

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Vías de Descarbonización en los Sectores Industriales

El caso de España, Grecia, Alemania y Países Bajos



CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

Autor Principal: Alessandro Carmona (Centro Tecnológico CIRCE)

Otros autores: Anatoli Rontogianni (CERTH—Centre for Research and Technology Hellas, Grecia), Myrto Zeneli (CERTH), Panagiotis Grammelis (CERTH), Olgü Birgi (WIP Renewable Energies, Alemania) Rainer Janssen (WIP), Benedetta Di Costanzo (WIP), Martijn Vis (BTG—Biomass Technology Group BV, Países Bajos), Bas Davidis (BTG), Patrick Reumerman (BTG), Asier Rueda (CIRCE) y Clara Jarauta-Córdoba (CIRCE)

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

La presente comunicación, sometida a valoración por la organización del congreso, es producto de adaptar el contenido de los siguientes dos artículos científicos previamente publicados por el autor principal de esta comunicación:

- ❖ Carmona-Martínez, A. A., Rontogianni, A., Zeneli, M., Grammelis, P., Birgi, O., Janssen, R., ... & Jarauta-Córdoba, C. (2024). Charting the Course: Navigating Decarbonisation Pathways in Greece, Germany, The Netherlands, and Spain's Industrial Sectors. *Sustainability*, 16(14), 6176.
- ❖ Carmona-Martínez, A. A., Rueda, A., & Jarauta-Córdoba, C. A. (2024). Deep decarbonization of the energy intensive manufacturing industry through the bioconversion of its carbon emissions to fuels. *Fuel*, 371, 131922.

ÍNDICE

1. Título
2. Palabras clave
3. Resumen
4. Introducción
5. Metodología
6. Estado de las industrias intensivas en energía en cuatro economías representativas de Europa
7. Acciones de descarbonización en diferentes sectores
8. El potencial de la captura de carbono y su (bio)conversión en combustibles sintéticos
9. Conversión biológica de CO₂
10. Ejemplos industriales de bioconversión de CO₂ en combustibles
11. Desafíos para las industrias intensivas en energía (IIE) en Europa
12. Conclusiones
13. Financiación
14. Bibliografía

TÍTULO

Vías de Descarbonización en los Sectores Industriales de España, Grecia, Alemania y Países Bajos.

PALABRAS CLAVE

Industrias intensivas en energía; Tecnologías de descarbonización; Análisis específico por sector; Marcos económicos y regulatorios.

RESUMEN

En la búsqueda de un futuro sostenible, las industrias intensivas en energía (IIE) se encuentran a la vanguardia de la misión de descarbonización de Europa. A pesar de su significativa huella de emisiones, el camino hacia una descarbonización integral sigue siendo esquivo a nivel de la UE y a nivel nacional.

El presente trabajo examina sectores clave como los metales no ferrosos, acero, cemento, producción de cal, productos químicos, fertilizantes, cerámica y vidrio. Mapea su impacto ambiental actual y su potencial de mitigación a través de estrategias innovadoras. El análisis abarca España, Grecia, Alemania y los Países Bajos, destacando los ecosistemas específicos de cada sector y los avances tecnológicos que los están moldeando.

Aborda la urgencia de la adopción generalizada de la electrificación, el uso de hidrógeno verde, biomasa, (bio)combustibles sintéticos, y la implementación de captura, utilización y almacenamiento de carbono para asegurar una transición fluida.

El presente análisis discute los riesgos asociados con la inversión continua en tecnologías de alta emisión, que pueden llevar a desmantelamientos prematuros y repercusiones económicas significativas. Presenta una dicotomía: invertir ahora en tecnologías climáticamente neutras o enfrentar el cierre y la deslocalización de operaciones más adelante, con consecuencias para el empleo.

Este estudio concluye que, aunque la tecnología para una neutralidad climática en las IIE existe y avanza rápidamente, los costos más altos en comparación con los métodos convencionales representan una barrera significativa. Sin la capacidad de trasladar estos costos a los consumidores, la adopción de tales tecnologías se ve obstaculizada. Por lo tanto, se hace un llamado a un compromiso político decisivo para apoyar la transición de la industria, asegurando un futuro más verde y resiliente para la columna vertebral industrial de Europa.

INTRODUCCIÓN

La nueva Ley Climática de la Unión Europea se alinea estrechamente con el Acuerdo de París. Incorpora el nuevo Artículo 6 del Acuerdo de París y establece un objetivo ambicioso para 2030: una reducción de las emisiones de CO₂ de al menos un 55% en comparación con los niveles de 1990 (Schlacke et al., 2022). Además, la Ley Climática Europea compromete a la UE a un objetivo innovador: lograr la neutralidad de carbono para 2050 (Bataille et al., 2018). Las industrias intensivas en energía (IIE) están a la vanguardia de esta visión de estrategia de descarbonización europea (Commission & Directorate-General for Internal Market Entrepreneurship and SMEs, 2019). Sin embargo, no se ha desarrollado una estrategia de descarbonización holística a nivel de la UE y de los países.

El ecosistema de una IIE incluye una amplia gama de sectores, como metales no ferrosos, acero, aluminio, productos químicos, fertilizantes, cemento, cerámica, cal, vidrio y papel. Estos sectores se caracterizan por una alta intensidad energética y son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas principalmente por la combustión de combustibles, la producción de electricidad y las emisiones de procesos (Figura 1). Se pueden aplicar varias acciones de descarbonización para todos estos sectores, como la captura, utilización y almacenamiento (CCUS) de las emisiones de procesos, el uso de tecnologías de energía renovable para la producción de electricidad en lugar de combustibles fósiles, y el aumento de combustibles neutros en carbono en la mezcla de combustibles (Madurai Elavarasan et al., 2022; Wesseling et al., 2017). La transición a cero carbono de las IIE mediante la adopción de prácticas respetuosas con el clima no solo será beneficiosa para el medio ambiente, sino que también garantizará la competitividad a largo plazo de la empresa individual (França et al., 2023). No obstante, muchos sectores ya han alcanzado su punto máximo en sus esfuerzos por reducir sus emisiones de GEI sin cumplir sus objetivos (Perathoner et al., 2021). En este sentido, son necesarias soluciones innovadoras para transformar la forma en que operan estos sectores.

La presente comunicación describe los ecosistemas de las IIEs en diferentes sectores, centrándose en cuatro países europeos: España, Grecia, Alemania y los Países Bajos. Esta comunicación presenta innovaciones tecnológicas específicas, mientras que se analizan los desafíos para la utilización generalizada de tecnologías de descarbonización. En aras de la completitud, es importante reconocer que otros sectores como la industria petroquímica también requieren soluciones de descarbonización. Sin embargo, esta comunicación se centra específicamente en las opciones de descarbonización para sectores de alta intensidad energética como metales no ferrosos, cemento y cal, productos químicos y fertilizantes, cerámica, vidrio y acero. El sector petroquímico, aunque significativo, queda fuera del alcance de este manuscrito. Aunque esta comunicación no profundiza en análisis estadísticos detallados o proyecciones, pretende reflejar el estado de las innovaciones en descarbonización dentro de múltiples sectores. Las ideas presentadas se basan en consultas con representantes de la industria, partes interesadas y proveedores de tecnología, ofreciendo una perspectiva cualitativa sobre el estado actual y las perspectivas futuras de los esfuerzos de descarbonización en las industrias intensivas en energía.

Fuente: (Carmona-Martínez, Rontogianni, et al., 2024)

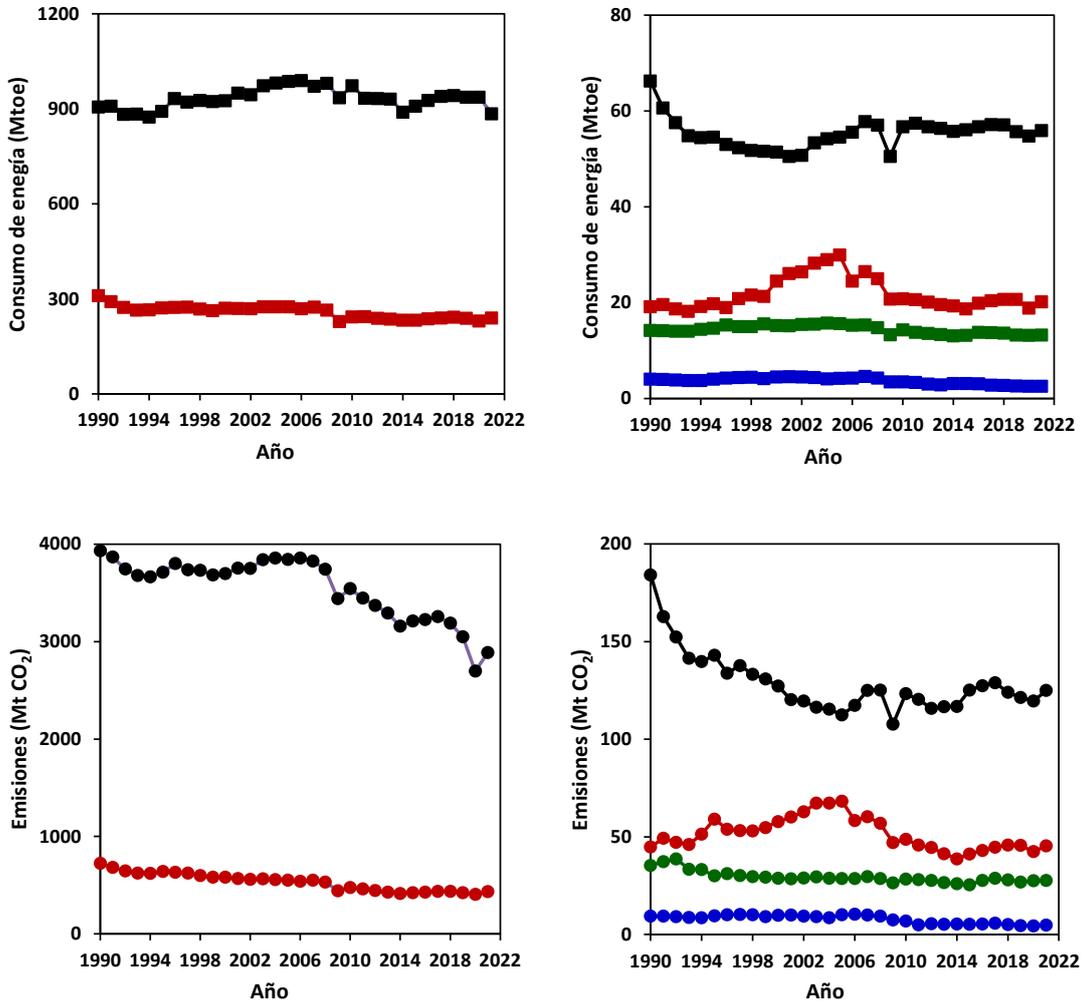


Figura 1. Consumo de energía y emisiones de CO₂ en Europa. (A) Consumo total de energía en la UE (negro) y por sus IIE (rojo); (B) Emisiones totales de CO₂ en la UE (negro) y por sus IIE (rojo); (C) Consumo de energía desagregado por IIE en Grecia (azul), España (rojo), los Países Bajos (verde) y Alemania (negro); y (D) Emisiones de CO₂ desagregadas por IIE en Grecia (azul), España (rojo), los Países Bajos (verde) y Alemania (negro). (Commission & Energy, 2023)

METODOLOGÍA

Enfoque general del análisis de la literatura. Esta revisión se preparó como parte del proyecto europeo RE4Industry, con el objetivo de proporcionar una comprensión global de los principales sectores de IIEs en Europa, incluyendo metales no ferrosos, acero, cemento, minerales no metálicos, cerámica y vidrio, y productos químicos. Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura en múltiples bases de datos académicas, centrándose en artículos revisados por pares publicados principalmente entre 2010 y 2022. Los criterios de inclusión fueron estudios que abordaran específicamente estrategias de descarbonización para IIEs en el contexto europeo, así como aquellos centrados en los países seleccionados: España, Alemania, los Países Bajos y Grecia. Los criterios de exclusión implicaron omitir artículos que no proporcionaran datos empíricos o análisis detallados de opciones de descarbonización. En la presente revisión se buscó sintetizar los hallazgos de esos estudios para ofrecer una visión general de las estrategias de descarbonización actuales y emergentes, destacando diferencias y similitudes regionales. Se produjeron informes individuales para cada sector, siguiendo una estructura común que incluía el estado del sector en la UE, una visión general de los procesos tecnológicos empleados, alternativas potenciales para procesos más limpios, prácticas bien establecidas para la integración de energías renovables y la reducción de emisiones de CO₂, medidas adicionales para la transición a un modelo de economía circular descarbonizada, y oportunidades y barreras para la descarbonización. La retroalimentación para la redacción de los informes sectoriales se recopiló a partir de consultas con expertos, visitas directas a organizaciones nacionales y una revisión de la literatura. Este enfoque metodológico aseguró una selección de literatura enfocada y relevante, proporcionando una base sólida para las conclusiones de la revisión.

Selección de países. La selección de España, Grecia, los Países Bajos y Alemania para esta revisión se basa en sus perfiles diversos y representativos dentro del contexto europeo de IIEs. Estos países fueron elegidos para proporcionar una visión integral de los desafíos y oportunidades de descarbonización en diferentes regiones y paisajes industriales de Europa. España es un actor significativo en el sector de las IIEs en Europa, particularmente en las industrias del acero, cemento y cerámica. Su ubicación geográfica y condiciones climáticas también presentan desafíos y oportunidades únicas para la integración de energías renovables y los esfuerzos de descarbonización. Grecia representa la región del sur de Europa, con una fuerte presencia en los sectores del cemento y minerales no metálicos. La estructura económica del país y sus recientes esfuerzos hacia la transición energética lo convierten en un caso valioso para comprender las barreras e impulsores de la descarbonización en economías similares. Los Países Bajos son un centro clave para las industrias químicas y petroquímicas en Europa. Su infraestructura tecnológica avanzada y políticas proactivas hacia la sostenibilidad proporcionan ideas sobre el potencial de innovación y la implementación de procesos más limpios en las IIEs. Alemania es una de las economías industriales más grandes de Europa, con una presencia significativa en los sectores del acero, productos químicos y metales no ferrosos. El liderazgo de Alemania en la adopción de energías renovables y sus ambiciosos objetivos climáticos lo convierten en un caso crítico para examinar la intersección de la actividad industrial y las estrategias de descarbonización. Al centrarse en estos cuatro países, la revisión captura un amplio espectro de actividades industriales, entornos regulatorios y características regionales. Esta selección asegura que los hallazgos y recomendaciones sean relevantes y aplicables a una amplia gama de contextos dentro de la Unión Europea, proporcionando así una base sólida para comprender el estado y las futuras vías para la descarbonización de las industrias de alta intensidad energética en Europa.

ESTADO DE LAS INDUSTRIAS INTENSIVAS EN ENERGÍA EN CUATRO ECONOMÍAS REPRESENTATIVAS DE EUROPA

Las emisiones industriales se dividen aproximadamente entre la combustión de combustibles para calor de proceso (52%) y los gases de efecto invernadero (GEI) liberados durante las reacciones químicas en el procesamiento de materias primas (48%), como el procesamiento de gas natural para la producción de amoníaco o la preparación de mineral de hierro para la fabricación de acero (d'Aprile et al., 2020). Las emisiones de proceso también incluyen emisiones fugitivas de GEI, como las fugas de metano de los gasoductos. El sector industrial se puede categorizar según las técnicas de producción y los tipos de GEI emitidos. La industria pesada, que representa el 46% de las emisiones industriales, incluye segmentos como minerales no metálicos, metales y productos químicos básicos. Estos segmentos manufacturan productos básicos como cemento, vidrio, acero y plásticos, que requieren altas temperaturas. Por ejemplo, los altos hornos para la fabricación de acero alcanzan los 1800 °C, y los hornos para la calcinación de piedra caliza para producir cemento superan los 1600 °C. Casi la mitad de las emisiones en estos segmentos son emisiones de proceso de CO₂, lo que requiere cambios en las materias primas y los procesos de producción para eliminarlas. El petróleo, el gas y la minería contribuyen con el 19% de las emisiones industriales, con aproximadamente el 25% de las fugas de metano, principalmente de los gasoductos. La mayoría de las emisiones de CO₂ en este sector provienen del calor necesario para el craqueo y la destilación del petróleo, que requiere temperaturas de hasta 400 °C.

En España, el sector de las IIEs es una de las actividades industriales más importantes (Serrano González & Álvarez Alonso, 2021). Las IIEs representan alrededor del 60% del consumo total de energía en el país (Figura 2). Entre los diferentes sectores industriales, el de mayor consumo energético es el de producción de bienes como productos químicos (14%), hierro y acero (15%), metales no ferrosos (13%), refinación de petróleo (8%) y papel (6%). Actualmente, casi toda la energía requerida para las IIEs proviene de fuentes no renovables, como carbón, petróleo y gas natural. La electricidad también juega un papel clave (aproximadamente 22.6%), pero las energías renovables tienen una presencia menor en el panorama energético industrial, con una participación de menos del 7%. Cabe mencionar que España sigue el objetivo de reducción de emisiones de la UE con un objetivo establecido por el gobierno español de reducir las emisiones de GEI en un 23% para 2030, tomando como referencia el año 1990. Desafortunadamente, los objetivos de emisiones sectoriales aún no se han especificado a nivel nacional, excepto para el sector del cemento, que ha establecido una hoja de ruta de descarbonización (Sanjuán et al., 2020).

Las características intrínsecas de las IIEs las hacen difíciles de descarbonizar. La maquinaria en producción primaria se caracteriza por altos costos de inversión inicial y está diseñado con una vida útil muy larga, por ejemplo, hasta 50 años en el caso de las plantas de cemento (Pisciotta et al., 2022). Precisamente, esta industria ha realizado numerosos esfuerzos en el pasado, debido a su propia necesidad de mantener su competitividad económica (y así reducir los costos de energía y CO₂ asociados con su actividad). Sin embargo, debido a las características de las IIEs, todavía representan una cantidad significativa de energía nacional.

Grecia no está tan industrializada como otros estados miembros de la UE; sin embargo, hay una

CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

presencia significativa y actividad económica de varias grandes IIEs, así como de varias empresas más pequeñas. En algunos sectores o subsectores específicos, la actividad de las empresas griegas es relevante, incluso a nivel de la UE. Los sectores de energía y calor son responsables de la mayor parte de las emisiones de GEI en Grecia. Curiosamente, estos sectores han podido reducir sus emisiones casi a la mitad desde 2015 (Figura 1). Dentro de los sectores de producción de bienes primarios, los sectores de aluminio (1415 Kt de CO₂eq en 2022) y cemento (4543 Kt de CO₂eq en 2022) son los mayores contribuyentes de emisiones de GEI (Commission & Energy, 2023). La industria cerámica es responsable del mayor aumento de emisiones de GEI en los últimos años. Sin embargo, también es notable que el sector cerámico ha disminuido significativamente sus emisiones de CO₂ desde 2005.

En el período de 2008 a 2010, ha habido una gran caída en las emisiones de CO₂ de la industria del cemento. Esto podría explicarse por la crisis económica que enfrentó Grecia durante esos años, lo que debilitó significativamente la industria de la construcción y, en consecuencia, redujo la producción de cemento en el país y, por lo tanto, la reducción de emisiones.

Aunque Alemania tiene con mucho la mayor participación de producción industrial en la UE, la intensidad energética de su sector industrial es menor que el promedio europeo (Fleiter et al., 2020). Según Eurostat, en el año fiscal de 2018, dentro del panorama económico de la UE-27, Alemania emergió como el principal contribuyente al valor agregado en varios sectores industriales clave. Específicamente, representó el 33.4% del valor agregado del sector manufacturero. Al mismo tiempo, las cifras de empleo de Alemania reflejaron este dominio, representando el 27.2% de la fuerza laboral de la UE-27 en manufactura (Albertone et al., 2021). Estas estadísticas subrayan el papel integral de Alemania en los sectores industrial y de servicios públicos dentro de la Unión Europea. Cada empleo en la producción básica de alta intensidad energética asegura aproximadamente dos empleos en otras ramas de la industria y en el sector de servicios. Eso significa que las IIEs generan alrededor de 2.5 millones de empleos en Alemania (Bauernhansl & Miehe, 2020).

En Alemania, la industria consume más de una cuarta parte de la energía del país, mientras que los sectores industriales de alta intensidad energética representaron alrededor del 77% del total de energía utilizada en 2021, siendo las industrias química y metalúrgica las principales consumidoras. Otros sectores con alto consumo energético incluyen la producción de coque, productos petrolíferos, vidrio, cerámica y productos de papel. El gas natural destaca como la principal fuente de energía en la industria alemana, sirviendo no solo como combustible sino también como materia prima crucial, particularmente dentro del sector químico (Fleiter et al., 2020).

Las IIEs en Alemania gastan más de 17 mil millones de euros en energía cada año, para un consumo neto de electricidad de 525 TWh (International Energy Agency, 2020). La Figura 2 muestra el consumo de energía industrial desagregado de Alemania y las emisiones de CO₂ del Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (EU-ETS). La industria del hierro y el acero representa la mayor parte de las emisiones industriales con alrededor del 28%, seguida de las refinerías (20%), la producción de clínker de cemento (18%) y la industria química (15%).

Paralelamente a la energía consumida por su industria, las IIEs alemanas invierten fuertemente en tecnologías de producción que ahorran energía y reducen emisiones. Entre 1990 y 2012, las IIEs redujeron sus emisiones de GEI en un total del 31%, mientras aumentaron la producción en un 42%. En 2020, las emisiones cayeron en la mayoría de los sectores industriales en comparación con 2019.

CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

La industria de Países Bajos es responsable del 31% del consumo final total de energía en el país (Bremer et al., 2024). Las industrias química y farmacéutica combinadas representan más de la mitad (53%) del consumo final total de energía dentro de la industria. Otros sectores con un consumo final de energía relativamente alto incluyen materiales de construcción, acero y las industrias de alimentos y bebidas (Figura 2). En 2022, el consumo total de energía de la industria mostró una tendencia a la baja en comparación con 2021 (es decir, 10.9%). Esto fue influenciado por medidas de eficiencia energética y el aumento de los precios de la energía, así como el crecimiento reducido en las actividades industriales gracias al gas natural y el petróleo como las principales fuentes de energía para la industria holandesa, que sirven tanto como combustible como materia prima, principalmente para la industria química (Anderson et al., 2021).

En términos de emisiones de GEI, los sectores de energía y calor son los principales contribuyentes dentro del Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (EU-ETS) en los Países Bajos. Sin embargo, han reducido sus emisiones en 17.32 Mton (o 34%) desde 2015 (Figura 1). Dentro de los sectores enfocados en esta comunicación, los productos químicos (9.25 Mton CO₂-eq en 2020), metales ferrosos (5.80 Mton) y la industria de fertilizantes (5.07 Mton) son los mayores contribuyentes (Figura 2). La industria de fertilizantes es responsable del mayor aumento en las emisiones de GEI en el período de 2005 a 2015, aunque estas emisiones se estabilizaron a partir de 2015. La gran disminución en las emisiones de la industria del cemento está directamente relacionada con el cierre de la planta ENCI Maastricht que producía clínker de Portland a partir de su propia mina de marga (Xavier & Oliveira, 2021).

Las industrias químicas y de fertilizantes son las que más energía consumen y las que más GEI emiten en los Países Bajos. Las tres mayores empresas químicas son Chemelot (Sittart Geleen), Shell Nederland (Moerdijk) y Dow Benelux B.V. (Hoek). Juntas, son responsables del 83% del total de emisiones de GEI (7.7 Mton) en la industria química. Yara Sluiskil es la mayor empresa especializada en la producción de fertilizantes y es responsable del 65% (3.3 Mton) del total de emisiones de GEI en la industria de fertilizantes, seguida por Chemelot con el 35% (1.8 Mton). La industria de metales ferrosos también muestra una participación significativa en el total de emisiones de GEI, de las cuales el 99.7% proviene de Tata Steel IJmuiden. El 0.3% restante proviene de FN Steel, una empresa relativamente pequeña especializada en alambres de acero.

Un resumen de las emisiones de CO₂ de los países mencionados se presenta en la Figura 2. Como se puede ver, el mayor productor es Alemania, seguido de España, luego los Países Bajos, y Grecia siendo el productor menos importante. Sin embargo, todos estos países deben aplicar una combinación de múltiples acciones de descarbonización (es decir, energías renovables (RES) junto con tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS)) para reducir sus emisiones de GEI bajo los objetivos de la UE para 2030.

CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

Fuente: (Carmona-Martínez, Rontogianni, et al., 2024)

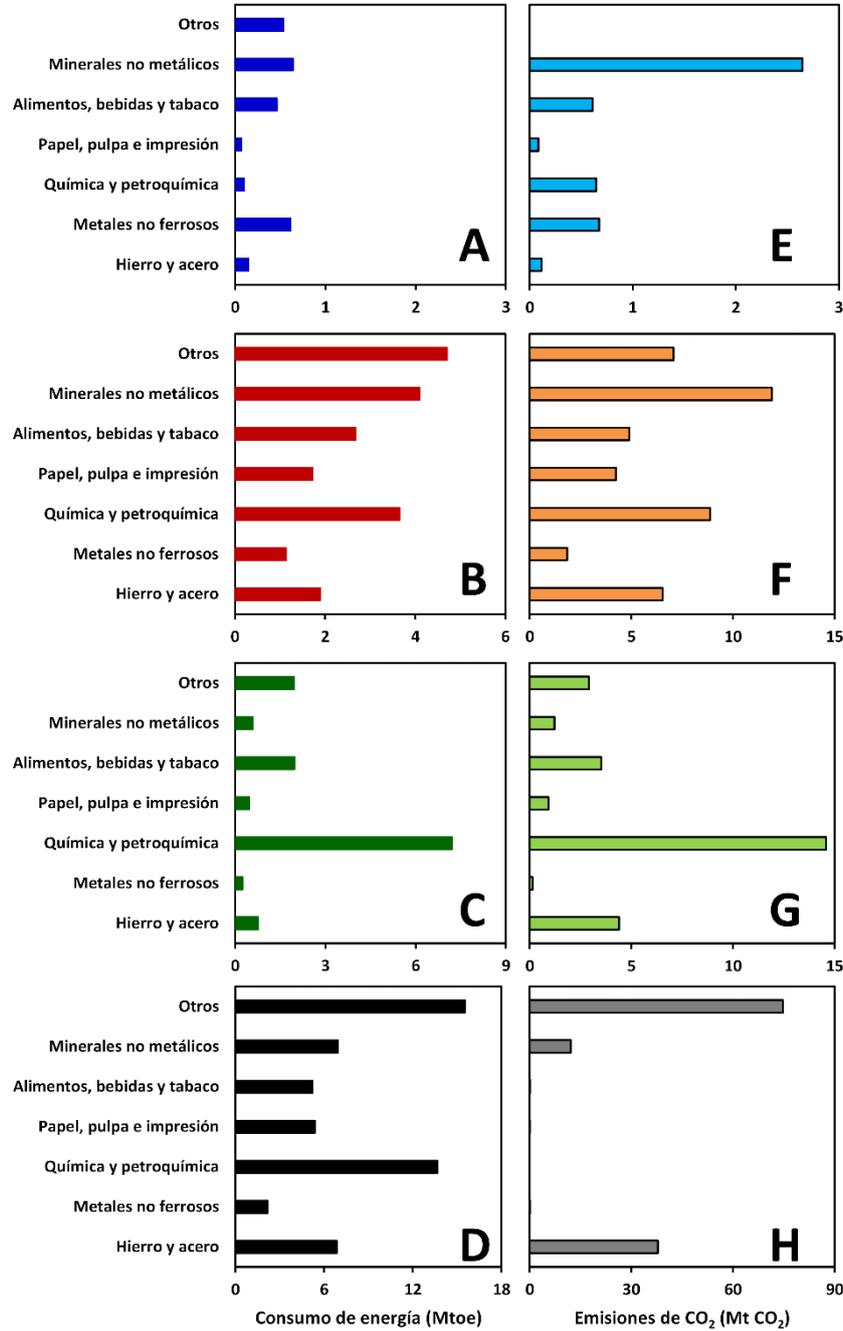


Figura 2. Consumo de energía industrial desagregado (A–D) y emisiones de CO₂ del EU-ETS (E–H) de Grecia (barras azul oscuro y azul claro), España (barras rojo oscuro y naranja), los Países Bajos (barras verde oscuro y verde claro) y Alemania (barras negras y grises) en 2021. (Commission & Energy, 2023)

ACCIONES DE DESCARBONIZACIÓN EN DIFERENTES SECTORES

Varias acciones de descarbonización pueden aplicarse en diferentes sectores para lograr una transición hacia una energía limpia (Commission & Innovation, 2023). En un contexto más amplio, estas podrían dividirse en acciones específicas implementadas en toda la industria (Cuadro 1).

La electrificación se refiere a la transición de los procesos de generación de calor en las Industrias Intensivas en Energía (IIE) para operar exclusivamente con electricidad verde (Wei et al., 2019). A medida que el suministro de energía depende cada vez más de fuentes renovables y se vuelve neutral en emisiones de gases de efecto invernadero, se pueden lograr reducciones sustanciales de emisiones a gran escala.

El uso de combustibles (bio)sintéticos tiene un gran potencial y se desarrollará más adelante en la presente comunicación. Consiste principalmente en reemplazar los combustibles fósiles, por ejemplo, con biomasa o gases sintéticos neutros en emisiones de gases de efecto invernadero (Simakov, 2017). Cabe señalar que, aunque el uso de biomasa o bioenergía es generalmente una opción comparativamente económica y muy efectiva, la disponibilidad de biomasa es limitada. La biomasa también se considera una solución en otras áreas (por ejemplo, calefacción residencial, transporte marítimo y aviación) para lograr la neutralidad climática. Esto plantea la cuestión de cómo lidiar con la escasez y los recursos finitos (Malico et al., 2019; Tzelepi et al., 2020).

El uso de la captura y utilización de carbono (CCU) o el almacenamiento de carbono (CCS) consiste en separar el CO₂ de los gases de escape de ciertas plantas o del aire y luego suministrarlo como materia prima a otros procesos, o alternativamente almacenarlo. La CCU y la CCS podrían volverse esenciales en algunos sectores donde hay un alto porcentaje de emisiones inevitables relacionadas con los procesos (por ejemplo, cal, cemento) (Kuramochi et al., 2012).

El uso de hidrógeno también juega un papel importante como fuente de energía limpia (Neuwirth et al., 2022). El objetivo en un futuro cercano es producir hidrógeno de manera neutral en emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo, mediante la electrólisis del agua basada en electricidad de fuentes renovables. Este concepto renovable corresponde a las tecnologías Power to X (PtX), un futuro clave de la transición energética (Genovese et al., 2023).

La producción de hidrógeno, aunque crucial para varias aplicaciones, todavía depende predominantemente del gas natural, lo que resulta en emisiones de CO₂ asociadas. Sin embargo, se está investigando activamente para encontrar enfoques alternativos que mejoren su eficiencia, como la mejora de los procesos de reciclaje. Esto se vuelve particularmente significativo en sectores intensivos en energía y recursos como la industria del acero.

Además de las estrategias mencionadas, investigaciones recientes destacan varios enfoques innovadores para descarbonizar las industrias intensivas en energía. La sinergia de la captura de carbono, la recuperación de calor residual y la producción de hidrógeno presenta un camino prometedor para la descarbonización industrial. La integración del Looping de Calcio (CaL) para la captura de CO₂ y la reforma seca de metano (MDR) para la producción de hidrógeno puede

CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales (Z. Wang et al., 2024). En el contexto europeo, el despliegue de tecnologías de hidrógeno y captura y utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) es crucial para lograr emisiones netas cero. Sin embargo, esta transición enfrenta varios desafíos, incluidos barreras tecnológicas e impactos potencialmente inequitativos en las comunidades (Sovacool et al., 2024). La industria del hierro y el acero, con su alto consumo de electricidad, ofrece un potencial sustancial para estrategias de respuesta a la demanda. La adopción de la reducción directa basada en hidrógeno en hierro y la tecnología de horno de arco eléctrico (H2-DRI-EAF) puede reducir significativamente los costos de electricidad y mejorar la flexibilidad en el uso de energía (Boldrini et al., 2024). Finalmente, la industria del cemento y el concreto puede adoptar un enfoque multifacético para la descarbonización, incorporando tecnologías alternativas de clínker, captura y almacenamiento de carbono, y mejora de la eficiencia energética. Las intervenciones políticas, la colaboración y la adopción de principios de economía circular son esenciales para superar los desafíos y lograr un desarrollo sostenible (Barbhuiya et al., 2024).

Cuadro 1. Resumen de soluciones clave para la descarbonización en industrias representativas. Adaptado de la fuente original: (D et al., 2021).

Industria	Electrificación	Hidrógeno verde	CCS*	CCU	Biomasa y biocombustibles
Cemento	- Electrificación del horno de cemento	- Uso de mezcla de hidrógeno y biomasa como reemplazo de combustibles fósiles	- Tecnologías de postcombustión - Combustión con oxígeno - Calcinación - Tecnología de separación directa	- Carbonatación de materia prima sólida	- Uso de biomasa como materia prima
Químicos	- Procesos electroquímicos - Ultrasonidos - Electrificación del craqueo de vapor	- Uso de hidrógeno bajo en CO2 en la producción química (amoníaco, metanol, etc.)	- Captura de CO2 (basada en aminas, adsorción, absorción física)	- Uso de CO2 como materia prima para muchos productos químicos básicos (alcoholes, polímeros, ácidos, etc.)	- Uso de biomasa como materia prima - Bioetanol para la cadena de valor de productos químicos de alto valor añadido
Acero	- Horno de arco eléctrico (EAF) en combinación con hierro reducido directo con hidrógeno (H-DRI) - Electrólisis del mineral de hierro	- Hidrógeno como agente reductor en DRI - Procesos de fundición con plasma de hidrógeno	- Generación de gas residual rico en CO2 para facilitar la captura de carbono - DRI + carbono - Proceso de fabricación de acero HIsarna	- Valorización de gases residuales del alto horno (por ejemplo, para producir materias primas químicas)	- Biomasa torrefactada reemplazando parcialmente el carbón inyectado

*CCS: Captura y almacenamiento de carbono; **CCU: Captura y utilización de carbono

EL POTENCIAL DE LA CAPTURA DE CARBONO Y SU (BIO)CONVERSIÓN EN COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

Aunque es difícil predecir el impacto exacto del cambio climático, los científicos coinciden en la necesidad de limitar las emisiones de CO₂. Una solución prometedora es convertir el CO₂ en combustibles y productos químicos sintéticos utilizando energía renovable, creando un ciclo de carbono artificial. El CO₂ es una fuente de carbono abundante, no inflamable y no corrosiva, que se encuentra en varios procesos industriales y en pozos de producción de gas natural y petróleo. Sin embargo, la conversión de CO₂ requiere hidrógeno y una inversión significativa de energía, lo que la hace potencialmente insostenible. Es crucial identificar rutas sostenibles de conversión de CO₂ mediante la comprensión adecuada de los mecanismos de conversión y una evaluación tecnoeconómica (Simakov, 2017). Las fuentes industriales de CO₂ incluyen la captura de carbono post-combustión, pre-combustión y oxi-combustión (Figura 3).

Las emisiones industriales de CO₂ con mayores concentraciones provenientes de los sectores del acero, cemento y productos químicos son particularmente interesantes para la conversión en combustibles sintéticos. Los procesos de pre-combustión, basados en métodos industriales escalados para la producción de hidrógeno y productos químicos, convierten materias primas como el carbón y el gas natural en gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono) a través de varios métodos. El CO se convierte luego en CO₂ mediante una reacción de cambio de gas-agua (WGS), produciendo hidrógeno adicional. El CO₂ capturado se elimina y el gas combustible rico en hidrógeno resultante puede usarse para la generación de energía y calor. Después de la WGS, los gases de combustión típicamente contienen una alta concentración de CO₂, lo que lleva al uso de solventes físicos para la captura de pre-combustión (X. Wang & Song, 2020). La captura post-combustión, un método para la captura de carbono, separa el CO₂ de los gases de combustión después de la combustión en varias instalaciones. Los gases de combustión de fuentes post-combustión típicamente tienen baja presión parcial de CO₂ y/o baja concentración de CO₂. Sin embargo, algunos procesos industriales pueden tener concentraciones más altas de CO₂. Se utilizan soluciones acuosas de aminas basadas en absorción química para la captura post-combustión (Meng et al., 2022). La captura post-combustión se considera una opción prometedora para reducir las emisiones de CO₂ en las plantas de energía de carbón existentes. La oxi-combustión, una tecnología que implica la combustión de materias primas en un entorno con oxígeno casi puro o una mezcla rica en O₂ - CO₂, resulta en un gas de combustión con una alta concentración de CO₂. Esto elimina la necesidad de medidas adicionales de captura de CO₂. Sin embargo, lograr oxígeno de alta pureza típicamente requiere una unidad de separación de aire criogénica, lo que aumenta el costo total. A pesar de los desafíos, los procesos de oxi-combustión son relevantes en múltiples sectores industriales intensivos en energía (Pisciotta et al., 2022).

En cuanto a los métodos para convertir el CO₂ en combustibles, existen varios de ellos. Las vías termocatalíticas son particularmente importantes ya que son tecnologías bien establecidas que ya están en uso. Una de estas vías implica la reacción del metano (CH₄) con agua a través de la reforma de vapor de metano (MSR) o con CO₂ mediante la reforma seca de metano (MDR) para generar gas de síntesis, una mezcla compuesta principalmente de H₂ y CO. La reacción inversa de cambio de gas-agua (RWGS) es otro método efectivo para la hidrogenación de CO₂, resultando en la producción de gas de síntesis. Este gas de síntesis producido es una materia prima química valiosa que puede transformarse en combustibles a través de la síntesis de Fischer-Tropsch (FTS).

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

Las vías bioquímicas también tienen potencial para convertir el CO₂ industrial en combustibles. Por ejemplo, en la industria del acero, el CO₂ de los gases de combustión puede convertirse en bioetanol. El metano también puede producirse a partir de CO₂ mediante microorganismos hidrogenotróficos alimentados con H₂. Además de las vías termocatalíticas y bioquímicas establecidas, existen otros métodos innovadores de baja temperatura y abióticos para la conversión de CO₂ que merecen atención. La electrólisis de baja temperatura es uno de estos métodos, que utiliza electrocatalizadores en reactores de membrana de electrolito de polímero para facilitar la reducción de CO₂ a temperaturas significativamente más bajas que los procesos tradicionales (Küngas, 2020). Otra vía prometedoras es la conversión termo-catalítica, que emplea catalizadores avanzados para permitir la hidrogenación de CO₂ en condiciones más suaves en comparación con los métodos convencionales de alta temperatura (Len & Luque, 2023).

El paradigma naciente de la captura y conversión integrada de CO₂ (iCCC) ha surgido como un tema convincente dentro del dominio de la gestión del dióxido de carbono. Este enfoque combina la captura y transformación de CO₂, lo que potencialmente optimiza el proceso general y mejora las eficiencias del sistema (Sun et al., 2021). Aunque la presente comunicación se centra en comparar metodologías convencionales de conversión de CO₂ con aquellas que involucran microorganismos, la perspectiva de iCCC merece un riguroso examen futuro.

Fuente: (Carmona-Martínez, Rueda, et al., 2024)

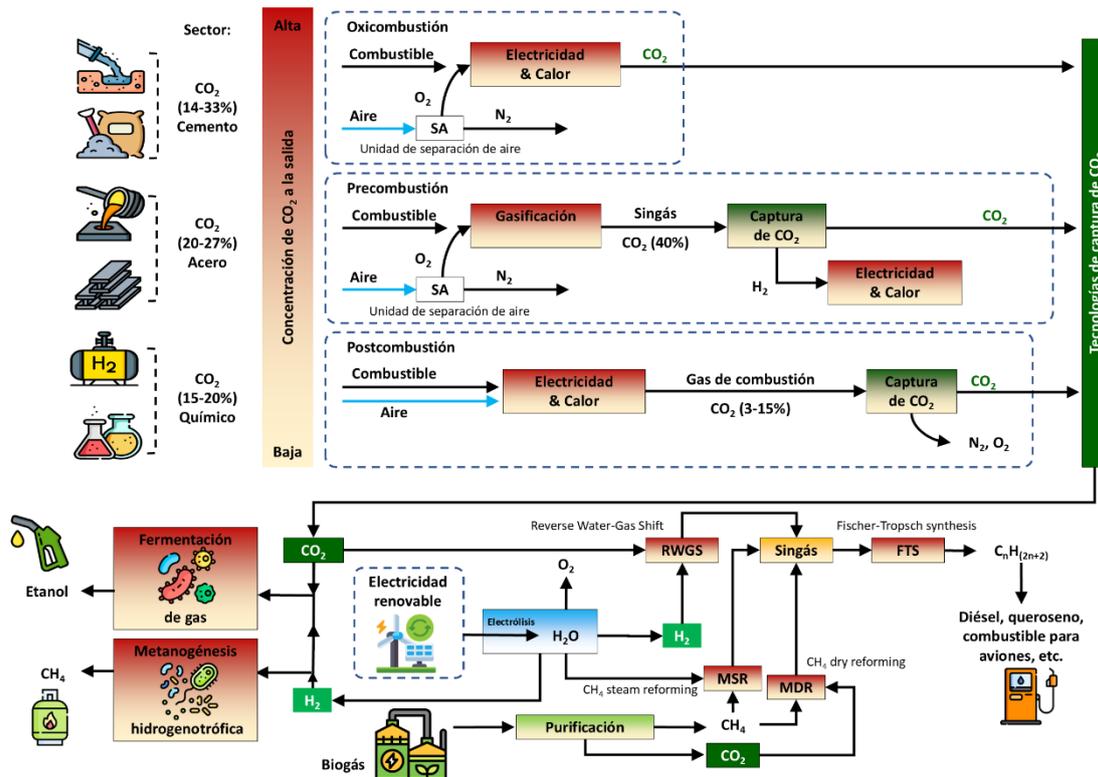


Figura 3. Diagrama esquemático de las fuentes industriales existentes de CO₂ (arriba) y las vías disponibles para la conversión de CO₂ en combustibles. Adaptado y redibujado de las fuentes originales. (Simakov, 2017; X. Wang & Song, 2020).

CONVERSIÓN BIOLÓGICA DE CO₂

Transformar el CO₂ en un recurso valioso ha sido un punto focal de la comunidad científica en años recientes. La búsqueda de vías sostenibles y económicamente viables ha llevado a un aumento del interés en los métodos de conversión química, incluyendo técnicas termocatalíticas, electrocatalíticas y fotocatalíticas. Por otro lado, la naturaleza ofrece un mecanismo eficiente y probado para la fijación de CO₂ en forma de organismos fotosintéticos, que han estado aprovechando la luz solar para convertir CO₂ y agua en materia orgánica durante miles de millones de años (Farquhar et al., 2001). Los bioalcoholes y el biodiésel están entre los muchos productos químicos valiosos que pueden producirse a través de la conversión biológica de CO₂ (Gebremariam & Marchetti, 2018; Weber et al., 2010). En comparación con las corrientes de CO₂ actualmente utilizadas en la industria química para la síntesis de urea, metanol, pigmentos y carbonatos, los organismos fotosintéticos en tierra y en los océanos convierten una cantidad mucho mayor de CO₂ en biomasa cada año (Barber, 2009).

Los microorganismos que fijan CO₂ ofrecen una vía prometedora para la producción controlada de biocombustibles deseados dentro de un entorno confinado, como un biorreactor. Este enfoque no necesariamente depende de la luz solar, a diferencia de la fotosíntesis, que tiene una eficiencia de conversión de menos del 1%. Es importante destacar que la capacidad de asimilar CO₂ no es exclusiva de los organismos fotosintéticos como las plantas, algas y cianobacterias. Las bacterias autótrofas también han surgido como un área de investigación prometedora. Estos microorganismos que utilizan CO₂ han sido estudiados extensamente y tienen potencial para un mayor desarrollo en bioprocesos a escala industrial (Jajesniak et al., 2014b).

Sin embargo, estos microorganismos no han evolucionado naturalmente para la producción a escala industrial de productos químicos deseados, y muchas de sus propiedades inherentes pueden no estar optimizadas para este propósito. La ingeniería genética ha abierto posibilidades para mejorar sus fenotipos y ampliar sus capacidades de síntesis química (**Cuadro 2**). La vasta diversidad de microorganismos capaces de utilizar CO₂, junto con los avances en técnicas de modificación genética y en la ingeniería de proteínas, ha ampliado significativamente la gama de productos biológicos que pueden sintetizarse directamente a partir de CO₂. Este enfoque biológico para la captura y utilización de carbono (CCU) ofrece una alternativa atractiva a los métodos de biorefinería basados en biomasa (Xie, 2022; Zhang et al., 2017).

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los microorganismos que utilizan CO₂ para la producción química a escala industrial. Adaptado de la fuente original (Jajesniak et al., 2014a).

Microorganismos	Ventajas	Desventajas
Algas	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Abundantemente accesibles ↑ Diversos métodos de cultivo ↑ Proliferación rápida ↑ Alta concentración celular ↑ Absorción eficiente de CO₂ ↑ Ricas en composición lipídica ↑ Productoras de compuestos de alto valor ↑ Organismos susceptibles a modificaciones genéticas 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Organismos dependientes de la luz ↓ El agua es esencial para su crecimiento ↓ Alta demanda de fósforo ↓ Los biodiéseles derivados de algas a menudo se perciben como de calidad inferior
Cianobacterias	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Prosperan con necesidades nutricionales mínimas ↑ Cultivo rentable ↑ Tasas de crecimiento superiores en comparación con algas y plantas superiores ↑ Contenido significativo de lípidos ↑ Amplio espectro de derivados de combustible (H₂, etanol, diésel, metano, etc.) ↑ Organismos susceptibles a alteraciones genéticas 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Eficiencia reducida fuera de condiciones ideales de temperatura, pH y luz ↓ Crecimiento limitado por fuentes de carbono y nitrógeno (como nitrato, amoníaco, urea, etc.) ↓ Necesidad de agitación durante el crecimiento, lo que lleva a mayores gastos operativos
B-Proteobacterias	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Microorganismos que prosperan en ambientes ricos en oxígeno (sin necesidad de condiciones anóxicas) ↑ Diversas fuentes de carbono y vías de utilización ↑ Capacidad para almacenar carbono en forma de PHA ↑ Organismos que pueden ser alterados genéticamente 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ El proceso de fermentación de gas está actualmente en etapa de desarrollo
Clostridia	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Amplia gama de sustratos de carbono (incluyendo carbohidratos, CO₂/H₂ y CO) ↑ Múltiples rutas para generar metabolitos beneficiosos (como etanol, acetato, acetona, lactato, butanol, etc.) ↑ Cierta resistencia a metabolitos dañinos ↑ Organismos que pueden ser modificados genéticamente 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ El cultivo en un ambiente anaeróbico puede llevar a un aumento de los gastos operativos ↓ La técnica de fermentación de gas está actualmente en proceso de desarrollo
Arqueas	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Capacidad para generar metano ↑ Capacidad para almacenar PHA ↑ Excelentes fuentes de enzimas resistentes a altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ El cultivo en un ambiente sin oxígeno puede aumentar los gastos operativos ↓ La técnica de fermentación de gas está actualmente en desarrollo ↓ Replicar las condiciones de crecimiento puede ser un desafío ↓ Organismos que no son susceptibles a modificaciones genéticas

EJEMPLOS INDUSTRIALES DE BIOCONVERSIÓN DE CO₂ EN COMBUSTIBLES

Existen ejemplos actuales de bioconversión de CO₂ en combustibles. Uno de estos ejemplos se encuentra en la industria del acero, llevado a cabo en las instalaciones de ArcelorMittal como parte del proyecto Steelanol. Este proyecto involucra una planta en Gante, Bélgica, con el objetivo de producir 80 millones de litros de bioetanol, destinado a sectores como el transporte (Figura 4). Esta solución de descarbonización ha sido financiada por diversas fuentes, incluida la Unión Europea. Se estima que la planta de Steelanol evitará la emisión de aproximadamente 125,000 toneladas por año. El bioetanol producido se mezclará con gasolina convencional y se utilizará como un combustible alternativo de bajo carbono para el sector del transporte.

En el campo de la biometanación, la innovación se puede ver en las operaciones de Electrochaea, una empresa que ha logrado avances significativos en el proceso de biometanación (AHRENS et al., 2021). Un proceso complejo de dos pasos que implica el uso de microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos para convertir hidrógeno renovable y CO₂ residual (industrial) en metano renovable, el componente principal del gas natural (Thema et al., 2019). Este enfoque también implica capturar CO₂ biogénico de diversas fuentes como lecherías, plantas de tratamiento de aguas residuales y vertederos, para producir un combustible de reemplazo directo que se alinea con la tendencia emergente de los mercados de carbono. Sin embargo, en casos donde se persigue la utilización industrial de CO₂, puede ser necesario un paso de limpieza similar al empleado en el proyecto Steelanol mencionado anteriormente.

Fuente: (Carmona-Martínez, Rueda, et al., 2024)

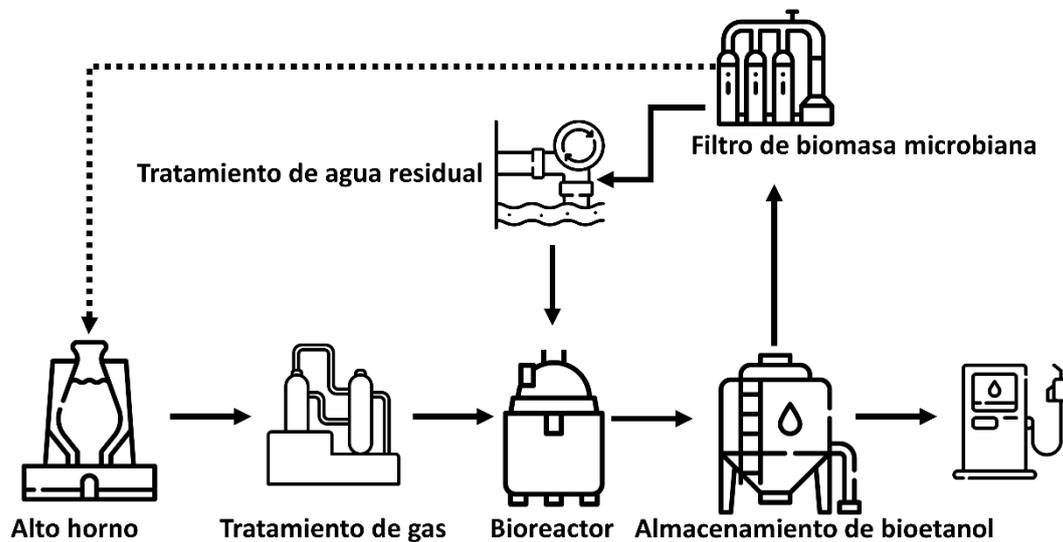


Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del proceso Steelanol® para la bioconversión de CO₂ en los gases de escape del alto horno en etanol. Redibujado y adaptado de su fuente original (Van der Stricht et al., 2019).

DESAFÍOS PARA LAS INDUSTRIAS INTENSIVAS EN ENERGÍA (IIE) EN EUROPA

Las empresas no realizarán las inversiones necesarias en reemplazo si las condiciones económicas y regulatorias a largo plazo son inciertas (Rattle et al., 2024). A la luz de las crecientes demandas de protección climática, reinvertir en tecnologías convencionales e intensivas en emisiones enfrenta una mayor probabilidad de ser desmanteladas prematuramente, aumentando el riesgo asociado con tales esfuerzos. Desde el punto de vista de las empresas como actores económicos racionales, solo hay dos opciones: invertir en tecnologías climáticamente neutras en el próximo ciclo de inversión, o cerrar las plantas de producción existentes al final de su vida útil y, si es necesario, realizar nuevas inversiones en el extranjero, desencadenando así pérdidas masivas de empleos (también conocido como el fenómeno de fuga de carbono) (Verde, 2020).

Como se ilustra arriba, los potenciales tecnológicos que podrían aprovecharse para hacer que las IIEs sean casi completa y climáticamente neutras ya existen hoy en día (o se están desarrollando rápidamente). Pero estas tecnologías y procesos de producción siguen siendo significativamente más caros hoy que los procesos de fabricación convencionales, y los costes adicionales no pueden trasladarse a los clientes debido a la feroz competencia internacional. Por lo tanto, para estimular la inversión en estas innovaciones ahora, los actores de la industria necesitan señales políticas de que el gobierno apoyará activamente esta transformación.

Un estudio reciente analiza los impulsores de la descarbonización industrial, y estos pueden agruparse en las siguientes cuatro áreas (Nurdiawati & Urban, 2021):

- La importancia de las políticas internacionales, europeas y nacionales, como el Acuerdo de París y el EU ETS, que establecen objetivos ambiciosos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- La fijación de precios del carbono, incluidos los impuestos y los sistemas de comercio de derechos de emisión, se destaca como una herramienta económica crítica para incentivar la reducción de emisiones, particularmente en Europa, que ha implementado con éxito impuestos al CO₂ desde 1991 en algunos países de la UE.
- Las medidas de eficiencia energética también son cruciales, con directivas como la EED enmendada que establece objetivos para mejorar la eficiencia energética para 2030.
- Por último, se identifican la I+D+i y el apoyo tecnológico como esenciales para promover tecnologías de bajo carbono y evitar la fuga de carbono, con programas de financiación como el Fondo de Innovación de la UE que apoyan esta transición.

Colectivamente, estos impulsores subrayan la necesidad de un apoyo político integral para lograr los objetivos climáticos a largo plazo y la competitividad industrial.

CONCLUSIONES

Las industrias intensivas en energía (son fundamentales en la ambiciosa agenda de descarbonización de Europa, dado su sustancial aporte a las emisiones totales. A pesar de esto, una estrategia de descarbonización integral tanto a nivel de la UE como nacional sigue siendo ambigua. Aunque numerosos sectores han iniciado esfuerzos para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, aún no han alcanzado sus objetivos establecidos. En consecuencia, se necesitan soluciones pioneras.

Los sectores presentados en esta comunicación han sido los metales no ferrosos, acero, cemento, cal, productos químicos, fertilizantes, cerámica y vidrio. Esta comunicación no sólo describió brevemente el estado actual de cada sector, sino que también enlistó una serie de estrategias representativas de descarbonización que podrían mitigar su impacto ambiental.

Además, esta comunicación describió los ecosistemas de las IIEs en diversos sectores, con un enfoque particular en cuatro países europeos ejemplares: España, Grecia, Alemania y los Países Bajos, informando sobre innovaciones tecnológicas específicas y los desafíos que impiden su adopción generalizada, junto con posibles medidas correctivas. Un conjunto de estrategias de descarbonización es aplicable a varios sectores para facilitar una transición energética sin problemas. En términos generales, estas estrategias pueden categorizarse en implementaciones a nivel industrial, como la electrificación, la utilización de hidrógeno verde, biomasa, combustibles bio(sintéticos), y el despliegue de captura y utilización de carbono y almacenamiento.

La disposición de las empresas a invertir en tecnologías de reemplazo dependerá de marcos económicos y regulatorios estables a largo plazo. Mientras tanto, las reinversiones en tecnologías tradicionales y altamente emisoras tienen cada vez más probabilidades de enfrentar un desmantelamiento prematuro, aumentando así los riesgos asociados. Desde una perspectiva corporativa, las opciones económicas racionales son dos: invertir en tecnologías climáticamente neutras en el próximo ciclo de inversión o cerrar las instalaciones existentes al llegar al final de su vida útil operativa, potencialmente trasladando inversiones al extranjero y precipitando pérdidas significativas de empleos.

Las capacidades tecnológicas para lograr que las IIEs sean climáticamente neutras no solo están disponibles, sino que también están evolucionando rápidamente. Sin embargo, estas tecnologías y procesos de descarbonización actualmente incurren en costos marcadamente más altos que los métodos de fabricación tradicionales. La imposibilidad de transferir la carga financiera adicional a los consumidores, debido a la intensa competencia global, dificulta su adopción. Por lo tanto, para incentivar la inversión inmediata en estas innovaciones, es crucial que los actores de la industria reciban garantías políticas inequívocas de que el gobierno apoyará activamente esta transformación de descarbonización.

FINANCIACIÓN

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto RE4Industry, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención No. 952936.

BIBLIOGRAFÍA

- AHRENS, T., FONTAINE, D., Hafenbradl, D., HOERL, M., PESIC, A., & SILVA, K. T. (2021). *Method to use industrial CO2 containing gas for the production of a methane enriched gas composition*. Google Patents.
- Albertone, G., Allen, S., & Redpath, A. (2021). *Key figures on European business*. <https://doi.org/10.2785/82544>
- Anderson, B., Cammeraat, E., Dechezleprêtre, A., Dressler, L., Gonne, N., Lalanne, G., Guilhoto, J. M., & Theodoropoulos, K. (2021). *Policies for a climate-neutral industry: Lessons from the Netherlands*.
- Barber, J. (2009). Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. *Chem. Soc. Rev.*, 38(1), 185–196. <https://doi.org/10.1039/B802262N>
- Barbhuiya, S., Kanavaris, F., Das, B. B., & Idrees, M. (2024). Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*, 86, 108861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861>
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., & Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>
- Bauernhansl, T., & Mieke, R. (2020). Industrielle Produktion – Historie, Treiber und Ausblick. In T. Bauernhansl (Ed.), *Fabrikbetriebslehre 1: Management in der Produktion* (pp. 1–33). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44538-9_1
- Boldrini, A., Koolen, D., Crijns-Graus, W., Worrell, E., & van den Broek, M. (2024). Flexibility options in a decarbonising iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113988>
- Bremer, L., den Nijs, S., & de Groot, H. L. F. (2024). The energy efficiency gap and barriers to investments: Evidence from a firm survey in The Netherlands. *Energy Economics*, 133, 107498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107498>
- Carmona-Martínez, A. A., Rontogianni, A., Zeneli, M., Grammelis, P., Birgi, O., Janssen, R., Di Costanzo, B., Vis, M., Davidis, B., Reumerman, P., Rueda, A., & Jarauta-Córdoba, C. (2024). Charting the Course: Navigating Decarbonisation Pathways in Greece, Germany, The Netherlands, and Spain's Industrial Sectors. *Sustainability*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/su16146176>
- Carmona-Martínez, A. A., Rueda, A., & Jarauta-Córdoba, C. A. (2024). Deep decarbonization of the energy intensive manufacturing industry through the bioconversion of its carbon emissions to fuels. *Fuel*, 371, 131922. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131922>

CONAMA 2024

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

- Commission, E., & Directorate-General for Internal Market Entrepreneurship and SMEs, I. (2019). *Masterplan for a competitive transformation of EU energy-intensive industries enabling a climate-neutral, circular economy by 2050*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2873/854920>
- Commission, E., & Energy, D.-G. for. (2023). *EU energy in figures – Statistical pocketbook 2023*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2833/502436>
- Commission, E., & Innovation, D.-G. for R. and. (2023). *Scaling up innovative technologies for climate neutrality – Mapping of EU demonstration projects in energy-intensive industries*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2777/926968>
- D, S., A, W., P, S., A, T., H, H. G., N, G., D, D., R, C., Z, C., A, G., J, S., & F, P. (2021). *Pilot Industrial technology prospect report: R&I evidence on EU development of low-carbon industrial technologies*. KI-05-21-085-EN-N (online). <https://doi.org/10.2777/48648> (online)
- d'Aprile, P., Engel, H., Helmcke, S., Hieronimus, S., Naucner, T., Pinner, D., van Gendt, G., Walter, D., & Witteveen, M. (2020). How the European Union could achieve net-zero emissions at net-zero cost. In *McKinsey & Company: Chicago, IL, USA*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/how-the-european-union-could-achieve-net-zero-emissions-at-net-zero-cost>
- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., & Berry, J. A. (2001). Models of Photosynthesis. *Plant Physiology*, 125(1), 42–45. <https://doi.org/10.1104/pp.125.1.42>
- Fleiter, T., Rehfeldt, M., Neuwirth, M., & Herbst, A. (2020). Deep decarbonisation of the German industry via electricity or gas? A scenario-based comparison of pathways. *Proceedings of the ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*.
- França, A., López-Manuel, L., Sartal, A., & Vázquez, X. H. (2023). Adapting corporations to climate change: How decarbonization impacts the business strategy–performance nexus. *Business Strategy and the Environment*, 32(8), 5615–5632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bse.3439>
- Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168, 74–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>
- Genovese, M., Schlüter, A., Scionti, E., Piraino, F., Corigliano, O., & Fragiaco, P. (2023). Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(44), 16545–16568. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.194>
- International Energy Agency. (2020). *Germany 2020*. <https://www.iea.org/reports/germany-2020>
- Jajesniak, P., Ali, H. E. M. O., & Wong, T. S. (2014a). Carbon Dioxide Capture and Utilization using Biological Systems: Opportunities and Challenges. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 4, 1–15. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54549756>

- Jajesniak, P., Ali, H., & Wong, T. S. (2014b). Carbon dioxide capture and utilization using biological systems: opportunities and challenges. *J Bioprocess Biotech*, 4(155), 2.
- Küngas, R. (2020). Review—Electrochemical CO₂ Reduction for CO Production: Comparison of Low- and High-Temperature Electrolysis Technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(4), 044508. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7099>
- Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012). Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(1), 87–112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.05.001>
- Len, T., & Luque, R. (2023). Addressing the CO₂ challenge through thermocatalytic hydrogenation to carbon monoxide, methanol and methane. *Green Chemistry*, 25(2), 490–521. <https://doi.org/10.1039/D2GC02900F>
- Madurai Elavarasan, R., Pugazhendhi, R., Irfan, M., Mihet-Popa, L., Khan, I. A., & Campana, P. E. (2022). State-of-the-art sustainable approaches for deeper decarbonization in Europe – An endowment to climate neutral vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112204>
- Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. O. (2019). Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 960–977. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022>
- Meng, F., Meng, Y., Ju, T., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2022). Research progress of aqueous amine solution for CO₂ capture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112902>
- Neuwirth, M., Fleiter, T., Manz, P., & Hofmann, R. (2022). The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. *Energy Conversion and Management*, 252, 115052. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115052>
- Nurdiawati, A., & Urban, F. (2021). Towards Deep Decarbonisation of Energy-Intensive Industries: A Review of Current Status, Technologies and Policies. *Energies*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/en14092408>
- Perathoner, S., Van Geem, K. M., Marin, G. B., & Centi, G. (2021). Reuse of CO₂ in energy intensive process industries. *Chem. Commun.*, 57(84), 10967–10982. <https://doi.org/10.1039/D1CC03154F>
- Pisciotta, M., Pilorgé, H., Feldmann, J., Jacobson, R., Davids, J., Swett, S., Sasso, Z., & Wilcox, J. (2022). Current state of industrial heating and opportunities for decarbonization. *Progress in Energy and Combustion Science*, 91, 100982. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100982>

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

- Rattle, I., Gailani, A., & Taylor, P. G. (2024). Decarbonisation strategies in industry: going beyond clusters. *Sustainability Science*, *19*(1), 105–123. <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01313-4>
- Sanjuán, M. A., Argiz, C., Mora, P., & Zaragoza, A. (2020). Carbon Dioxide Uptake in the Roadmap 2050 of the Spanish Cement Industry. *Energies*, *13*(13). <https://doi.org/10.3390/en13133452>
- Schlacke, S., Wentzien, H., Thierjung, E.-M., & Köster, M. (2022). Implementing the EU Climate Law via the 'Fit for 55' package. *Oxford Open Energy*, *1*, oiab002. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiab002>
- Serrano González, J., & Álvarez Alonso, C. (2021). Industrial electricity prices in Spain: A discussion in the context of the European internal energy market. *Energy Policy*, *148*, 111930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111930>
- Simakov, D. S. A. (2017). *Renewable synthetic fuels and chemicals from carbon dioxide: fundamentals, catalysis, design considerations and technological challenges*. Springer.
- Sovacool, B. K., Del Rio, D. F., Herman, K., Iskandarova, M., Uratani, J. M., & Griffiths, S. (2024). Reconfiguring European industry for net-zero: a qualitative review of hydrogen and carbon capture utilization and storage benefits and implementation challenges. *Energy & Environmental Science*, *17*(10), 3523–3569. <https://doi.org/10.1039/D3EE03270A>
- Sun, S., Sun, H., Williams, P. T., & Wu, C. (2021). Recent advances in integrated CO₂ capture and utilization: a review. *Sustainable Energy & Fuels*, *5*(18), 4546–4559. <https://doi.org/10.1039/D1SE00797A>
- Thema, M., Bauer, F., & Sterner, M. (2019). Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *112*, 775–787. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>
- Tzelepi, V., Zeneli, M., Kourkoumpas, D.-S., Karampinis, E., Gypakis, A., Nikolopoulos, N., & Grammelis, P. (2020). Biomass Availability in Europe as an Alternative Fuel for Full Conversion of Lignite Power Plants: A Critical Review. In *Energies* (Vol. 13, Issue 13). <https://doi.org/10.3390/en13133390>
- Van der Stricht, W., De Maré, C., Plattner, T., Fleischanderl, A., Haselgruebler, M., Nair, P., & Wolf, C. (2019). *Sustainable production of low carbon, renewable fuels by fermenting industrial process gasses from the iron and steel industry*. <https://cordis.europa.eu/project/id/656437/results>
- Verde, S. F. (2020). The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: the econometric evidence. *Journal of Economic Surveys*, *34*(2), 320–343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/joes.12356>
- Wang, X., & Song, C. (2020). Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective. *Frontiers in Energy Research*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849>

VÍAS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS SECTORES INDUSTRIALES DE ESPAÑA, GRECIA, ALEMANIA Y PAÍSES BAJOS

- Wang, Z., Huang, Z., Huang, Y., Wittram, C., Zhuang, Y., Wang, S., & Nie, B. (2024). Synergy of carbon capture, waste heat recovery and hydrogen production for industrial decarbonisation. *Energy Conversion and Management*, 312, 118568. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118568>
- Weber, C., Farwick, A., Benisch, F., Brat, D., Dietz, H., Subtil, T., & Boles, E. (2010). Trends and challenges in the microbial production of lignocellulosic bioalcohol fuels. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(4), 1303–1315. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2707-z>
- Wei, M., McMillan, C. A., & de la Rue du Can, S. (2019). Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 140–148. <https://doi.org/10.1007/s40518-019-00136-1>
- Wesseling, J. H., Lechtenböhmer, S., Åhman, M., Nilsson, L. J., Worrell, E., & Coenen, L. (2017). The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1303–1313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.156>
- Xavier, C., & Oliveira, C. (2021). Decarbonisation options for the Dutch cement industry. *PBL Netherlands Environment Assessment Agency, Hague*.
- Xie, D. (2022). Continuous biomanufacturing with microbes — upstream progresses and challenges. *Current Opinion in Biotechnology*, 78, 102793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102793>
- Zhang, Y.-H. P., Sun, J., & Ma, Y. (2017). Biomanufacturing: history and perspective. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 44(4–5), 773–784. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1863-2>