

La descarbonización de la industria no intensiva en energía

Timo Gerres

Investigador Invitado, Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ETS ICAI, Universidad Pontificia Comillas

1. Introducción

El sector industrial es uno de los pilares de la economía española, y contribuye con un 12,6 % al valor añadido en el país. La estructura del sector ha vivido grandes cambios durante las últimas cuatro décadas, desde su integración en los mercados europeos y globales, marcados por el crecimiento económico y la crisis estructural. Hoy en día, España se encuentra en el grupo de los países con una industria altamente desarrollada y competitiva. Pero ¿qué es la industria y como se pueden caracterizar sus actividades? ¿Por qué la industria se enfrenta un gran periodo de incertidumbre y una transición fundamental en las próximas décadas? Partiendo del compromiso de nuestra sociedad a la bajada de emisiones y la neutralidad climática en 2050¹, caracterizamos a continuación el sector industrial y destacamos los retos principales frente la descarbonización.

¹ Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática («Legislación europea sobre el clima»).

1.1. Una industria basada en fuentes fósiles

El sector industrial transforma recursos físicos en productos finales con una gran variedad en su grado de complejidad. Estas transformaciones necesitan energía en toda la cadena de valor. Esto distingue la producción industrial de otros sectores que crean productos no físicos (como el sector servicios) o que transforman la energía (como el sector energético).

La industria consume proporcionalmente más energía que otras actividades económicas (Figura 1). El sector industrial² en España es responsable del 20,5 % del consumo final de energía, lo que se traduce en una huella de carbono que corresponde al 24,1 % de todas las emisiones directas del país. Sin embargo, el consumo energético, la intensidad energética de los procesos y las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las diferentes actividades industriales son muy heterogéneos. En España, más de la mitad del consumo energético y casi el 80 % de las emisiones de la industria están vinculadas a la producción de materias primas como el acero, cemento, productos petroquímicos, papel y otros productos obtenidos a partir de minerales no metálicos, como el vidrio y la cerámica. Además, para obtener acero, cemento y productos petroquímicos se procesan materiales que contienen carbono (carbón, cal o petróleo, respectivamente) y por lo tanto su producción supone tanto emisiones asociadas al consumo energético («emisiones energéticas») como otras resultantes de reacciones químicas a partir de estas materias («emisiones de proceso»).

El resto de las industrias varían en su intensidad energética y las emisiones asociadas y en total solamente son responsables del 18,9 % de las emisiones directas de la industria (4,6 % de las emisiones totales). Al mismo tiempo, más del 80 % del valor añadido por la industria pertenece de estos sectores menos intensivos de energía y emisiones. La mayoría de estas industrias emiten relativamente pocas emisiones, pero tienen en común que sus insumos son materias primas o productos intermedios compuestos de materias primas con una gran huella de carbono. Por lo tanto, el complejo industrial no puede realizar gran parte de sus actividades sin el consumo directo de energía fósil o el procesamiento de productos hechos con fuentes fósiles.

1.2. Una industria verde y competitiva: los objetivos para 2050

En todo el sector industrial la intensidad energética, y por lo tanto las emisiones directas, se redujo de forma significativa durante las últimas décadas.³ Las reducciones históricas de las emisiones directas se lograron principalmente gracias a la minimización de las pérdidas y las mejoras de eficiencia de los procesos convencionales de producción, en combinación con el cambio de combustibles, de carbón, petróleo y fuel oil a gas natural.

² Sin las actividades relacionado al suministro de energía incluyendo el refino de petróleo y la generación, el transporte y suministro de energía eléctrica y gas natural. Datos del año 2021 publicado por IDAE (2023) y INE (2022).

³ La de la eficiencia energética en el sector industrial en España se mejoró un 26,8 % entre 2002 y 2021 (IDAE, 2023; Odyssee-Mure, 2024).

El compromiso de la neutralidad climática en 2050 cambia de forma fundamental la naturaleza de los esfuerzos necesarios para reducir las emisiones en el sector industrial, porque la mejora de eficiencia o reducción de pérdidas en sí mismas no permiten alcanzar una operación neutra en emisiones. La industria descarbonizada solamente se puede alcanzar con la sustitución de los combustibles fósiles por alternativas renovables y limpias de energía, la implementación de nuevos procesos industriales para evitar emisiones no energéticas y el uso óptimo de las materias primas en una economía circular.

Muchas de las medidas necesarias para reducir las emisiones de la industria aún no se han implementado porque no son económicamente rentables hasta ahora. Una empresa arriesga su competitividad si opta por instalar nuevos procesos más sostenibles, pero con un mayor coste de inversión y operación, que los de su competencia.

1.3. Una transición industrial en el contexto de los mercados globales

El Mercado Único de la UE no es un mercado cerrado. El alto grado de la integración de la economía española y europea en los mercados globales eleva la complejidad de la transición industrial en comparación con otros sectores, ya que los productos fabricados en Europa deberán seguir compitiendo en los mercados globales. Así, se debe mantener la competitividad de la industria en los mercados globales mientras se adhiere a unos objetivos de la descarbonización que posiblemente sean más ambiciosos que en otras partes del mundo.

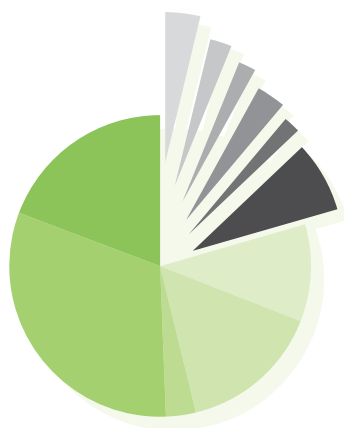
La exposición a los mercados globales distingue la transición industrial de la transición en otros sectores de la economía. Muchos bienes industriales se venden, utilizan o consumen en áreas económicas alejadas de las plantas de producción y sus emisiones. Por otro lado, las emisiones en los sectores de transporte y electricidad se emiten directamente in situ. Coches, camiones, barcos y aviones emiten donde prestan su servicio, mientras la electricidad consumida en la UE se genera casi exclusivamente con plantas de producción que están conectadas a la red europea de transporte de electricidad.

Partiendo de esta caracterización de la industria actual este artículo explora los principales retos para la transformación industrial con el objetivo de ofrecer una visión holística de las tecnologías y su economía (Sección 2) y el rol de la política industrial en la transición (Sección 3). Basado en este análisis se formulan consejos dirigidos al emprendedor industrial preparándose para enfrentar la transición.

Figura 1.

Consumo energético, emisiones y valor añadido bruto de la industria en comparación con otras actividades en España (2021)

Fuente: elaboración propia basada en IDAE (2023); INE (2022).



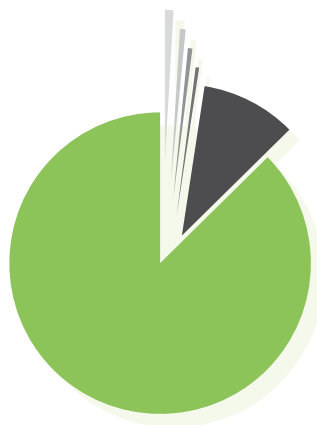
Consumo energético

- Químico y petroquímico (sin refino) (3,8 %)
- Cerámica y vidrio (2,4 %)
- Cemento (1,9 %)
- Metalurgia (3,1 %)
- Pasta y papel (1,8 %)
- Otras industrias (7,6 %)
- Servicios (10,4 %)
- Residencial (15,2 %)
- Agricultura y Pesca (3,2 %)
- Transporte comercial (1,8 %)
- Suministro de energía (19,2 %)



Emisiones directas

- Químico y petroquímico (sin refino) (5,3 %)
- Minerales no metálicos (9,2 %)
- Metalurgia (3,5 %)
- Pasta y papel (1,6 %)
- Otras industrias (4,6 %)
- Servicios (7,6 %)
- Hogares (27,8 %)
- Agricultura y Pesca (5,5 %)
- Transporte comercial (15,2 %)
- Suministro de energía (19,7 %)



Valor añadido bruto

- Químico y petroquímico (sin refino) (0,9 %)
- Minerales no metálicos (0,6 %)
- Metalurgia (0,5 %)
- Pasta y papel (0,4 %)
- Otras industrias (10,2 %)
- Otras actividades económicas (87,4 %)

2. Opciones del sector industrial frente la transición

A día de hoy, la gran mayoría de las industrias genera emisiones directas de CO₂ y, por lo tanto, contribuye al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Sin embargo, los esfuerzos necesarios para evitar estas emisiones directas de los procesos actuales son muy distintos según el tipo de actividad industrial. A continuación, se argumenta que, al afrontar los retos tecnológicos, económicos y regulatorios de la transición, los distintos procesos industriales se pueden agrupar en dos categorías principales: la producción de materias primas no-renovables y todos lo demás. Partiendo de esta agrupación se destacan las soluciones tecnológicas para eliminar las emisiones directas de la industria diferenciando entre las tecnologías específicas en la industria de materias primas y las soluciones altamente estandarizadas para las otras industrias.

2.1. Una propuesta para agrupar sectores industriales

Los sectores industriales se pueden diferenciar por su consumo energético. La producción de materias primas consume más energía que otras actividades industriales. Esta realidad se refleja en el balance energético de España (Figura 1) que es similar al de muchas economías desarrolladas. Se requiere mucha energía térmica con altas temperaturas para producir materias primas en hornos de fundición, con reacciones químicas o con destilación. En la Figura 2 se muestra como gran parte del consumo de energía térmica de estos procesos es con temperaturas superiores a 500 °C, y que pueden alcanzar 1500 °C, por ejemplo, para la producción de acero.

La mayoría de las otras actividades industriales se distingue de la producción de materias primas por su intensidad térmica. A nivel europeo, más de 90 % del consumo térmico del resto de industrias tiene un rango inferior a 200 °C y menos de 5 % de su demanda de energía térmica supera los 1000 °C (Figura 2).⁴ La combustión de energías fósiles es la principal fuente para energía térmica en la industria mientras que la electricidad se utiliza en primer lugar para las otras operaciones. La bioenergía cuenta con un papel relevante en la industria alimentaria y los sectores de pasta y papel y maderero, que se benefician de sus propios residuos y de desechos de origen biológico para fines energéticos.

El mayor uso de las fuentes energéticas de origen fósil implica que las emisiones asociadas a la producción de materias primas son más elevadas por unidad de producto que en otras industrias. Sin embargo, la producción de materias primas es aún más intensiva en emisiones porque otra parte significativa de sus emisiones son emisiones de proceso. Las materias primas con la huella de carbono más elevada tienen en común que el carbono fósil sirve tanto como fuente de energía como input clave para transformar las materias minerales en materias primas.

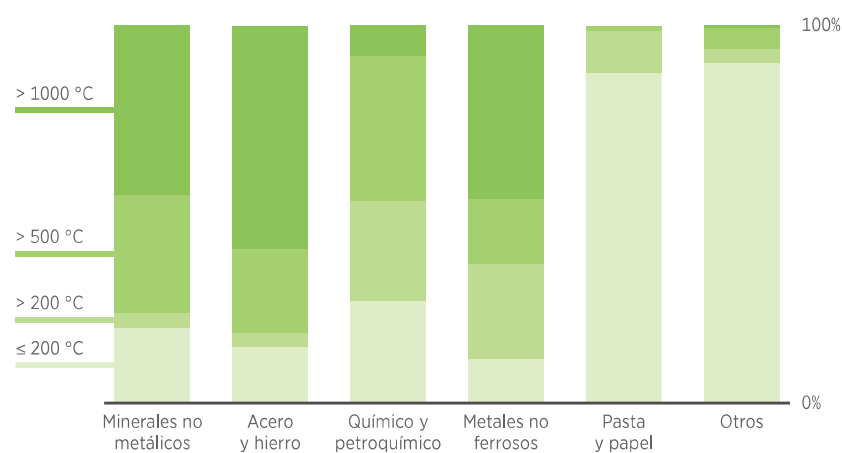
⁴ Otras materias primas como el cobre, níquel o zinc requieren temperaturas de fusión superiores a 1000 °C, en caso del oro alcanzan 2700 °C, y el wolframio 3600 °C. Sin embargo, en comparación con otros minerales, su producción y consumo actual en términos de volumen es marginal, igual que su impacto en las emisiones globales.

La clasificación de la industria en producción de materias primas y el resto también se puede diferenciar por su economía. Las materias primas son bienes fungibles con especificaciones estandarizadas. Los mercados para las materias primas son mercados globales y sus costes para un comprador local corresponden a un precio que se determina según el valor de mercado del producto básico más los costes de transporte. Las características estandarizadas de las materias primas son resultado de unos procesos de producción homogéneos en todo el mundo.⁵

Figura 2.

**Consumo térmico
y rango de temperatura
por industria en la UE**

Fuente: Eurostat
(Kosmadakis, 2019).



Los productores de bienes no fungibles⁶ compiten en el mercado por el valor que los compradores están dispuestos a pagar por características únicas que pueden ser, por ejemplo, físicas, la diferenciación en precios, u otros servicios que se venden en combinación con los productos físicos. Para obtener diferentes características físicas o vender los productos a menor coste, las empresas tienen que optimizar e individualizar su proceso de producción. A diferencia de las industrias que ofrecen productos básicos, existe una gran variedad de procesos de producción. Sin embargo, en su mayoría los equipos que se utilizan están hasta un cierto grado estandarizados. Por ejemplo, las calderas, generadores de vapor, intercambiadores de calor, hornos, motores, sensores, sistemas de carga, máquinas de inyección, mezcladoras, picadoras u otros, se adaptan para los diferentes casos de uso, pero comparten muchos de sus componentes principales y principios de funcionamiento entre distintos sectores industriales.

El consumo energético y las emisiones tienen un impacto en la economía de las diferentes industrias que varía de forma significativa. En industrias como el sector manufacturero, la producción de coches o la industria alimentaria, el consumo energético industrial con un conjunto de equipos parcialmente estandarizados solamente suponía 0,07 € de energía por

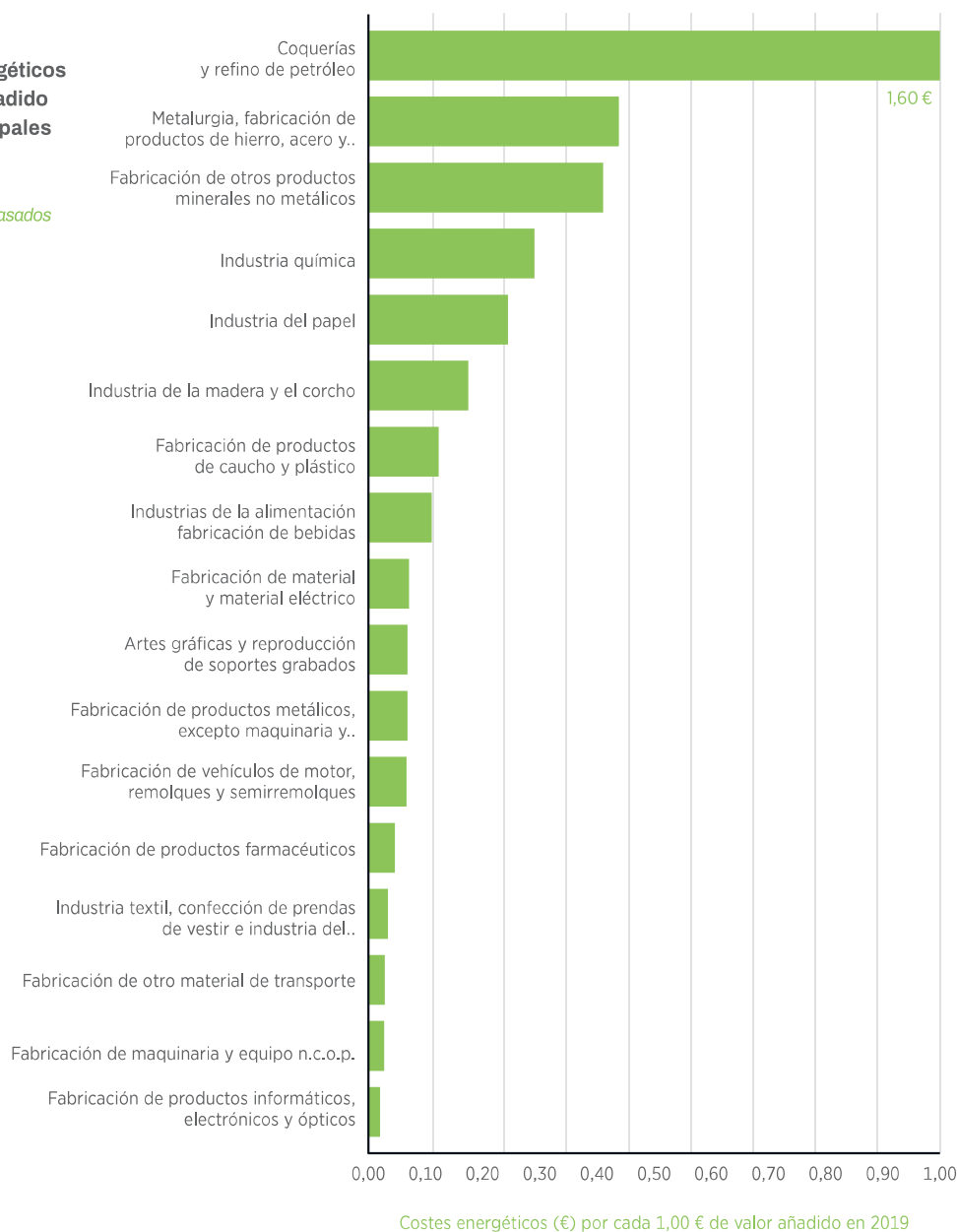
⁵ Algunos productos intermedios del sector alimentario y del procesamiento de madera se consideran productos básicos según el Banco Mundial (The World Bank, 2021) y la industria de cerámica y vidrio ofrece una gran variedad de productos con diferentes características y grados de calidad que no son productos básicos.

⁶ Bienes no fungibles se refiere a objetos digitales o físicos que son únicos y no se pueden intercambiar uno por otro de manera equivalente. Esto les diferencia de productos fungibles con características muy estandarizadas.

cada Euro de valor añadido en 2019. Este valor era aproximadamente cinco veces superior (0,30 – 0,50 €) para la gran mayoría de las industrias de materias primas y aun mayor para la coquería y el refino de petróleo que transforman fuentes de energía fósil en productos finales (Figura 3). Es preciso señalar por supuesto que estos datos no reflejan los efectos de la crisis energética y la subida de los precios de gas natural y electricidad después de la invasión rusa a Ucrania. Sin embargo, cabe destacar cómo la duplicación de los precios resultaría en una mayor subida absoluta de los costes de producción y por lo tanto la reducción de valor añadido en las industrias de materias primas que en otros sectores industriales.

Figura 3.
Costes energéticos por valor añadido de las principales actividades económica

Fuente: datos basados en INE (2022).



Los costes energéticos solamente representan una parte de los costes operativos vinculados al consumo de combustibles fósiles. En la Unión Europea, todas las instalaciones industriales con una potencia instalada mayor de 20 MW térmicos participan en el régimen de comercio de derechos de emisión (EU ETS). Todas las instalaciones para la producción de materias primas superan este valor de referencia y pagan parcialmente por sus emisiones energéticas y emisiones de proceso. Las industrias en la cadena de valor que convierten materias primas en productos intermedios o finales tienen menores costes directos de energía y emisiones. Sin embargo, los productos hechos de materias primas muchas veces tienen una gran huella de carbono contando las emisiones indirectas a lo largo de la cadena de valor.

2.2. Soluciones para la reducción de emisiones

En la sección anterior se destaca que el papel que juega el carbono es esencialmente distinto en las industrias de materias primas en comparación con otras actividades industriales. Sin embargo, a continuación, se muestra que las opciones principales para reducir emisiones se aplican en principio a todas las industrias. Las posibles tecnologías tienen diferentes implicaciones sobre los costes de instalación y operación⁷, que se pueden caracterizar por cuatro opciones generales: *las mejoras de eficiencia, el cambio de fuentes de energía, la captura de emisiones o el cambio de insumos materiales* (Gerres, 2023). En lo siguiente destacamos que existen soluciones y equipos estandarizados para gran parte de la industria para bajar sus emisiones energéticas. Estas soluciones estandarizadas nos permiten bajar las emisiones por el uso de energía térmica, pero no permiten transformar las industrias de materias primas que requieren soluciones específicas.

2.2.1 Las mejoras de eficiencia

Reducir el consumo energético de los procesos actuales mediante mejoras de eficiencia es una opción sencilla para reducir las emisiones de un proceso industrial. Las mejoras se pueden lograr por la instalación de equipos con una mejor eficiencia que los actuales, por ejemplo, con nuevos cojinetes, o la reducción de las pérdidas energéticas térmicas por un mejor aislamiento de las instalaciones existentes o el mejor control del proceso gracias a su digitalización. Las mejoras de la eficiencia implican generalmente una elevada inversión en el proceso actual, que se amortiza con la reducción del consumo previsto y los costes operativos asociados a cada unidad de producto final.

La industria ha realizado grandes inversiones en eficiencia energética durante las últimas décadas y sigue optimizando los procesos actuales con cada renovación de equipos. Sin

⁷ Los «costes de instalación» incluyen todos los gastos vinculados a la planificación, construcción y financiación de un equipo o proceso industrial. Por otro lado, los «costes de operación» engloban todos los gastos necesarios para operar y mantener en funcionamiento dicho equipo, incluyendo los costes de energía, materiales y otros insumos, los costes laborales y el mantenimiento del equipo.

embargo, en el contexto de la transición industrial el potencial de la reducción de emisiones por mejoras de eficiencia es limitado. Con mejoras de eficiencia nos podemos acercar a la eficiencia teórica de los procesos, y cuanto más nos acercamos a ella, mayores son las inversiones necesarias para conseguir los ahorros. Además, por sí mismas, las mejoras de eficiencia no permiten llevar los procesos industriales que consumen combustibles fósiles hasta la neutralidad climática.

2.2.2 El cambio de fuentes de energía

En el caso ideal, las fuentes fósiles de energía se reemplazarían con alternativas menos intensivas o neutras en emisiones, sin necesidad de grandes inversiones en equipos. El biometano se puede quemar en calderas o hornos de gas natural sin cambiar los equipos. Viendo el rol importante de gas natural en industrias como la cerámica, el vidrio, el sector alimentario y manufacturero este camino puede ser lo menos disruptivo a nivel de planta. Sin embargo, es importante tener una perspectiva realista sobre su papel en el panorama energético, y se debe considerar la posible evolución de los precios de este insumo a largo plazo, lo que podría afectar la competitividad de biometano en comparación con otras soluciones (Material Economics, 2021). La transición hacia procesos neutros en emisiones casi siempre implica inversiones en nuevos equipos, tal como calderas y hornos.

Las calderas calientan un medio como agua y vapor a un rango de temperatura por debajo de 100 °C o superior de 350 °C bajo presión. Aunque muy estandarizado, su diseño depende mucho de la fuente de energía que se utiliza. Por ejemplo, las calderas eléctricas no incluyen quemadores, sino serpentines de calor. Sus conceptos de funcionamiento son fundamentalmente diferentes. La inversión necesaria para instalar una caldera con una fuente de energía distinta no es necesariamente más elevada que la reinversión en la caldera existente. Las calderas eléctricas para aplicaciones industriales tienen un precio de inversión que es igual o menor que calderas de gas natural (JRC, 2017). En contraste, según estimaciones del mismo estudio de referencia en nombre de la Comisión Europea, los costes de inversión para calderas de biomasa pueden ser cuatro veces más altos que para las calderas eléctricas y tres veces el coste de las calderas de gas natural y biometano. Los costes de inversión en calderas de biomasa dependen en primer lugar del tipo de biomasa porque su heterogeneidad aumenta la complejidad tecnológica.

Los hornos se necesitan en procesos con temperaturas elevadas, en un rango que puede superar los 1000 °C, como en las industrias de vidrio o cerámica. El proceso de producción se opera en un rango distinto de temperatura en cada industria dado que el control de la temperatura tiene un gran impacto en las características del producto final. En la actualidad, los grandes hornos industriales operan principalmente con gas natural, pero se están explorando diversas opciones, como la electrificación directa, el reemplazo del gas natural por biometano y el uso de hidrógeno como otro combustible renovable. A día de hoy los hornos que operan con hidrógeno no se comercializan a escala industrial y existen grandes incertidumbres sobre sus costes de operación.

En caso de tecnologías innovadoras ya disponibles para la generación de calor como bombas de calor y solar térmica para procesos industriales el coste de inversión es muy superior a la reinversión en tecnologías convencionales. El funcionamiento de una bomba de calor es muy distinto a los hornos y calderas. En vez de transformar el contenido energético de la electricidad o del combustible en un flujo de calor, la bomba de calor extrae el calor de un flujo energético de entrada con temperaturas bajas para calentar otro flujo energético de salida. Se trata principalmente de la contracción y despresurización del fluido o gas de transporte con compresores.

El consumo energético de este proceso mecánico de concentración de calor es mucho más bajo que el consumo de calderas que operan con una eficiencia superior a 90 %. Para la eficiencia de bombas de calor se usa el factor COP (Coefficient Of Performance) que indica la cantidad del calor transportado por unidad de energía consumida. Un COP de 2 corresponde a una eficiencia energética correspondiente de 200 %. Para bombas de calor industrial en venta, el factor determinante para su eficiencia es la diferencia e intensidad de calor de entrada y calor de salida. Esto también implica que la aptitud de las bombas de calor depende mucho de la disponibilidad y calidad del propio calor residual del proceso como fuente de calor. Igualmente, su precio de inversión, que suele estar en un rango entre 300 y 1200 €/kW de capacidad instalada, varía por caso de aplicación. Considerando que el rango de operación por debajo de 150 °C es lo más común la tecnología puede tener cierta relevancia en la industria alimentaria, el sector químico o la producción de pasta y papel.

La solar térmica reemplaza la fuente actual de calor por el sol y como consecuencia limitaría los costes operativos a un mínimo. El agua u otro fluido se puede calentar en captadores solares a una temperatura entre 30 y 100 °C, un rango que es suficiente para muchos usos residenciales. En combinación con concentradores como espejos se pueden alcanzar temperaturas más elevadas de hasta 300 °C, que permitiría operar muchos de los procesos térmicos en la industria alimentaria, la química y la producción de madera, corcho y muebles. Según un estudio del IDAE el potencial técnico-económico en estas tres industrias para procesos con temperaturas inferiores a 120 °C es de 9,3 GW_{th} (ICCL y IDAE, 2022). La gran desventaja de la solar térmica es la volatilidad por las condiciones climáticas. Además, cuenta con un elevado coste de inversión.

Todas las inversiones necesarias para cambiar la fuente de energía se tienen que amortizar con un menor coste de operación asociado al consumo energético. En caso del cambio de una fuente de energía fósil a una fuente de energía neutra en emisiones la reducción de costes prevista incluye la diferencia entre los costes previstos para el nuevo y el antiguo combustible, y los costes previstos de emisiones que se evitan. Para una empresa, estos costes evitados solo existen si la empresa está sujeta a un mecanismo de fijación de precios de las emisiones, unos impuestos, o unas penalizaciones por emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Sin embargo, el cambio de fuentes de energía no permite descarbonizar las emisiones de proceso, por lo que son necesarias otras tecnologías para la transformación de las industrias de materias primas con elevadas emisiones de procesos.

2.2.3 La captura de emisiones

Se trata de un proceso de filtración de los gases de escape en la salida de los procesos de producción. Esta filtración es una etapa adicional que necesita energía, para separar el CO₂ de otras salidas del proceso. Por lo tanto, la captura de emisiones siempre aumenta el consumo energético de la producción.

La inversión en un proceso de captura se tiene que amortizar con los ahorros previstos en los costes de emisiones. Dado que un proceso con captura de emisiones siempre consume más energía, los costes previstos de emisiones que se evitan tienen que igualar los costes de inversión y los mayores costes energéticos de operación. En teoría, el CO₂ capturado se puede vender como otro producto industrial, pero su monetización depende de la disponibilidad de compradores dispuestos a pagar por ello. En caso contrario, la captura de emisiones conlleva más costes por su gestión en almacenamientos subterráneos a largo plazo.

La gran ventaja de la captura de emisiones es su potencial en capturar tanto las emisiones energéticas y las de proceso. Sin embargo, nunca se captura el 100 % de las emisiones. Por lo tanto, su rol como tecnología para procesos industriales neutros en emisiones depende de los avances técnicos que permiten una captura casi completa y limiten las emisiones restantes a un nivel marginal.

A día de hoy, la captura de CO₂ es la solución más prometedora para reducir las emisiones en el sector de cemento, porque no existen alternativas a la calcinación de la caliza para obtener clínker de cemento que causa emisiones de proceso. En varios proyectos europeos se plantea la instalación de capacidades industriales para la captura de CO₂. En Noruega, el CO₂ capturado de un horno de cemento se debería transportar por barco a unos almacenes subterráneos a partir de 2024, y en total 18 proyectos de captura de CO₂ en hornos de cemento se han anunciado en Europa, dos de ellos para plantas en España (Jones, 2023).

2.2.4 El cambio de insumos materiales

La variación de la composición de insumos en procesos industriales es bastante común y puede ser debida a la innovación y la mejora de las calidades del producto final, la fabricación de diferentes variedades de productos finales que se distinguen por su composición y características, o la diferencia en coste entre varios insumos intercambiables. En muchos casos, se pueden realizar cambios marginales de insumos con los procesos actuales con pequeñas modificaciones o ajustes al control del proceso. Sin embargo, la sustitución de insumos principales a menudo supone grandes cambios en el proceso actual.

Si el cambio del insumo está motivado por la reducción o eliminación de emisiones, esta inversión se debe amortizar con un menor coste operativo, entre otros, por el uso de diferentes materiales, el consumo de energía y las emisiones evitadas. El reemplazamiento de la producción primaria con el reciclaje de flujos residuales para ofrecer el mismo producto final es un buen ejemplo de este tipo de transición. En el caso de la producción primaria de

acero con altos hornos, representando 55,2 % de la producción europea y 28,1 % en España (WorldSteel, 2024), los costes de operación dependen de los precios globales de hierro y carbón mineral más (en Europa) los costes por emitir emisiones de CO₂. Un cambio hacia el reciclaje con hornos de arco eléctrico (EAF) resulta en costes operativos vinculados al precio y calidad de la chatarra disponible, los precios de electricidad y el coste por emitir muchas menos emisiones de CO₂ que los altos hornos.

El cambio de insumos materiales es clave para evitar las emisiones de procesos en algunas industrias de materias primas, pero también puede jugar un rol importante en la cadena de valor si las empresas del sector manufacturero optan por procesar materias alternativas para bajar su huella de carbono directo o indirecto.

La clasificación de opciones para la transformación industrial en cuatro grupos destaca en una manera muy simplificada cómo la industria puede conseguir una reducción de emisiones directas de sus plantas. Dependiendo de la instalación existente, hay tecnologías que pueden representar dos grupos a la vez. Por ejemplo, reemplazando una caldera de gas natural con una bomba de calor eléctrica se logra una mejora de eficiencia y un cambio de combustible. También existen opciones integradas, especialmente en las industrias más intensivas en emisiones, que pueden alcanzar una reducción de emisiones al combinar el cambio de fuentes de energía y los insumos de materiales, en el mejor caso con una mejor eficiencia energética.

Las soluciones tecnológicas más avanzadas para la producción de materias primas con bajas emisiones casi siempre implican una transición integral del proceso actual de producción. En caso del acero primario el reemplazamiento de altos hornos de carbón con hornos de reducción directa (DRI) en combinación con los hornos EAF bajaría el consumo energético de aproximadamente 17,5 GJ/t a 13 GJ/t. Al mismo tiempo el hidrógeno o natural gas reemplazarían al carbón para transformar el mineral a hierro, reduciendo las emisiones del proceso entre 40 % (en caso de gas natural) y 97 % (usando solamente hidrógeno) (Chiappinelli *et al.*, 2021).

Hoy en día el sector químico es el principal consumidor de hidrógeno representando 82 % de la demanda a nivel europeo (European Hydrogen Observatory, 2024). Se utiliza para producir amoníaco en la industria de fertilizantes y juega un rol importante en el refino de petróleo. El reemplazo de este hidrógeno producido a partir de gas natural con hidrógeno verde es un cambio de insumos relativamente sencillo. Sin embargo, el reto de transformar el sector petroquímico solamente se puede conseguir con un conjunto de medidas de todos los grupos. En caso de los plásticos, el reciclaje debe jugar un rol mucho más importante, mientras que la producción de fueles y consumibles sintéticos implica el reemplazamiento de hidrocarburos fósiles por hidrógeno renovable y carbón no-fósil de origen biológico u obtenido por captura de CO₂ del aire o de procesos convencionales (Deloitte, 2022).

La Tabla 1 muestra como las principales opciones para reducir las emisiones tienen diferentes impactos sobre los costes operativos en comparación con los procesos actuales. Todas las tecnologías que entran en uno o varios de los grupos prevén bajar los costes de las emisiones. Sin embargo, la escala de esta bajada es desconocida, porque depende del precio futuro de los derechos de emisión.

En el caso de los costes energéticos, se prevén bajar por mejoras de eficiencia, pero pueden variar por un cambio de la fuente de energía o de los insumos materiales y siempre serán mayores para la captura de emisiones. Las mejoras de la eficiencia energética y la captura de emisiones no alteran los insumos materiales necesarios para la producción. No obstante, un cambio en los insumos puede implicar el uso de un proceso de producción diferente, con un perfil y una intensidad energética distintos.

La evaluación de los riesgos e incertidumbres asociados a los costes operativos es decisiva para la rentabilidad de una inversión que reduce las emisiones. Así, unos costes menores de reinversión para cambiar la fuente de energía o los insumos materiales no implican que sea rentable. En este sentido, desde un punto de vista de la evaluación de los riesgos, las mejoras de eficiencia que reducen los costes operativos pueden ser lo más atractivo incluso aunque no permitan alcanzar la neutralidad en emisiones.

En cualquier caso, hay que señalar que esta revisión de las principales opciones para reducir las emisiones de los procesos industriales se enfoca en los costes tecnológicos y no considera los posibles ingresos adicionales de la «prima verde» por vender un producto con menos emisiones. Sin embargo, sirve para destacar las diferencias en riesgos e incertidumbres para inversiones en las diferentes opciones.

Tabla 1. Opciones para reducir emisiones directas y su rentabilidad en comparación con los procesos actuales

	Coste de inversión	Costes operativos			¿Permite alcanzar emisiones neutras? *
		Energía	Emisiones	Insumos	
Las mejoras de la eficiencia	conocido más elevado (+)	desconocido más bajo (-)	desconocido (-)		No
El cambio de las fuentes de energía	conocido depende de cada caso (+-)	desconocido (+-)	desconocido (-)		Solo de emisiones energéticas
La captura de emisiones	conocido (+)	desconocido (+)	desconocido (-)		Cuasi neutro factible
El cambio de insumos materiales	conocido (+-)	desconocido (+-)	desconocido (-)	desconocido (+-)	Si

* En caso de procesos actuales con consumo de energía fósil.

3. La política industrial europea y los objetivos de 2030

Las instituciones públicas juegan un rol muy decisivo en el funcionamiento de la economía. Las empresas están sujetas a diferentes regímenes fiscales a nivel regional, nacional y europeo. Los productos industriales tienen que cumplir con reglamentos, por ejemplo, sobre la seguridad o el impacto ambiental, igual que las instalaciones industriales y los puestos de trabajo de los empleados. Además, las medidas gubernamentales para atraer actividades industriales o incentivar ciertas prácticas de negocio pueden ser decisivas para la localización y las decisiones de financiación o extensión de la industria. Los programas públicos que incentivan la compra de ciertos bienes asimismo refuerzan ciertas actividades industriales a costa de otros. Se prevé que la compleja interrelación de la industria con las políticas públicas se intensifique para alcanzar el objetivo de una sociedad neutra en emisiones en 2050. Los objetivos de la política comunitaria europea, tal como instaurar unas condiciones marco que favorezcan la competitividad industrial, la adaptación de la industria a los cambios estructurales y promover un entorno favorable a la cooperación entre empresas, se deben cumplir alcanzando una transformación hacia emisiones neutras en carbono.

En lo siguiente se resume el marco actual de las medidas para reducir las emisiones en la industria, tal como el régimen del comercio de emisiones en Europa (EU ETS) y programas de apoyo a la inversión industrial a nivel nacional y europeo. Aunque muchos elementos de este marco regulatorio no son novedosos, los objetivos de 2030 de «Fit for 55» y la Ley Europea del Clima del año 2021 han elevado su importancia para el sector industrial y su competitividad.

3.1. El régimen de comercio de derechos de emisión (EU ETS)

La implementación del régimen de comercio de derechos de emisión por la UE en el año 2005 fue pionera a nivel mundial. Desde el principio el EU ETS es un sistema de «cap and trade» que aplica a instalaciones fijas que emiten emisiones de CO₂ en la UE, como la generación fósil de electricidad y ciertas industrias con una alta intensidad de emisiones. Hoy en día, todas las centrales eléctricas e instalaciones industriales con una capacidad instalada de combustión fósil superior a 20 MW_{th} participan en el EU ETS. Esto incluye toda la producción de materias primas con una gran huella de carbono y también otras plantas, por ejemplo, de las industrias alimentarias y del sector manufacturero.

El EU ETS se está revisando de forma continua para alinear el sistema del comercio de derechos de emisión con los objetivos de la UE para bajar las emisiones de forma significativa hasta 2030 y alcanzar una economía neutra en emisiones en 2050. Como se explica en más detalle en Gerres y Linares (2024), el precio de carbono debe encarecer la emisión de CO₂ y al mismo tiempo incentivar la inversión en procesos limpios. Sin embargo, la asignación gratuita de derechos de emisión que disminuye el impacto del EU ETS en la industria y asegurar la competencia de la industria europea en los mercados globales, limita su eficacia.

3.2. El rol de las ayudas públicas para la inversión

Uno de los principales impulsores en la fundación de la UE fue la creación de un Mercado Único europeo. El objetivo de evitar ayudas estatales que permitan a gobiernos nacionales favorecer y proteger sus propias industrias ya se establece en los Tratados de Roma, firmados el 25 de marzo de 1957. Por lo tanto, las ayudas estatales siempre representan una excepción a la regla. En caso de la industria, en general las ayudas han tomado una de las siguientes formas:

- **Subastas de fondos a nivel europeo para apoyar proyectos de interés** común, como el Fondo de Innovación para realizar primeras instalaciones de nuevas tecnologías a nivel comercial. La financiación de estos programas se obtiene por la subasta de derechos de emisión del EU ETS. Históricamente el volumen del fondo estaba limitado por los bajos precios de los derechos de emisión, pero el volumen de los fondos dispuestos ha subido en los últimos años. La Comisión ahora mismo espera que se reúnan 40.000 M€ en total de 2020 hasta 2030 (EC, 2023). El Fondo de Innovación financia hasta un 60 % de los costes de inversión y operación de grandes proyectos, y un 60 % de los costes de inversión para proyectos pequeños. Sin embargo, todas las subastas se realizaron por cantidades fijas o premios a la producción, por lo que no cubren los riesgos asociados a costes variables de operación. Las subastas del Banco de Hidrógeno también se pagan con el Fondo de Innovación y tampoco cubrirían riesgos de operación.
- **Fondos Europeos para programas nacionales de apoyo** es el principal instrumento para la financiación, por ejemplo, para REPowerEU o el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). El proceso para la concesión de los fondos a los diferentes Estados Miembros es similar para todos los programas de financiación de este carácter. Los Estados Miembros proponen medidas nacionales a la Comisión, que evalúa si son elegibles bajo los criterios de concesión. En caso de REPowerEU, alrededor de 250.000 M€ están disponibles en el periodo de 2022 hasta 2027 para financiar medidas que reduzcan las importaciones de energía fósil de Rusia y aceleren la transición verde. En el caso de los fondos NextGenerationEU para la recuperación de la crisis de la covid-19, el gobierno español financió proyectos estratégicos para la recuperación y transformación económica (PERTE) para la descarbonización industrial (3.100 M€), la economía circular (492 M€) y energías renovables, hidrogeno renovable y almacenamiento (6.900 M€) (Gobierno de España, 2023). Otro fondo relevante para apoyar a la industria en el contexto nacional es el programa para la reindustrialización REINDUS financiado por FEDER.
- La categoría de **programas nacionales con obligaciones de notificación a la Unión Europea** incluye casi todos los programas que se financian únicamente con fondos nacionales. Los países miembros solamente pueden subsidiar proyectos con un máximo de 200.000 € en un periodo de tres años u ofrecer créditos de hasta 1 M€ sin notificar a la Comisión.⁸ Los programas nacionales aprobados por la Comisión

⁸ Reglamento (UE) No 1407/2013 de la Comisión de 18 de diciembre de 2013 relativo a la aplicación de los artículos 107 y 108 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea a las ayudas de minimis.

también incluyen subsidios para la producción de algunos tipos de energía renovable con subastas competitivas y créditos fiscales que ayudarían a los Estados Miembros a alcanzar objetivos europeos.⁹

3.3. Las propuestas de la Comisión para acelerar las inversiones

El régimen de comercio de derechos de emisión (EU ETS) y el marco actual para el apoyo público se establecieron antes del compromiso comunitario para lograr una sociedad neutra en emisiones a 2050. La aceleración de la transición requiere una política industrial que permita guiar el complejo industrial hacia mercados de bienes sin huella de carbono (Neuhoff *et al.*, 2019). Durante el primer trimestre de 2023, la Comisión presentó dos comunicaciones que destacan como acelerar la transición industrial que ya han resultado en varios cambios legislativos como la modificación de las Directrices sobre las ayudas estatales en mayo 2024. A continuación, se presentan los principales elementos de estos planes y sus implicaciones para la industria.

El plan industrial del pacto verde (COM [2023] 62 final) se publicó en febrero 2023 con el objetivo de crear una industria competitiva y resiliente frente los retos de la transición hacia la neutralidad de emisiones. El plan combina nuevos elementos con los programas existentes y define cuatro pilares principales para la estrategia industrial:

- Un entorno reglamentario simplificado y previsible que permita cumplir ambiciosos objetivos de capacidades industriales para 2030. Estos objetivos incluyen componentes como baterías, paneles fotovoltaicos, celdas de combustibles y electrolizadores.
- La rápida provisión de fondos adecuados para inversiones en la descarbonización de procesos industriales, energías renovables y cadenas de valor con emisiones neutras se debe conseguir con la simplificación de las reglas sobre ayudas estatales.
- El tercer pilar es la mejora de habilidades de la fuerza laboral en la UE frente la transición.
- Por último, el plan cierra con un compromiso con el libre comercio y una economía abierta según las normas de la OMC.

La segunda propuesta regulatoria se publicó el 16 de marzo de 2023 (COM [2023] 161 final). El objetivo de este nuevo Reglamento europeo es el desarrollo de capacidades industriales para la fabricación de tecnologías neutras en emisiones, tal como paneles solares (30 GW), turbinas eólicas (36 GW), bombas de calor (31 GW), baterías (550 GWh) y electrolizadores (100 GW) en 2030. Además, una capacidad de 50 Mt de captura y almacenamiento de CO₂ debería estar operativa en 2030. Para alcanzar estos objetivos se proponen, entre otros, las siguientes medidas:

⁹ SA.41386 (2015/X-2015/EV) SME R&D Tax Credits-evaluation plan. SA.40348 (2015/NN) Support for electricity generation from renewable energy sources, cogeneration and waste-Spain.

- Se designa una autoridad competente a nivel nacional en cada Estado Miembro para el proceso de permiso de proyectos para la fabricación de tecnologías neutras en emisiones.
- Se establecen metas para acelerar el proceso de permisos para nuevas plantas de fabricación de tecnologías neutras en emisiones.
- Se aceleran proyectos estratégicos de tecnologías neutras en emisiones en las siguientes áreas: solar fotovoltaica y solar térmica; eólica terrestre y renovables marinas; baterías y almacenamiento; bombas de calor y energía geotérmica; electrolizadores y pilas de combustible; biogás y biometano sostenible; captura y almacenamiento de CO₂; tecnologías de redes.
- Se establece la obligación para los Estados Miembros de identificar las áreas donde el almacenamiento subterráneo a nivel nacional esté permitido y desarrollar planes sobre la contribución de los productores de petróleo y gas a la captura y el almacenamiento de CO₂.
- Se introducen requisitos obligatorios para la compra pública de Estados Miembros con respecto al peso de criterios de sostenibilidad en la concesión de proyectos con/de tecnologías neutras en emisiones.
- Se facilita la implementación de «sandboxes» regulatorios por los Estados Miembros.

Aunque muchas medidas ayudarán la transición de la industria, no se ha detallado hasta ahora cómo se facilitarán las inversiones en la reducción de emisiones industriales a partir del plan industrial del pacto verde. Aparte del apoyo para el desarrollo de las tecnologías adecuadas para la industria neutra en emisiones, falta una estrategia coherente para impulsar el uso circular de materiales. En este contexto la nomenclatura del «Net Zero Industry Act» es un poco engañosa, porque se dirige en primer lugar a la fabricación de tecnologías que se pueden operar con emisiones neutras. Sin embargo, el Reglamento no hace ninguna referencia a la producción neutra en emisiones de estas tecnologías y otros bienes industriales.

3.4. Cómo se pueden enfrentar los retos de la transición

Sin ninguna duda, las instituciones de la Unión Europea y los Estados Miembros comprometidos con la transición de la economía hasta 2050 reconocen el impacto y la profundidad de una industria de emisiones neto cero. El objetivo final es claro, pero todavía falta una visión del procedimiento tecnológico, económico y regulatorio hacia un mercado común competitivo y descarbonizado. La política industrial y los planes de la Comisión solamente incorporan algunas acciones concretas que, en su totalidad, parecen insuficientes para movilizar las inversiones necesarias a medio y largo plazo.

La buena noticia es que los agentes más relevantes parecen conscientes de la necesidad de un mayor esfuerzo y nuevas propuestas se están elaborando. Un ejemplo es el informe de Mario Draghi publicado en septiembre 2024 que destaca varias propuestas concretas

para bajar los costes de energía que facilitarían la transición industrial (Draghi, 2024). Sin embargo, el informe se queda corto en especificar pasos hacia una reforma más profunda de la política industrial europea.

Ante esta situación actual la industria española y europea se enfrenta grandes incertidumbres sobre el futuro funcionamiento de los mercados europeos y la competitividad global. Sin embargo, las incertidumbres también presentan oportunidades que se deben aprovechar para mejorar el posicionamiento y la resiliencia del propio negocio frente la transición.

Los planes de inversión en la renovación de instalaciones existentes y en nuevos procesos se deben revisar considerando la vida económica de las inversiones en contexto de los compromisos políticos hacia la reducción de emisiones industriales. ¿Será competitivo el proceso en 2, 5 o 10 años si la Unión Europea y los Estados Miembros alinean mejor su política industrial a los objetivos de reducción de emisiones?

Igual que no existe una ruta clara hacia una economía de emisiones neto cero, tampoco se puede hablar de estrategias de negocio óptimas a nivel sectorial o industrial. Sin embargo, las industrias que emiten emisiones fósiles principalmente por generar y usar calor en sus procesos de cocción, secado o calefacción ya tienen la oportunidad de hibridar sus instalaciones a costes competitivos. La posibilidad de operar sus procesos con varias fuentes de energía fósil, biomasa, hidrógeno o electricidad aumenta la flexibilidad y resiliencia de la industria frente la transición.

Los sistemas híbridos comercialmente disponibles también permiten maximizar el uso de energía disponible localmente, por ejemplo, en forma de generación eléctrica renovable o biomasa. Especialmente en este contexto, la viabilidad económica y por lo tanto la estrategia de transformación siempre se debe estudiar considerando el ámbito específico de cada instalación industrial y los recursos locales disponibles.

La transición no se puede realizar sin innovaciones. Cada actor industrial dispone del mejor conocimiento de sus propios procesos y, por lo tanto, potencial de mejora. Sin embargo, la innovación no debe ser solamente en la optimización de los procesos actuales. El desarrollo de nuevas soluciones que permiten alcanzar la neutralidad climática puede impedir el «out-of-the-box thinking» que cuestione el modelo negocio actual. Estas nuevas perspectivas son de gran relevancia para realizar una economía más circular.

Referencias bibliográficas

- Chiappinelli, O.; Gerres, T.; Neuhoﬀ, K.; Lettow, F.; de Coninck, H.; Felsmann, B.; Joltreau, E.; Khandekar, G.; Linares, P.; Richstein, J.; Śniegocki, A.; Stede, J.; Wyns, T.; Zandt, C., & Zetterberg, L. (2021): *A green COVID-19 recovery of the EU basic materials sector: Identifying potentials, barriers and policy solutions*. Climate Policy, 21(10), 1328–1346. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1922340>
- Draghi, M. (2024): *The future of European competitiveness*.; European Commission. Disponible en: https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en
- EC (2023): *What is the Innovation Fund?*. Disponible en: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en
- European Hydrogen Observatory (2024): *Hydrogen Demand*. Disponible en: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/end-use/hydrogen-demand>
- Deloitte (2022): *Carbon Neutrality by 2060: White Paper on the Low-carbon Development of the Petrochemical Industry*.
- Gerres, T., & Linares, P. (2024): *Perspectivas para la transformación industrial hacia una economía verde*. Fundación Naturgy. Disponible en: <https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/perspectivas-para-la-transformacion-industrial-hacia-una-economia-verde/>
- Gerres, T. (2023): *The economics of fossil decarbonisation in industrial processes for a targeted policy design*. Papeles de Energía, 22.
- Gobierno de España (2023): *Proyectos estratégicos para la recuperación y transformación económica (PERTE)*. Disponible en: <https://planderecuperacion.gob.es/como-acceder-a-los-fondos/pertes>
- ICCL; IDAE (2022): *Guía de Energía Solar Térmica para Procesos Industriales (No. 033)*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- IDAE (2023): *Balance del Consumo de energía final*. Disponible en: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=2019&tipbal=t>
- INE (2022): *Contabilidad Nacional Anual de España*. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177057&idp=1254735576581
- Jones (2023): *The Carbon Capture Update: CCUS Projects Gain Momentum in the Cement Industry*. Disponible en: <https://insight.factset.com/the-carbon-capture-update-ccus-projects-gain-momentum-in-the-cement-industry>
- JRC (2017): *Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU*. JRC publications.

- Material Economics (2021): *EU Biomass Use in a Net-Zero Economy: A course correction for EU biomass*. Material Economics Sverige. Disponible en: <https://materialeconomics.com/node/3>
- Neuhoff, K.; Chiappinelli, O.; Gerres, T.; Haussner, M.; Ismer, R.; May, N.; Pirlot, A.; Richstein, J. (2019): *Building blocks for a climate-neutral European industrial sector*. Climate Strategies. Disponible en: <https://climatestrategies.org/publication/buildingblocks/>
- Odyssee-Mure (2024): *Spain / Energy profile*. Disponible en <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/spain-spanish.html>
- Kosmadakis, G. (2019): *Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries*. Applied Thermal Engineering, 12. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>
- The World Bank (2021): *World Bank Commodities Price Data* (The Pink Sheet).
- WorldSteel (2024): *World Steel in Figures 2024*. Disponible en: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>