ENER%20Industrial%20EE%20study%20-%20final%20report_clean_stc.pdf)
- IEA. (2007a). *Mind the Gap: Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency*. IEA, París. <https://doi.org/10.1787/9789264038950-en>
- IEA. (2007b). *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*. Recuperado de: <https://webstore.iea.org/tracking-industrial-energy-efficiency-and-co2-emissions>
- IEA. (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. IEA, París. Recuperado de: [https://webstore.iea.org/download/direct/375?fileName=Multiple\\_Benefits\\_of\\_Energy\\_Efficiency.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/375?fileName=Multiple_Benefits_of_Energy_Efficiency.pdf)
- IEA. (2015). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. <https://www.iea.org/reports/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency>
- IEA. (2019a). *Energy Efficiency 2019*. Recuperado de: <https://webstore.iea.org/download/direct/2891>.
- IEA. (2019b). *Energy efficiency and digitalization* [artículo en web]. IEA. Recuperado de: <https://www.iea.org/articles/energy-efficiency-and-digitalisation>

- IEA. (2020a). *World Energy Outlook 2020*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IEA (2020b) Recommendations of the Global Commission for Urgent Action on Energy Efficiency <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d40d5638-1f45-42ac-b072-fe9e6417cc1e/Global-Commission-Recommendations.pdf>
- IEA (2020c). *Energy Technology Perspectives. Special Report on Clean Energy Innovation*. IEA, París. Recuperado de:  
[https://webstore.iea.org/download/direct/4022?fileName=Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2020\\_-\\_Special\\_Report\\_on\\_Clean\\_Energy\\_Innovation.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/4022?fileName=Energy_Technology_Perspectives_2020_-_Special_Report_on_Clean_Energy_Innovation.pdf)
- IEA. (2020d). World Energy Model [página web]. Recuperado el 26 de noviembre de 2020 de:  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-model/sustainable-development-scenario>
- IEA. (2020e). *Energy efficiency and economic stimulus*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://www.iea.org/articles/energy-efficiency-and-economic-stimulus>
- IEA. (2020f). *Energy Efficiency 2020*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>
- IEA. (2020g). *Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://webstore.iea.org/download/direct/4191>
- IEA. (2020h). *The Role of CCUS in Low-Carbon Power Systems*. IEA, París. Recuperado de:  
[https://webstore.iea.org/download/direct/4028?fileName=The\\_role\\_of\\_CCUS\\_in\\_low-carbon\\_power\\_systems.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/4028?fileName=The_role_of_CCUS_in_low-carbon_power_systems.pdf)
- IEA. (2020i). *Germany 2020 Energy Policy Review*. IEA, París. Recuperado de:  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/germany-2020-energy-policy-review.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/germany-2020-energy-policy-review.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- IEA. (2020j). *World Energy Investment 2020*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://webstore.iea.org/download/direct/3003>
- IEA. (2020k). *Tracking Industry 2020*. IEA, París. Recuperado de:  
<https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>
- IEA. (2021a). *Energy Technology Perspectives 2020. Revised Version February 2021*. IEA, París. Recuperado de: <https://webstore.iea.org/download/direct/4165>
- IEA. (2021b). *Is carbon capture too expensive?* IEA, París. Recuperado de:  
<https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- IEA-ECES. (2018). *Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition – Benchmarks and Developments*. IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage (IEA-ECES). Recuperado de: <https://www.eces-a30.org/wp-content/uploads/Applications-of-Thermal-Energy-Storag-in-the-Energy-Transition-Annex-30-Report.pdf>

- IEA-ETSAP e IRENA. (2013). *Thermal Energy Storage Technology Brief*. ETSAP and IRENA Technology Brief E17. Recuperado de: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E17-Thermal-Energy-Storage.pdf>.
- INE. (2019). *Encuesta de Consumos Energéticos 2017. Datos definitivos* [nota de prensa]. Recuperado de: [https://www.ine.es/prensa/ece\\_2017.pdf](https://www.ine.es/prensa/ece_2017.pdf)
- Interempresas. (2019, 27 de noviembre). Nuevos materiales para el almacenamiento de energía térmica [artículo web]. *Interempresas*. Recuperado de: <https://www.interempresas.net/Instaladores/Articulos/259860-Nuevos-materiales-para-el-almacenamiento-de-energia-termica.html>.
- IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*. Recuperado de: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- Jaffe, A. B., Newell, R. G. & Stavins, R. N. (2004). Economics of Energy Efficiency. En Cutler J. Cleveland (ed.), *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 79-90. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00228-X>
- Joskow, P. L. (1994). More from the guru of energy efficiency: 'there must be a pony!'. *The Electricity Journal*, 7 (4), 50–61. [https://doi.org/10.1016/1040-6190\(94\)90140-6](https://doi.org/10.1016/1040-6190(94)90140-6)
- Khatoun, A., Verma, P., Southernwood, J., Massey, B. & Corcoran, P. (2019). Blockchain in Energy Efficiency: Potential Applications and Benefits. *Energies*, 12 (17), 3317. <https://doi.org/10.3390/en12173317>
- Koomey, J. G. & Sanstad, A. H. (1994). Technical evidence for assessing the performance of markets affecting energy efficiency. *Energy Policy*, 22, 826-832. <https://ideas.repec.org/a/eee/enepol/v22y1994i10p826-832.html>
- Kulmer, V. & Seebauer, S. (2019). How robust are estimates of the rebound effect of energy efficiency improvements? A sensitivity analysis of consumer heterogeneity and elasticities. *Energy Policy*, 132, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.001>.
- Lavoie, Y., Danet, F. & Lombard, B. (2017). Lithium-ion batteries for industrial applications. *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, Calgary, AB, 283-290 <https://doi.org/10.1109/PCICON.2017.8188747>
- Linares, P. & Labandeira, X. (2010). Energy Efficiency: Economics and Policy. *Journal of Economic Surveys*, 24 (3), 573–592. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2009.00609.x>.
- Liu, H., Du, K. & Li, J. (2019). An improved approach to estimate direct rebound effect by incorporating energy efficiency: A revisit of China's industrial energy demand. *Energy Economics*, 80, 720-730. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.02.012>
- Maher, J. (2016). *Measuring the Accuracy of Engineering Models in Predicting Energy Savings from Home Retrofits: Evidence from Monthly Billing Data*. National Socio-Environmental Synthesis Center. Annapolis, MD. Recuperado de: <https://cenrep.ncsu.edu/cenrep/wp-content/uploads/2016/08/Maher.pdf>

- Mai, T., Jadun, P., Logan, J., McMillan, C., Muratori, M., Steinberg, D., Vimmerstedt, L., Jones, R., Haley, B. & Nelson, B. (2018). *Electrification Futures Study: Scenarios of Electric Technology Adoption and Power Consumption for the United States*. National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-6A20-71500. Golden, CO.  
<https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71500.pdf>.
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Egilegor, B., Al-Mansour, F., Ahmad, L., & Pusnik, M. (2020). Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 208, 118398. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118398>
- Maloney, P. (2017, 27 de noviembre). The Commercial and Industrial Microgrid: A Growing Number of Corporations Going Green [artículo de blog]. *Microgrid Knowledge*. Recuperado de: <https://microgridknowledge.com/commercial-and-industrial-microgrid/>
- Marchi, B. & Zanoni, S. (2017). Supply Chain Management for Improved Energy Efficiency: Review and Opportunities. *Energies*, 10, 1618. <https://doi.org/10.3390/en10101618>
- Marchi, B.; Zanoni, S.; Ferretti, I.; Zavanella, L.E. (2018). Stimulating Investments in Energy Efficiency Through Supply Chain Integration. *Energies*, 11, 858.  
<https://doi.org/10.3390/en11040858>
- Marchi, B., Zanoni, S. y Ferretti, I. (2019). Energy Efficiency Investments in Industry with Uncertain Demand Rate: Effects on the Specific Energy Consumption. *Energies*, 13 (1), 1-14. <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v13y2019i1p161-d303073.html>.
- McKinsey. (2007, 1 de febrero). A cost curve for greenhouse gas reduction [artículo en web]. *McKinsey*. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-cost-curve-for-greenhouse-gas-reduction>
- McKinsey. (2009a). *Pathways to a Low-Carbon Economy. Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*. Recuperado de:  
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Pathways%20to%20a%20low%20carbon%20economy/Pathways%20to%20a%20low%20carbon%20economy.ashx>.
- McKinsey. (2009b). *Unlocking Energy Efficiency in the US Economy*. Recuperado de:  
[https://www.sallan.org/pdf-docs/MCKINSEY\\_US\\_energy\\_efficiency.pdf](https://www.sallan.org/pdf-docs/MCKINSEY_US_energy_efficiency.pdf)
- McKinsey (2010). *Impact of the Financial Crisis on Carbon Economics. Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*. Recuperado de:  
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Impact%20of%20the%20financial%20crisis%20on%20carbon%20economics%20Version%202.1/Impact%20of%20the%20financial%20crisis%20on%20carbon%20economics%20Version%202.1.pdf>
- McKinsey. (2017, 21 de abril). A revolutionary tool for cutting emissions, ten years on [artículo en web]. *McKinsey*. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/about-us/new-at-mckinsey-blog/a-revolutionary-tool-for-cutting-emissions-ten-years-on>

- Metcalf, G. E. & Hassett, K. A. (1999). Measuring the Energy Savings from Home Improvement Investments: Evidence from Monthly Billing Data. *Review of Economics and Statistics*, 81 (3), 516–528. <http://dx.doi.org/10.1162/003465399558274>.
- Meyers, S., Schmitt, B., Chester-Jones, M. & Sturm, B. (2016). Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries *Energy*, 104, 266-283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.117>
- Miller, J. E., Lyons, F., Christiansen, E. L. & Lear, D. M. (2017). Failure mechanisms of Ni-H2 and Li-Ion batteries under hypervelocity impacts. *Procedia Engineering*, 204, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.731>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018). *The Multiannual Energy Plan*. Recuperado de: [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages\\_PPE\\_GB\\_DEF\\_Web.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages_PPE_GB_DEF_Web.pdf)
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019). *Report from France In accordance with Article 24(1) and (2) of Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency 2019 update*. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr\\_anual\\_report\\_2019\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_anual_report_2019_en.pdf)
- Miró, L., Gasia, J. & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. *Applied Energy*, 179, 284-301. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.147>.
- MITECO. (2020). *Borrador Actualizado del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. Recuperado de: [https://www.miteco.gob.es/images/es/pniec\\_2021-2030\\_borradoractualizado\\_tcm30-506491.pdf](https://www.miteco.gob.es/images/es/pniec_2021-2030_borradoractualizado_tcm30-506491.pdf).
- Mohy-Ud-Din, G., Vu, D. H., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2020). An Integrated Energy Management Approach for the Economic Operation of Industrial Microgrids under Uncertainty of Renewable Energy. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2964635>
- Morrow, W. R., Hasanbeigi, A., Sathaye, J. & Xu, T. (2014). Assessment of energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. *Journal of Cleaner Production*, 65, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.022>
- Murty, V. V. S. N. & Kumar, A. (2020). Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5 (2). <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0147-z>
- NASEO y EFI. (2020). *2020 U.S. Energy & Employment Report. Executive Summary*. NASEO & EFI. Recuperado de: <https://static1.squarespace.com/static/5a98cf80ec4eb7c5cd928c61/t/5ee783fe8807d732d560fcdd/1592230915051/2020+USEER+EXEC+0615.pdf1>

- Nota, G., Nota, F. D., Peluso, D. & Toro Lazo, A. (2020). Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes. *Sustainability*, 12 (16), 6631.  
<https://doi.org/10.3390/su12166631>
- Obersteiner, M., Azar, Ch., Kauppi, P., Möllersten, K., Moreira, J., Nilsson, S., Read, P., Riahi, K., Schlamadinger, B., Yamagata, Y., Yan, J. y van Ypersele, J.-P. (2001). Managing Climate Risk. *Science*, 294 (5543), pp. 786-787. <https://doi.org/10.1126/science.294.5543.786b>
- OECD. (2012). *The Jobs Potential of a Shift Towards a Low-Carbon Economy. Final Report for the European Commission DG Employment*. OECD, París. Recuperado de:  
<https://www.oecd.org/els/emp/50503551.pdf>
- Otto, A., Robinius, M., Grube, T., Schiebahn, S., Praktiknjo, A. & Stolten, D. (2017). Power-to-Steel: Reducing CO2 through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry. *Energies*, 10, 451. <https://doi.org/10.3390/en10040451>
- Prag, A. (2018). *The IEA Sustainable Development Scenario*. IEA, presentación en Katowice, 6 de diciembre de 2018. Recuperado de:  
[https://www.ieta.org/resources/COP24/Misc%20Media%20Files/Dec6/SE12%20\(2\).pdf](https://www.ieta.org/resources/COP24/Misc%20Media%20Files/Dec6/SE12%20(2).pdf)
- Presidencia del Gobierno. (2020). *Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*. Recuperado de:  
[https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/07102020\\_PlanRecuperacion.pdf](https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/07102020_PlanRecuperacion.pdf)
- Rasmussen, J. (2017). The additional benefits of energy efficiency investments—a systematic literature review and a framework for categorisation. *Energy Efficiency*, 10, 1401–1418.  
<https://doi.org/10.1007/s12053-017-9528-1>
- REE. (2020). *Informe del Sistema Eléctrico Español 2019*. Red Eléctrica de España, Madrid. Recuperado de:  
[https://www.ree.es/sites/default/files/11\\_PUBLICACIONES/Documents/InformesSistemaElctrico/2019/inf\\_sis\\_elec\\_ree\\_2019\\_v2.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documents/InformesSistemaElctrico/2019/inf_sis_elec_ree_2019_v2.pdf)
- Rohdin, P. & Thollander, P. (2006). Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy*, 31 (12), 1836-1844.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.010>
- Sanstad, A. H., Hanemann, W. M. & Auffhammer, M. (2006). End-Use Energy Efficiency in a 'post- Carbon' California Economy. En *Managing Greenhouse Gas Emissions in California*, ed. por W. Michael Hanemann y Alexander E. Farrell. The California Climate Change Center at UC Berkeley, Berkeley, CA. Recuperado de: <http://s3-us-west-2.amazonaws.com/uclcdc-nuxeo-ref-media/732a0754-436d-460b-877b-0ffadd5bab0f>
- Sarbu, I. y Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability* 2018, 10, 191. doi:10.3390/su10010191. Recuperado de:  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191/pdf>.

- Schüwer, D. & Schneider, C. (2018). *Electrification of industrial process heat: long-term applications, potentials and impacts*. Recuperado de:  
[https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/eceee\\_Industrial\\_Summer\\_Study/2018/4-technology-products-and-system-optimisation/electrification-of-industrial-process-heat-long-term-applications-potentials-and-impacts/2018/4-051-18\\_Schuewer.pdf/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2018/4-technology-products-and-system-optimisation/electrification-of-industrial-process-heat-long-term-applications-potentials-and-impacts/2018/4-051-18_Schuewer.pdf/)
- Sicard, F. & Escudero, M. (2012). *White certificates in France: the difficulty to standardize energy savings from an energy efficiency action - illustration through the micro-modulating burner case*. ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 855-859. Recuperado de:  
[https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/eceee\\_Industrial\\_Summer\\_Study/2012/6-the-role-of-financing-to-improve-industrial-efficiency-global-perspective/white-certificates-in-france-the-difficulty-to-standardize-energy-savings-from-an-energy-efficiency-action-8211-illustration-through-the-micro-modulating-burner-case/2012/6-129-12\\_Sicard.pdf/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2012/6-the-role-of-financing-to-improve-industrial-efficiency-global-perspective/white-certificates-in-france-the-difficulty-to-standardize-energy-savings-from-an-energy-efficiency-action-8211-illustration-through-the-micro-modulating-burner-case/2012/6-129-12_Sicard.pdf/)
- Sorrell, S., Dimitriopolous, J. & Sommerville, M. (2009). *Empirical estimates of direct rebound effects: A review*. *Energy Policy*, 37 (4), 1356-1371.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.026>.
- Sorrell, S., Mallett, A. & Nye, S. (2011). *Barriers to industrial energy efficiency: A literature review*. UNIDO Working Paper 10/2011. UNIDO, Viena. Recuperado de:  
[http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/53957/1/WP102011\\_Barriers\\_to\\_Industrial\\_Energy\\_Efficiency\\_-\\_A\\_Literature\\_Review.pdf](http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/53957/1/WP102011_Barriers_to_Industrial_Energy_Efficiency_-_A_Literature_Review.pdf)
- Spieß-Knafl, W. & Scheck, B. (2017). Financing Instruments and Transactions. In: *Impact Investing. Palgrave Studies in Impact Finance*. Palgrave Macmillan, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-66556-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66556-6_5).
- Sutherland, R. (1991). Market Barriers to Energy-Efficiency Investments. *The Energy Journal*, 12 (3), 15-34. <http://www.jstor.org/stable/41322426>
- Tatje, C. (2016). *Energy Efficiency Protect - insurance for energy efficiency guarantees*. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE) Summer Proceedings 5-100-16. Recuperado de:  
[https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/eceee\\_Industrial\\_Summer\\_Study/2016/5-business-models-and-financing-established-practice-and-innovative-approaches/energy-efficiency-protect-insurance-for-energy-efficiency-guarantees/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2016/5-business-models-and-financing-established-practice-and-innovative-approaches/energy-efficiency-protect-insurance-for-energy-efficiency-guarantees/).
- Train, K. (1985). Discount Rates in Consumers' Energy-Related Decisions: A Review of the Literature. *Energy*, 10 (12), 1243-53. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(85\)90135-5](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(85)90135-5).
- Trianni, A. & Cagno, E. (2012). Dealing with Barriers to Energy Efficiency and SMEs: Some Empirical Evidences. *Energy*, 37 (1), 494-504.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.005>.

- Trianni, A., Cagno, E., Worrell, E. & Pugliese, G. (2013). Empirical investigation of energy efficiency barriers in Italian manufacturing SMEs. *Energy*, 49, 444-458.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.012> .
- Tribunal de Cuentas Europeo. (2020). *Eficiencia energética en los edificios: es necesario insistir más en la rentabilidad*. Recuperado de:  
[https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20\\_11/SR\\_Energy\\_efficiency\\_in\\_buildings\\_ES.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_11/SR_Energy_efficiency_in_buildings_ES.pdf)
- Tsemekidi Tzeiranaki S., Bertoldi P., Labanca N., Castellazzi L., Ribeiro Serrenho T., Economidou M. & Zangheri P. (2018). *Energy consumption and energy efficiency trends in the EU-28 for the period 2000-2016*. EUR 29473 EN. Publications Office of the European Union, Luxemburgo. <http://dx.doi.org/10.2760/574824>
- Tsemekidi Tzeiranak, S., Bertoldi, P., Paci, D., Castellazzi, L., Ribeiro Serrenho, T., Economidou, M. y Zangheri, P. (2020). *Energy Consumption and Energy Efficiency trends in the EU-28, 2000-2018*. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Recuperado de:  
<https://doi.org/10.2760/847849>
- Ungar, L., Barrett, J. Nadel, S., Elliott, R. N., Rightor, E., Amann, J., Huether, P. & Specian, M. (2020). *Growing a Greener Economy: Job and Climate Impacts from Energy Efficiency Investments*. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC. Recuperado de: <http://www.aceee.org/whitepaper/2020/09/growing-greener-economy-job-and-climate-impacts-energy-efficiencyinvestments>
- Vadillo, J. (2018, 26 de marzo). La mitad de la cogeneración vasca sigue pendiente del cambio normativo. *Cinco Días*. Recuperado de:  
[https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/03/23/companias/1521828719\\_245780.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/03/23/companias/1521828719_245780.html)
- van Loon, P., Diener, D. & Harris, S. (2021). Circular products and business models and environmental impact reductions: Current knowledge and knowledge gaps. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125627>
- van Soest, D. P. & Bulte, E. H. (2001). Does the Energy-Efficiency Paradox Exist? Technological Progress and Uncertainty. *Environmental and Resource Economics*, 18, 101-112.  
<https://doi.org/10.1023/A:101112406964>
- Wood, E. (2017, 21 de agosto). Who Uses Microgrids and Why? [artículo de blog]. *Microgrid Knowledge*. Recuperado de: <https://microgridknowledge.com/microgrids-businesses-institutions/>
- World Bank. (2020). *State and Trends of Carbon Pricing 2020*. World Bank, Washington, DC. doi: 10.1596/978-1-4648-1586-7. Recuperado de:  
<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33809/9781464815867.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Worrell, E., Laitner, J., Ruth, M. & Finman, H. (2003). Productivity Benefits of Industrial Energy Efficiency Measures. *Energy*, 28 (11), 1081-1098. [http://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00091-4](http://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00091-4).

- Worrell, E., Blinde, P., Neelis, M., Blomen, E. & Masanet, E. (2010). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Recuperado de: <https://international.lbl.gov/publications/energy-efficiency-improvement-and-4>
- Yang, L. & Li, J. (2017). Rebound effect in China: Evidence from the power generation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.111>.
- Zhang, D., Aunan, K., Seip, H. M. y Vennemo, H. (2011). The energy intensity target in China's 11th Five-Year Plan period—Local implementation and achievements in Shanxi Province. *Energy Policy*, 39 (7), 4115-4124. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.085>
- Zhang, Y. J., Peng, H. R. & Su, B. (2017). Energy rebound effect in China's Industry: An aggregate and disaggregate analysis. *Energy Economics*, 61, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.11.011>.
- Zivin, J. G. & Novan, K. (2016). Upgrading Efficiency and Behavior: Electricity Savings from Residential Weatherization Programs. *The Energy Journal*, 37 (4). <http://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=2800>.
- Zuberi, M., Shahzad, J. & Patel, M. (2017). Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction potentials in the Swiss cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4294-4309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.178>

## AUTOR

*Jorge Fernández Gómez*

Investigador Sénior y Coordinador del Lab de Energía de Orkestra-IVC desde marzo de 2018. Doctor en Economía y M.A. en Economía por la Universidad de Georgetown (Washington, DC, EE.UU.) y licenciado en Economía por la Universidad Autónoma de Madrid. El objetivo de su actividad como investigador en Orkestra es analizar, desde distintas perspectivas, el impacto de la evolución de los mercados de energía y la regulación de los sectores energéticos sobre la competitividad de la economía, con énfasis en la realidad de la economía vasca.

En el pasado, Jorge fue Director Técnico en Iberian Gas Hub, Director General Adjunto en InterMoney Energía y Consultor en NERA Economic Consulting. A lo largo de su carrera profesional, Jorge ha trabajado en proyectos relacionados con el diseño, el funcionamiento y la regulación de los mercados de energía, el trading y la gestión de riesgos en mercados de energía y la valoración de activos y carteras energéticas.

Jorge ha publicado artículos en revistas especializadas y libros sobre cuestiones relacionadas con el funcionamiento y la regulación de los mercados de energía. Además, ha actuado como ponente en cursos, conferencias y jornadas especializadas relacionadas con el sector energético en España y en otros países.



# Orkestra

INSTITUTO VASCO  
DE COMPETITIVIDAD  
FUNDACIÓN DEUSTO

[www.orquestra.deusto.es](http://www.orquestra.deusto.es)