Publicación de RE4Industry













Autores: Olgu Birgi, Rainer Janssen

Editores: Alessandro Carmona, Patrick Reumerman, Manolis Karampinis, Andreas Ziogos

Colaboradores: Asier Rueda, Aimilia Lympeti, Manolis Karampinis, Alessandro Carmona, Alejandro

Fresneda, Irene Bolea, Clara Jarauta Córdoba, Georgios Zisopoulos, Myrto Zeneli, Panagiotis Grammelis, Olgu Birgi, Rainer Janssen, Asier Zubero, Martijn Vis, Bas Davidis, Patrick Reumerman, Maria Proenca, Suzanne Verhoef, Katia Paglé, Ioannis Karnachoritis, Marina Papageorgiou, Cosette Khawaja, Martijn Vis, Emmanouil

Karampinis, Ana Sofia Praxedes

ISBN: 3-936338-87-6

Publicación: © 2023 por WIP Renewable Energies, Múnich (Alemania)

Contacto: WIP Renewable Energies

Sylvensteinstr. 2, 81369 Munich, Germany olgu.birgi@wip-munich.de, Tel.: +49 89 72012765

www.wip-munich.de

Sitio web: https://re4industry.eu

Derechos: todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción en forma alguna o

por medio alguno de cualquier parte de la presente publicación para su uso con fines comerciales sin la autorización escrita del editor. Los autores no garantizan la exactitud ni la integridad de la información y los datos incluidos o descritos en la

presente publicación.

Exención de El presente proyecto ha recibido financiación del Programa Marco de Investigación **responsabilidad:** e Innovación de la Unión Europea Horizonte 2020 en el marco del acuerdo de

subvención n.º 952936. La información y las opiniones presentadas en este documento y las de los autores no reflejan necesariamente la opinión oficial de la Unión Europea. Ni las instituciones u organismos de la Unión Europea ni cualquier persona que actúe en su nombre serán responsables del uso que pueda hacerse de

la información aquí facilitada.





RENEWABLE

Información sobre RE4Industry

La UE ha iniciado una descarbonización progresiva con el ambicioso objetivo de alcanzar la neutralidad en carbono para 2050. Además, la invasión de Ucrania por parte de Rusia y la crisis de la COVID-19 han hecho un mayor hincapié en la necesidad inmediata de lograr la independencia de los combustibles fósiles y en la importancia de la seguridad energética. Las soluciones de energía renovable desempeñarán una función destacada a la hora de reducir las emisiones de GEI y de garantizar la seguridad energética mediante la producción de energía limpia e inagotable a nivel local.

Se prevé que las industrias de gran consumo de energía desempeñen un papel importante en esta transición, ya que representan el 24 % del consumo final de energía, pero se requieren un enfoque y una estrategia a largo plazo con el fin de preservar la competitividad y al mismo tiempo contribuir a los objetivos de descarbonización de la UE.

En línea con este objetivo, el proyecto tiene como meta propiciar que el sector de las industrias de gran consumo de energía de Europa lleve a cabo una transición fluida y más segura hacia la adopción de energías renovables en sus procesos e instalaciones de producción. El proyecto guiará a las industrias de gran consumo de energía y a sus organizaciones en el camino hacia la descarbonización total de aquí a 2050. Para ello, facilita un enfoque y orientación para que establezcan su estrategia a largo plazo con miras a una retroadaptación coherente y más segura y a la integración de soluciones de energía renovable actuales y futuras en sus instalaciones y procesos.

Objetivo de la publicación

El objetivo de esta publicación es resumir el trabajo llevado a cabo en el marco del proyecto de RE4Industry y orientar a los agentes de la industria para que realicen con éxito la descarbonización de sus sectores.

La publicación comienza presentando una visión de conjunto de las industrias de gran consumo de energía y de la situación en que se encuentra dicho sector dentro de la UE. En el segundo capítulo se recogen casos de organizaciones emblemáticas que están adoptando de manera satisfactoria soluciones de energía renovable. En el tercer capítulo se presentan las enseñanzas extraídas de los tres estudios de caso industriales de Corbion, Sidenor y Mytilineos. Por último, en el cuarto capítulo se ponen de relieve varias tecnologías de energía renovable que pueden utilizarse a fin de generar calor o electricidad para industrias de gran consumo de energía.

En la parte final de la publicación se presenta brevemente a los socios de RE4Industry para el proyecto.

Índice

Información sobre RE4Industry	3
Objetivo de la publicación	3
1- Situación del sector de las industrias de gran consumo de energía en la UE	6
Metales no férreos	8
Cemento	10
Cal	12
Productos químicos	14
Acero	16
Vidrio	18
2- Soluciones de energía renovable	20
Electricidad renovable	21
Calor renovable	22
Energía solar térmica	23
Bomba de calor	24
Energía geotérmica	25
Biomasa	26
Biocombustibles	27
Hidrógeno verde	28
3- Casos de integración exitosa de la energía renovable en industrias de gran consumo de energía	30
Acería de ArcelorMittal Ghent	31
Generación de electricidad <i>in situ</i> a través de tecnología fotovoltaica en la industria siderúr Ebroacero	•
Coprocesamiento de biomasa en la industria del cemento: fábrica de cemento de HERACLES-Holcim en Milaki	33
Implantación de la combustión combinada de biocombustibles en los hornos de la industria Verallia Spain S.A.	
(Zaragoza)	
Uso de tecnología solar fotovoltaica (ACE) en el Parque Solar de Witnica	
4- Estudios de caso sobre soluciones de energía renovable en industrias de gran consumo de energía	
Mytilineos	
Corbion	38
Sidenor	
Los socios	
Expertos tecnológicos y sociales	
Asociaciones orientadas a la energía renovable	. 41
Industrias de gran consumo de energía	41

Ilustraciones

Ilustración 1: emisiones de CO₂ en el RCDE UE procedentes de las industrias
de gran consumo de energía, EU-27, 2008-20186
Ilustración 2: hoja de ruta de CEMBUREAU para la reducción del CO ₂ en la cadena de valor del cemento
(cinco elementos: clínker, cemento, hormigón, construcción y recarbonatación)11
Ilustración 3: emisiones de GEI del sector químico de la UE (en millones de toneladas de CO2 eq.) 15
Ilustración 4:media ponderada mundial del coste nivelado de la energía (verde) y de los precios de subasta de los acuerdos de compra de energía (rojo) correspondientes a la energía solar fotovoltaica, eólica marina/en tierra y solar de concentración entre 2010 y 2023. Fuente: IRENA
llustración 5:ciclo de compresión del vapor con producción simultánea de calefacción y refrigeración 24
llustración 6:potencial económico a largo plazo de diversas aplicaciones geotérmicas en Europa
en tres rangos distintos25
Ilustración 7:principales tecnologías de conversión termoquímica para biomasa. Elaboración propia,
basándose en la información disponible
Ilustración 8:algunos de los colores de las fuentes de hidrógeno
Ilustración 9:métodos para la obtención de hidrógeno renovable y niveles actuales de desarrollo 29
Ilustración 10: turbinas eólicas y paneles solares en la fábrica de ArcelorMittal Ghent31
Ilustración 11: aplicaciones de tecnología fotovoltaica sobre el terreno. Fuente: Ebroacero
Ilustración 12: pila de biomasa (izquierda) y primer plano de partículas de biomasa (derecha)
Ilustración 13: camión que funciona a base de biocombustible de colza en la región de Champagne 34
Ilustración 14: imagen aérea del Parque Solar de Witnica. Fuente: Ceenergynews35
llustración 15: principales bloques de la fábrica de AoG y la central de cogeneración alimentada por gas natura
Ilustración 16: ubicación de la sede, los lugares de producción, las oficinas de venta y los centros de innovación de Corbion
Ilustración 17: centros de producción de SIDENOR

Cuadros

Cuadro 1:	resumen de los ejemplos de tecnologías disponibles para las industrias	
	de gran consumo de energía	7
Cuadro 2:	consumo de energía, emisión de GEI e innovaciones en materia de descarbonizado	ión de los
	metales no férreos	9
Cuadro 3:	emisiones de CO ₂ medias de los productos calcáreos (EuLA, 2012)	13
Cuadro 4:	uso final de energía para la elaboración de hierro y acero en 2015	16
Cuadro 5:	principales productos del sector del vidrio	18
Cuadro 6:	tecnologías innovadoras para la descarbonización de la industria del vidrio	19
Cuadro 7:	soluciones de electricidad y calor renovables	20
Cuadro 8:	tipos de colectores comunes y rango de temperaturas que pueden ofrecer	22
Cuadro 9:	comparación entre el gas natural, el biogás y el biometano	27
Cuadro 10:	información clave sobre los casos de éxito	30
Cuadro 11:	comparación de soluciones de energía renovable para su posterior selección como	
	estudio de caso para SIDENOR	39

37



Situación del sector de las industrias de gran consumo de energía en la UE

El objetivo de este capítulo es presentar de manera general la situación en que se encuentra el sector de las industrias de gran consumo de energía en Europa, en concreto los siguientes elementos:

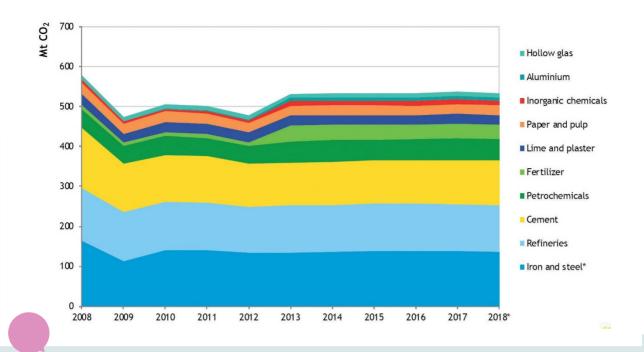
- Metales no férreos
- Cemento
- Cal
- Productos químicos
- Acero
- Vidrio

A lo largo de este capítulo se facilita información general sobre el alcance europeo y el perfil energético y de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de las industrias de gran consumo de energía respecto de una serie de sectores de dichas industrias concretos. Además, se presentan vías de descarbonización y diferentes alternativas para la descarbonización de los sectores.

En Europa, las industrias de gran consumo de energía constituyen sectores económicos importantes. Se calcula que en la nueva EU-27 hay 3,2 millones de personas empleadas en las industrias siderúrgica, de los minerales, de las refinerías y de los productos químicos. Esta cifra representa aproximadamente el 11 % del empleo industrial total. En la EU-27, estas cuatro industrias representan el 15 % del valor añadido total de la industria manufacturera¹.

Las industrias de gran consumo de energía operan en un entorno político dinámico, ya que las políticas climáticas evolucionan con rapidez. En vista del Acuerdo de París, la Comisión Europea, el Parlamento Europeo y los Estados miembros han puesto en marcha políticas ambiciosas destinadas a armonizar las emisiones de GEI con los objetivos políticos. En la actualidad, las emisiones de GEI de estas industrias se regulan principalmente a través del régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE), un instrumento normativo paneuropeo mediante el que se controlan las emisiones de más de 12 000 instalaciones. Los participantes en el RCDE UE deben efectuar un seguimiento de sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otras emisiones de GEI, informar al respecto y obtener permisos para ellas. En línea con los objetivos de reducción de las emisiones de la UE, en la ilustración 1 se muestra que las emisiones de las industrias de gran consumo de energía que participan en el RCDE UE se redujeron entre 2008 y 2012, pero que desde 2013 no han experimentado cambios.





llustración 1: emisiones de CO₂ en el RCDE UE procedentes de las industrias de gran consumo de energía, EU-27, 2008-2018. Fuente: datos del DTUE y cálculos de CE Delft. * Ajuste fiscal en frontera con datos preliminares.

¹ EU Parliament, 2020, Energy-intensive Industries: Challenges and opportunities in energy transition.

El informe del Parlamento Europeo sobre las industrias de gran consumo de energía contiene los siguientes ejemplos para cada ruta tecnológica en lo relativo a dichas industrias. Es importante reconocer que hay varias tecnologías, en particular en los ámbitos de la electrificación, la captura y utilización de carbono (CUC) y el hidrógeno, que se basan en la disponibilidad de un elevado número de fuentes de electricidad renovable. Por lo tanto, estas tecnologías están estrechamente relacionadas con el progreso del sector de la electricidad. Por otra parte, las medidas relacionadas con la eficiencia energética, la economía circular, la innovación de procesos y la captura y el almacenamiento de carbono (CAC) pueden reducir directamente las emisiones de CO₂. Sin embargo, hasta que el sector de la electricidad logre la neutralidad en carbono, un aumento de la demanda de electricidad podría retrasar el fin de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles y obstaculizar el progreso general hacia la neutralidad climática en la economía.

Cuadro 1: resumen de los ejemplos de tecnologías disponibles para las industrias de gran consumo de energía

		Cemento y	Productos	
Sector	Hierro y acero	cal	químicos, polímeros y fertilizantes	Refinerías
Economía circular	Aumento del reciclado de chatarra, sustitución por madera en la construcción	Reciclado de hormigón	Reciclado de plásticos de mayor calidad, producción de nafta a partir de residuos plásticos, reducción del uso de fertilizantes	Combustibles de carbono reciclado, reducción de la demanda por parte de los vehículos eléctricos
Electrificación	Horno de arco eléctrico, electrólisis de mineral de hierro		Horno de craqueo del futuro, caldera eléctrica	Bombas de calor, caldera eléctrica
Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CUAC)	Listos para la captura: ULCOS, HIsarna, Steel2chemic als y Steelanol	CUAC en horno de clínker, LEILAC, mineralización	CUAC a partir de reformado con vapor de metano, oxígeno- combustible + CUAC	Combustibles sintéticos, captura/CUAC a partir de reformado con vapor de metano
Hidrógeno (H₂)	H₂-Hierro de reducción directa: HYBRIT, SALCOS, H₂Future, etc.	Calor de alta temperatura	H ₂ procedente de un electrolizador, calor de alta temperatura	Calor de alta temperatura
Biomasa	Alto horno alimentado con biocoque	Biorellenos, horno alimentado con biogás	Insumos de origen biológico: MeOH, EtOH, bioBTX, H ₂ a partir de biogás	Biocombustibles, biocrudo como insumo
Otras innovaciones de proceso	Hlsarna	Cemento de bajas emisiones de carbono, endurecimiento con CO ₂	Horno de craqueo de etileno catalítico, tecnologías de separación innovadoras	Tecnologías de separación innovadoras

Metales no férreos

Los metales no férreos son los metales, incluidas las aleaciones, que no contienen una cantidad abundante de hierro (ferrita). Por lo general, las aleaciones no férreas tienen un contenido de hierro inferior al 1 % de su peso.

Habitualmente los metales no férreos se dividen en cuatro grupos clave: **metales de base**, **metales preciosos**, **metales de especialidad** y **metales raros**².

Información clave sobre el sector europeo de los metales no férreos

- Valor: 120 000 millones €
- Emplea de manera directa a aproximadamente
 500 000 personas.
- Emplea de manera indirecta
 a más de 2 millones de personas³.

En Europa existe una escasez de reservas, por lo que se depende en gran medida de las importaciones de minerales metálicos y concentrados de otros continentes.

Consumo de energía y emisiones de GEI

La industria de los metales no férreos es la más electrificada de las industrias de gran consumo de energía, ya que su consumo total de energía incluye un 58 % de uso de electricidad. Por lo tanto, dicha industria es mucho más sensible al aumento de los precios de la electricidad que otras industrias manufactureras⁴.

Por otra parte, la industria de los metales no férreos de la UE ya ha conseguido reducir sus emisiones absolutas (directas e indirectas) en un **61 % desde 1990**, la mayor reducción lograda en el mundo, y sigue disponiendo de potencial para reducir las emisiones de GEI en **más de un 90 % de aquí a 2050**, año que marca el objetivo de la neutralidad climática de la UE⁵.

Eficiencia energética e innovaciones en materia de descarbonización

En el cuadro 2 se muestran los metales no férreos más comúnmente utilizados, el consumo de energía y las emisiones de GEI derivadas de estos materiales, así como la eficiencia energética y las innovaciones en términos de descarbonización que respaldarían la descarbonización de estos sectores.

La eficiencia (especialmente en los procesos de electrólisis), el empleo de combustibles alternativos, la electrificación, la recuperación de calor y la CUAC son las principales vías para lograr la descarbonización del sector de los metales no férreos.

² RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1: Non-ferrous metals sector status in Europe

³ T. Wyns and G. Khandekar, "Metals for a Climate Neutral Europe - A 2050 Blueprint," 2020. [Online]. Available: https://www.eurometaux.eu/metals-blue-print-2050/

⁴ Energy balance sheets 2016 DATA 2018 edition. 2018.

⁵ T. Wyns and G. Khandekar, "Metals for a Climate Neutral Europe - A 2050 Blueprint," 2020. [Online]. Available: https://www.eurometaux.eu/metals-blue-print-2050/

Cuadro 2: consumo de energía, emisión de GEI e innovaciones en materia de descarbonización de los metales no férreos⁵

	Consumo de energía	GEI	Eficiencia energética e innovaciones
Al	14-16 MWh de electricidad por tonelada de Al (producción primaria)	Total: 17,4 millones de toneladas de CO ₂ eq. (en 2015)	Eficiencia en el proceso de electrólisis, CAC
Cu	Aproximadamente 1,5 MWh de electricidad; energía total: 3,3 MWh/t de cobre	Total: 4,439 millones de toneladas de CO ₂ eq (en 2015)	Eficiencia en los procesos de electrólisis, combustibles alternativos (hidrógeno, combustibles sintéticos), recuperación de calor residual
Ni	Refinado: 5-5,5 MWh/t, horno rápido: 2,6-2,8 MWh/t de níquel	348,46 kt de CO ₂ eq. (en 2015)	Electrificación de varios procesos (p. ej., calentamiento y producción de gas eléctricos) Eficiencia en la recuperación de calor, CAC
Zn	Consumo de electricidad por tonelada de zinc: 3,8 MWh/t	3,394 millones de toneladas de CO2 eq. (en 2015)	CUC, por ejemplo, Proyecto Algea (Finnfjord AS, Arctic University of Norway), CAC
Aleaciones de silicio y hierro	Insumo de electricidad: silicio 12,4 MWh/t; ferrosilicio 8,9 MWh/t; ferromanganeso 3 MWh/t	Silicio 8,4; ferrosilicio 6,3; ferromanganeso 1,5 millones de toneladas de CO ₂ eq.	CUC, por ejemplo, Proyecto Algea (Finnfjord AS, Arctic University of Norway), CAC

Eurometaux (www.eurometaux.eu) es una asociación que representa los intereses de la industria de los metales no férreos en Europa. Entre sus miembros se incluyen productores, transformadores y recicladores de metales no férreos, así como asociaciones de metales europeas y nacionales. En octubre de 2019, Eurometaux publicó un informe titulado *Metals for a Climate-Neutral Europe: A 2050 Blueprint* ["Metales para una Europa climáticamente neutra: hoja de ruta para 2050", documento no disponible en español], en el que se examinan el potencial de que dispone y los retos a los que se enfrenta la industria europea de los metales no férreos con miras a lograr el objetivo de la neutralidad climática para 2050. A fin de lograr estas metas, la hoja de ruta de Eurometaux propone una serie de medidas, como aumentar la eficiencia energética de los procesos de producción, utilizar fuentes de energía renovables, promover la economía circular mediante el reciclado y la reutilización de los materiales y desarrollar nuevas tecnologías de producción con bajas emisiones de carbono.

Cemento

El cemento es el principal ingrediente para fabricar hormigón y el hormigón es la sustancia manufacturada más utilizada en términos de volumen. El hormigón es asequible, sólido, duradero y resiliente al fuego, las inundaciones y las plagas. Además, tiene la flexibilidad necesaria para producir estructuras complejas y masivas. Se prevé que la demanda de hormigón, y por lo tanto de cemento, aumente entre un 12 y un 23 % de aquí a 2050 debido al crecimiento de la población y de la economía⁶.

Información clave sobre el sector europeo del cemento

Según los datos de Eurostat, la industria de fabricación de cemento de la UE:

- Tiene un volumen de negocios de 15 200 millones €y
 4 800 millones €de valor añadido.
- En 2019 empleaba a aproximadamente 47 000 personas en Europa⁷.
- Distribuye a aproximadamente más de 350 empresas.

Consumo de energía y emisiones de GEI

La producción de cemento representa el 8 % de las emisiones totales de CO₂ del mundo. Dicho proceso tiene un gran consumo de energía, ya que entre el 50 y el 60 % de los costes de producción están relacionados con los costes energéticos. El consumo de energía eléctrica habitual de una fábrica de cemento moderna es de entre 110 y 120 kWh por tonelada de cemento y requiere entre 60 y 130 kg de fuelóleo o de un equivalente, dependiendo del tipo de cemento⁸.

La producción de cemento es una de las mayores fuentes de emisiones de dióxido de carbono del mundo. Estas emisiones proceden de dos fuentes principales: emisiones relacionadas con la energía y emisiones relacionadas con los procesos.

En el caso de la producción de cemento, las emisiones relacionadas con la energía se derivan de la quema de combustibles fósiles para alcanzar las elevadas temperaturas necesarias para producir clínker, que es el principal componente del cemento. Para este fin generalmente se utilizan combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Las emisiones derivadas de la quema de estos combustibles incluyen dióxido de carbono (CO₂), así como otros gases de efecto invernadero como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

Además de las emisiones relacionadas con la energía, la industria del cemento es conocida por emitir grandes cantidades de gases de efecto invernadero durante sus procesos de producción, principalmente dióxido de carbono (CO₂).

Estas emisiones, denominadas "emisiones de proceso", se producen durante la reacción química que tiene lugar cuando se calienta piedra caliza para producir clínker, un ingrediente fundamental del cemento. Este tipo de emisiones representan un elevado porcentaje de las emisiones de la industria y son difíciles de evitar debido a que tienen lugar durante el proceso de producción.

⁶ RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 Cement & Lime sector status in Europe

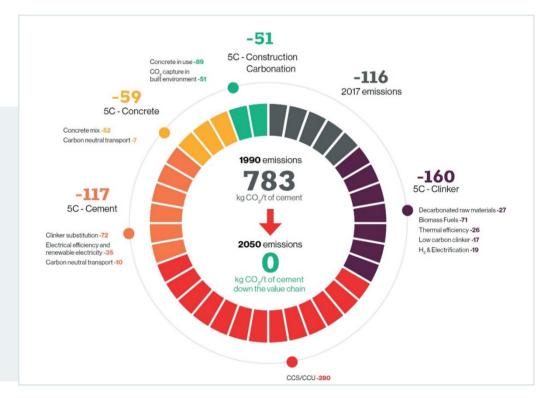
⁷ Cembureau, "Activity report 2020." [Online]. Available: <u>www.cembureau.eu</u>

⁸ N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossain, and N. A. Rahim, "A critical review on energy use and savings in the cement industries," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 4. pp. 2042–2060, May 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.01.005.

Eficiencia energética e innovaciones en materia de descarbonización

Si bien las medidas destinadas a reducir las emisiones de CO2 se han centrado principalmente en la producción de cemento, es posible lograr reducciones adicionales si se tiene en cuenta la cadena de valor en su conjunto, es decir, desde la producción de cemento hasta su uso en materiales de construcción como los morteros y el hormigón. CEMBUREAU, la Asociación Europea del Cemento, es una organización que representa los intereses de los fabricantes de cemento y que promueve una industria del cemento sostenible y competitiva en Europa. Ha elaborado una hoja de ruta para la descarbonización en la que se presenta la estrategia de la industria para reducir las emisiones de carbono y lograr la neutralidad climática. La hoja de ruta concede prioridad a la innovación, la inversión y la cooperación y facilita un enfoque para la transición de la industria del cemento hacia un futuro con bajas emisiones de carbono. La hoja de ruta para la descarbonización de CEMBUREAU incluye un enfoque de cinco elementos que promueve la colaboración en la cadena de valor del clínker, el cemento, el hormigón, la construcción y la carbonatación, incluyéndose a todos los agentes con el fin de ayudar a hacer realidad el objetivo de lograr unas emisiones de carbono bajas. El gráfico de CEMBUREAU que figura a continuación (ilustración 2) resume las vías técnicas disponibles para lograr unas emisiones netas nulas en comparación con las emisiones de CO₂ del sector de 1990. Si bien las mejoras y la descarbonización de la cadena de valor del cemento (incluidos sus cinco elementos) siguen siendo fundamentales para la vía de descarbonización, lograr unas emisiones netas nulas en el sector requiere eliminar un total de 783 kg de CO₂/tonelada de cemento.

Ilustración 2:
hoja de ruta de
CEMBUREAU
para la reducción
del CO₂ en la
cadena de valor
del cemento (cinco
elementos: clínker,
cemento,
hormigón,
construcción y
recarbonatación).



Aunque para lograr el objetivo de unas emisiones netas nulas es necesario mejorar la cadena de valor en su conjunto, hay algunos pasos que emiten más carbono que otros. La fase de mayor consumo de energía de la cadena de valor es la que tiene lugar en la fábrica de cemento, donde se elaboran dos materiales fundamentales: el **clínker** y el **cemento**

Algunas de las medidas que podrían adoptarse para reducir las emisiones relacionadas con la producción de clínker son utilizar materias primas alternativas descarbonatadas (residuos y subproductos de otras industrias) para sustituir parte de la piedra caliza, sustitución de los combustibles (combustibles alternativos, biomasa, hidrógeno), aumentar el rendimiento térmico (de los hornos), utilizar nuevos tipos de clínkers de cemento que son químicamente diferentes y que emiten menos CO₂ y la CUAC.

A fin de reducir las emisiones relacionadas con la producción de cemento, la electricidad utilizada para el mezclado, la trituración y el transporte debe proceder de fuentes renovables. Otra forma de reducir las emisiones relacionadas con la producción de cemento es **utilizar cemento con un bajo porcentaje de clínker** o **alternativas al clínker**.

Cal

La cal, también conocida como cal viva o cal ordinaria, es un compuesto químico alcalino de color blanco o grisáceo. La cal se utiliza para diversas aplicaciones en diferentes sectores, como el medioambiental, el metalúrgico, la construcción, el químico/industrial y otros. Además, la cal es sumamente reactiva y puede ser peligrosa si no se manipula de forma adecuada⁶.

Información clave sobre el sector europeo de la cal

Tanto en Europa como en el resto del mundo se utilizan productos calcáreos para una amplia variedad de aplicaciones, y la cal es un elemento irremplazable para numerosos sectores industriales, como la fabricación de acero, los materiales de construcción, las industrias químicas y la pasta de papel.

- Volumen de negocios de 4 200 millones €y valor añadido de 1 400 millones €
- Emplea directamente a 15 000 personas e
- indirectamente a 30 000

Fuente: sublime-etn.eu.

Su gran importancia y su diversidad se deben a su alcalinidad y a su capacidad para purificar y neutralizar. El ciudadano medio de la UE utiliza indirectamente alrededor de 150 g/día de productos calcáreos.

Consumo de energía y emisiones de GEI

La cal se forma a través de un proceso de calcinación. Para ello tiene lugar un proceso de descomposición térmica en el que piedra caliza (CaCo3) o dolomita (CaMg(CO3)2) emiten CO2 y se convierten en cal (CaO) o dolomita calcinada (CaMgO2) bajo la influencia de temperaturas elevadas. La producción de cal da lugar a emisiones de gases de efecto invernadero debido al propio proceso, al igual que en el caso del cemento (emisiones de proceso), pero también debido a los requisitos de energía.

El proceso de calcinación es el responsable de la mayor parte del uso de energía y de las emisiones de CO₂, ya que la producción de cal requiere temperaturas de alrededor de 1 200 °C y para mantener estas temperaturas se necesita una gran cantidad de calor. Al mismo tiempo, el 68 % de las emisiones totales son un derivado inevitable del proceso de calcinación.

En el cuadro 3 se puede observar que la mayoría de las emisiones son causadas por el propio proceso y que el uso de dolomita calcinada como materia prima conlleva un incremento considerable de las emisiones de CO₂.

Cuadro 3: emisiones de CO₂ medias de los productos calcáreos (EuLA, 2012)

Emisiones	Proceso (t de CO₂/t de producto calcáreo)	Combustión (t de CO₂/t de producto calcáreo)	Electricidad (t de CO ₂ /t de producto calcáreo)	Total (t de CO₂/t de producto calcáreo)
Cal	0,751	0,322	0,475	1,092
Dolomita calcinada	0,807	0,475		1,301

Medidas para reducir las emisiones de CO₂

La EuLA es una organización sin ánimo de lucro situada en Bruselas (Bélgica) que aboga por los intereses de la industria de la cal en Europa. Sus miembros proceden de varios países de la Unión Europea. En 2020, la EuLA publicó una hoja de ruta para la descarbonización de la industria de la cal. En ella se presenta el plan de la industria para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, con arreglo a los objetivos del Acuerdo de París sobre cambio climático.

En la hoja de ruta de la EuLA para la descarbonización se prevén cuatro tipos de posibles medidas para reducir el CO₂:

- Eficiencia energética mediante el ahorro de combustible: mejorar la eficiencia energética, principalmente durante la fase de calcinación, es una opción importante para reducir las emisiones relacionadas con la energía.
- Fuentes con bajas emisiones de carbono mediante la sustitución de combustibles: los combustibles empleados para la producción del calor necesario suelen ser el gas natural y el fuelóleo. Su sustitución por fuentes con bajas emisiones de carbono resulta esencial para reducir el CO₂.
- CUAC: casi el 70 % de las emisiones totales de CO2 de la industria de la cal son emisiones de proceso, por lo que la única solución para lograr la neutralidad en carbono son la CAC y la CUC, que se consideran una solución de final de proceso.
- Carbonatación: la carbonatación es el efecto natural asociado al uso de cal y puede describirse como la reacción inversa de la producción de cal. Durante la vida útil de los productos calcáreos, se captura CO₂ de la atmósfera formando piedra caliza, de modo que se cierra el ciclo de la cal.

Productos químicos

El sector químico es una industria diversa que elabora una amplia gama de productos químicos, como plásticos, productos farmacéuticos, fertilizantes y otros productos químicos empleados en diversas industrias. Los productos del sector químico de la UE pueden clasificarse en tres categorías principales⁹:

- Productos químicos de base, también conocidos como productos químicos comerciales, que representaron el 60,4 % de las ventas totales de productos químicos de la UE en 2018 y que cubren los productos petroquímicos y sus derivados (polímeros), así como los productos inorgánicos de base.
- Productos guímicos de especialidad. que representaron el 27,2 % de las ventas totales de productos químicos de la UE en 2018 y abarcan ámbitos como las pinturas y las tintas, la protección de cultivos, los tintes y los pigmentos y los productos industria auxiliares para la (otros productos químicos como los pegamentos, los aceites esenciales y la gelatina).
- Productos químicos de consumo, que son aquellos que se venden a los consumidores finales, como los jabones y detergentes y los perfumes y la cosmética. Representaron el 12,4 % de las ventas totales de productos químicos de la UE en 2018¹⁰.

- La fabricación de productos químicos es la cuarta industria de mayor tamaño de la UE.
- Este sector representa el 7,6 % del volumen de negocios de la manufacturación de la UE.
- Está formado por 30 000 empresas.
- Emplea de manera directa a aproximadamente 1,2 millones de personas e indirectamente a 3,6 millones de personas¹⁰.

Información clave sobre el sector europeo de los productos químicos

El sector químico de la UE desempeña un papel importante en la economía europea y es una de las industrias químicas de mayor tamaño del mundo. Engloba varias industrias, como la petroquímica, la plástica, la farmacéutica, la agroquímica y la de los productos químicos de especialidad. En 2018, la UE generó 565 000 millones € de ingresos a partir del sector químico, siendo Alemania y Francia los dos mayores productores químicos de Europa, seguidos de Italia y los Países Bajos.

RE4Industry Project Deliverable (2022):D3.1 –Chemical & Fertilizers Sector

¹⁰ Cefic, "2020 FACTS & FIGURES of the European chemical industry".

Consumo de energía y emisiones de GEI

El sector de los productos químicos abarca una amplia variedad de procesos, desde procesos continuos complejos hasta procesos por lotes a menor escala.

La huella de carbono del sector está compuesta por la quema de combustibles fósiles, las emisiones indirectas del uso de electricidad y las emisiones de proceso (derivadas de los procesos que crean CO₂ como subproducto de las reacciones químicas).

En 2017, el consumo de combustibles y de energía de la industria química de la UE, incluido el sector farmacéutico, ascendió a 52,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo y gas, y la electricidad representó casi dos terceras partes del consumo total de energía¹⁰.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en 2017 la industria química de la UE, incluido el sector farmacéutico, emitió 135,2 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

Aunque se produjo una reducción parcial del contaminante más importante, el CO₂, gran parte de ella se debió a la reducción del óxido nitroso (N₂O), que es el segundo contaminante más importante. En la ilustración 3 puede observarse la disminución continuada de los clorofluorocarburos.

El metanol, el etileno, el cloro y el amoníaco son los productos químicos más importantes en términos de volúmenes de producción, pero también en términos de consumo de energía y emisiones de carbono.

Estas sustancias son las responsables de la mayoría de las emisiones de CO2 del sector.

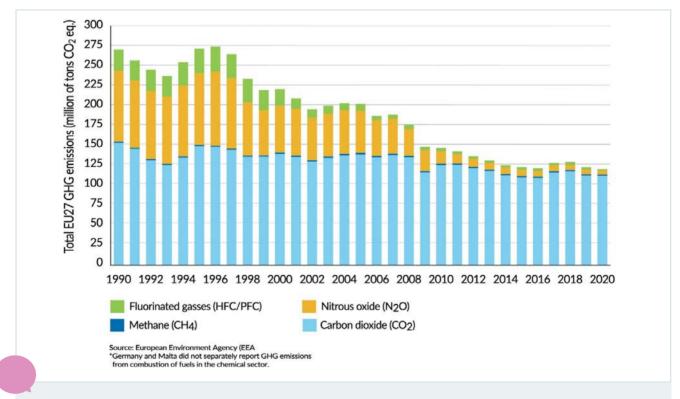


Ilustración 3: emisiones de GEI del sector químico de la UE (en millones de toneladas de CO₂ equivalente).

Eficiencia energética e innovaciones en materia de descarbonización

El CEFIC, es decir, el Consejo Europeo de la Industria Química, es una asociación comercial con sede en Bruselas que defiende los intereses de la industria química en Europa. Está compuesto por más de 29 000 empresas, desde grandes multinacionales hasta pequeñas y medianas empresas. El CEFIC tiene la determinación de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria y de lograr unas emisiones netas nulas para 2050.

Existen una serie de tecnologías actuales y futuras que pueden servir para mantener la trayectoria de Europa en materia de energía y para mejorar la eficiencia energética. A continuación, se recogen algunas de ellas:

- Mantenimiento de la demanda final de energía a un nivel constante.
- Eliminación casi total de las emisiones gracias a la **eficiencia energética** (33 % de la reducción total de las emisiones).
- Captura, utilización y almacenamiento de CO2 (25 %).
- Electricidad renovable (20 %).
- Sustitución de los combustibles y medidas para reducir las emisiones de óxido nitroso (22 %)11.

Además de estas tecnologías, otra forma de reducir las emisiones de GEI son las **mejoras en lo relativo a las materias primas**, que normalmente se basan en combustibles fósiles. Varias vías para lograr este fin son utilizar las materias primas existentes de manera eficiente, aumentar la cantidad de materias primas renovables, como la biomasa, utilizar materias primas alternativas y reciclar.

Acero

El sector de la producción de acero convencional de Europa es una de las fuentes más importantes de emisiones de CO₂. Este sector contribuye a **aproximadamente el 4 % de las emisiones totales de CO₂ de Europa**. En cuanto al sector industrial, el proceso de fabricación de acero de Europa contribuye al 22 % de las emisiones de CO^{12, 13}.

El acero, con una producción de aproximadamente 1 900 millones de toneladas anuales en todo el mundo y **139 millones de toneladas en la UE**, es el tercer material a granel producido por el hombre más abundante, por detrás del cemento y la madera¹⁴.

Información clave sobre el sector europeo del acero

- La industria de la UE genera aproximadamente
 132 000 millones €de valor añadido bruto.
- En 2020, el sector europeo del acero notificó que la industria respalda más de 2,6 millones de puestos de trabajo equivalentes a tiempo completo¹⁴.
- ¹² R. Berger, "The future of steelmaking–How the European steel industry can achieve carbon neutrality," Rol. Berger GMBH, 2020.
- ¹³ RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 Steel sector status in Europe
- ¹⁴ EUROFER, "European Steel in Figures," 2021.
- ¹⁵ J. Kim et al., "Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options," Energy Res. Soc. Sci., vol. 89, p. 102565, 2022. [Online] https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565.

Consumo de energía y emisiones de GEI

El cuadro 4 muestra el uso final de energía de la fabricación de hierro y acero. Un consumo negativo representa la energía recuperada en los procesos de fabricación de hierro y acero.

Las principales fuentes de emisiones de CO₂ de los procesos de fabricación de hierro y acero son las **materias primas** y la **quema de combustible**.

En los procesos que van desde la sinterización hasta la fabricación del producto de acero final, se emite CO₂ a través de los hornos, las calderas, las estufas y otros equipos.

De las 1,8 toneladas de emisiones de CO₂ por tonelada de bobina producidas en una acería integrada normal, 1,7 toneladas están asociadas al uso de carbón y 0,1 toneladas se deben al uso de cal.

La mayor parte de la huella de carbono de la industria siderúrgica procede de las emisiones relacionadas con la energía.

Cuadro 4: uso final de energía para la elaboración de hierro y acero en 2015¹⁵.

Proceso	Uso de energía (exajulios/año)	Porcentaje (%)
Carbón de coque y coque	24,1	70,0
Otros tipos de carbón	6,1	17,6
Gas de alto horno y gas de coquería	-3,3	-9,6
Gas natural	2,3	6,7
Petróleo	0,4	1,2
Biomasa	0,1	0,4
Electricidad	4,0	11,8
Calor	0,6	1,9
Total	34,4	100,0

Eficiencia energética e innovaciones en materia de descarbonización

La EUROFER, que es la Asociación Europea de Siderurgia, es una asociación comercial con sede en Bruselas que defiende los intereses de la industria siderúrgica europea. Está compuesta por más de 500 empresas, entre ellas grandes multinacionales y pequeñas y medianas empresas. Europa es conocida en todo el mundo por tener una industria siderúrgica sumamente avanzada, que en la actualidad es la líder mundial en términos de rendimiento medioambiental y climático. Con miras a guiar a la industria hacia un futuro con bajas emisiones de carbono, en 2019 la EUROFER publicó una hoja de ruta para la descarbonización titulada *Low Carbon Roadmap- Pathways to Achieving a Carbon-Neutral European Steel Industry* ["Hoja de ruta hacia unas emisiones de carbono bajas: vías para lograr una industria siderúrgica europea neutra en carbono", documento no disponible en español]. Esta evolución hacia un futuro neutro en carbono requiere inversiones sustanciales en nuevos avances tecnológicos, infraestructura energética y cambios en el consumo y las fuentes de energía, y un factor crítico es el acceso a materiales de gran calidad como el mineral de hierro y la chatarra.

A fin de garantizar que Europa cumpla las obligaciones que le incumben en virtud del Acuerdo de París y lograr que el acero europeo sea compatible con un futuro limpio y bajo en emisiones de carbono, la EUROFER ha presentado una serie de posibles vías específicas que impulsarían esta transformación necesaria del sector.

Además de las medidas expuestas por la EUROFER, la existencia de una economía circular resulta beneficiosa para la industria siderúrgica por diversos motivos, como la conservación de las materias primas, la innovación, los productos duraderos, el empleo, la eficiencia y las emisiones de CO₂. El porcentaje de reciclado del acero en la industria es sumamente elevado, casi del 95 %, lo que hace que el acero sea el material más reciclado. Si bien el elevado porcentaje de reciclado responde principalmente a motivos económicos, también ofrece beneficios medioambientales, como un menor uso de energía y menos emisiones de carbono.

Además de las opciones anteriormente mencionadas, a continuación, se enumeran otras vías para reducir las emisiones del sector:

- **Utilizar biomasa para la fabricación de acero** (residuos de madera torrefactos, carbón vegetal, biocarbón, etc.).
- **Utilizar carbono como reductor** (CUAC), lo que podría aplicarse a todas las grandes fuentes puntuales del sector siderúrgico.
- Utilizar energía eléctrica a través de un proceso basado en la electrólisis.
- Producir acero directamente mediante plasma.
- · Producir hierro por suspensión.
- Sustituir el carbono por H2 como reductor (también es posible utilizar hidrógeno directamente como reductor
 - en el proceso de fabricación de acero, por lo que tiene un excelente potencial de reducción del CO₂).

La descarbonización de la industria siderúrgica utilizando hidrógeno debe respaldarse mediante hidrógeno producido a través de un método con bajas emisiones de carbono.

Vidrio

El vidrio sigue siendo uno de los materiales más utilizados en los procesos de fabricación, construcción y consumo, ya que permite elaborar productos ligeros y lograr un satinado de gran calidad¹6.

Los principales productos del sector del vidrio son **el vidrio para envases, el vidrio plano, la fibra de vidrio, el vidrio doméstico** y **los productos de vidrio especiales** (véase el cuadro 5).

Cuadro 5: principales productos del sector del vidrio.

Principales productos	Porcentaje en la industria	Uso	
Vidrio para envases	Sector del vidrio de mayor tamaño en la UE, con un 62 % de la producción de la UE.	Productos de envasado, como botellas y tarros.	
Vidrio plano	Segundo sector del vidrio en términos de tamaño, representando casi el 29 % de la producción total de la UE.	rminos de tamaño, automotivas, de construcción tando casi el 29 % de la comercial e innovadoras.	
Fibra de vidrio	La producción de fibra de vidrio de filamento continuo contribuye con el menor de los porcentajes en términos de toneladas del sector, que es del 2 %.	Se utiliza principalmente como compuesto en diferentes sectores.	
Vidrio doméstico	Este sector representa aproximadamente el 4 % de la producción europea total.	Fabricación de cristalería de mesa, utensilios de cocina, material decorativo, etc.	
Productos de vidrio especiales	Representan un reducido porcentaje de la producción total de vidrio global para productos con un elevado valor añadido.	Vidrio para iluminación, artículos de vidrio para laboratorio, vidrio óptico y extrafino para industrias electrónicas, etc.	

Información clave sobre el sector europeo del vidrio

Según los datos de la Glass Alliance Europe:

Aunque el funcionamiento normal de la mayoría de los sectores del vidrio se vio afectado desde 2020 debido a la crisis de la COVID-19, en 2021 se produjo una recuperación lenta.

- En 2021, en la UE se produjeron 39,1 millones de toneladas de vidrio.
- La UE es uno de los mayores productores de vidrio del mundo, junto con China y América del Norte.
- En 2021, la industria del vidrio de la EU-27 empleaba a aproximadamente 181 000 personas.

Consumo de energía y emisiones de GEI

El sector del vidrio consume una gran cantidad de energía y para la fabricación de dicho material se requieren unas temperaturas extremadamente altas, por lo que la energía es uno de los principales costes de explotación de la fabricación de vidrio. La quema de gas natural con aire ha sido la forma tradicional de producir vidrio, un proceso que requiere un gran consumo de energía y que es contaminante. Como resultado, en Europa la producción de vidrio genera 22 millones de toneladas de CO cada año¹⁷.

Eficiencia energética e innovaciones en materia de descarbonización

En la actualidad, la mayoría de las emisiones del sector del vidrio proceden del uso de combustibles fósiles para fundir las materias primas. Su sustitución por una fuente de energía neutra en carbono ofrece un importante potencial de reducción.

La Glass Alliance Europe (GAE) es una asociación europea que aboga por los intereses de la industria de la fabricación de vidrio. Su objetivo es promover políticas y normativas que fomenten el crecimiento y la competitividad de la industria a nivel europeo. La Glass Alliance Europe reconoce la importancia del Pacto Verde Europeo, cuya finalidad es lograr la neutralidad climática para la economía y la sociedad europeas de aquí a 2050. En este contexto, disponer de una base industrial competitiva dentro de la UE que sea líder en soluciones con bajas emisiones de carbono resulta fundamental para la transición de todos los sectores económicos de Europa.

El vidrio desempeña una función clave en tanto que material habilitante fundamental en sectores con un elevado potencial en términos de reducción de las emisiones, en concreto la energía, la construcción y el transporte. Por tanto, se trata de un producto esencial para una Europa neutra en carbono. Además, el vidrio contribuye sustancialmente al establecimiento de una economía realmente circular debido a que puede reciclarse y reutilizarse de manera infinita en aplicaciones para envases. Esta característica ayuda a conservar los recursos y a reducir las emisiones de carbono.

Además, la bibliografía disponible contiene numerosas recomendaciones para el sector del vidrio que persiguen una reducción de las emisiones y que abordan las tecnologías de descarbonización (cuadro 6). Sin embargo, es necesario estudiar en mayor medida su viabilidad financiera y técnica.

Cuadro 6: tecnologías innovadoras para la descarbonización de la industria del vidrio.

Tecnologías innovadoras

Aumento de la eficiencia energética en lo relativo al consumo de combustible en los hornos

Recuperación del calor residual para precalentar el aire de combustión y las materias primas o para electricidad

Innovaciones en materia de combustión

Oxicombustiones

Introducción de biocombustibles líquidos (biodiésel y aceite vegetal tratado con hidrógeno)

Innovaciones para la reducción de la combustión

Hornos de arco eléctrico en lugar de hornos alimentados con gas

Hornos híbridos alimentados por múltiples combustibles y electricidad

Estudio sobre la viabilidad de utilizar hidrógeno para alimentar los hornos de vidriería

Circularidad

Mayor uso de cascos para producir vidrio nuevo (conversión de residuos en material)

Materias primas calcinadas como CaO para sustituir los carbonatos, reduciéndose las emisiones de CO₂

Se considera que la CUAC es la tecnología neutra en carbono con mayor potencial a corto plazo

Soluciones de energía renovable

En este capítulo se presentan de manera general las tecnologías de energía renovable más importantes actualmente disponibles (con vistas al objetivo de 2030) y que se encontrarán disponibles en la transición hacia 2050 para la descarbonización de las industrias de gran consumo de energía.

Las soluciones de energía renovable se han dividido en varias tecnologías en función del uso de electricidad renovable y de cuáles se utilizarán con el fin de producir calor para múltiples procesos industriales. La electrificación será un elemento fundamental, gracias a la reducción gradual de los precios de la energía renovable y a la conversión de procesos que dependen del gas natural. Los procesos industriales que todavía no cumplen los requisitos para la electrificación necesitarán un tipo de calor renovable.

En el siguiente cuadro se recogen las tecnologías de energía renovable disponibles para el objetivo de 2030¹⁸.

Cuadro 7: soluciones de electricidad y calor renovables



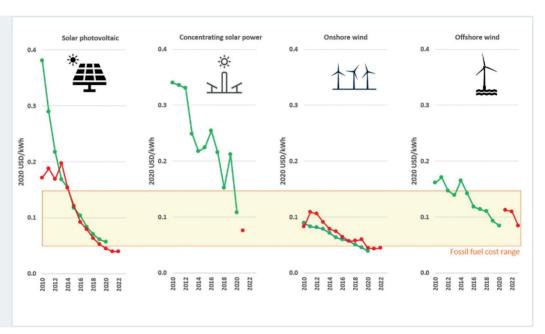
¹⁸ Carmona-Martínez AA, Fresneda-Cruz A, Rueda A, Birgi O, Khawaja C, Janssen R, Davidis B, Reumerman P, Vis M, Karampinis E, Grammelis P, Jarauta-Córdoba C. Renewable Power and Heat for the Decarbonisation of Energy-Intensive Industries. Processes. 2023; 11(1):18. https://doi.org/10.3390/pr11010018

Electricidad renovable

La energía renovable puede obtenerse a partir de diferentes fuentes: energía solar fotovoltaica, energía solar de concentración y energía eólica marina o en tierra. En la última década, estas tecnologías han experimentado una mejora en términos de producción de energía. Por el contrario, las fuentes de energía basadas en fósiles, como las centrales eléctricas de carbón, han tenido unos gastos de funcionamiento superiores a los de las centrales renovables.

En la ilustración 4 también se puede observar que los precios de la tecnología renovable se han reducido en gran medida desde 2010. Esto refleja la competitividad de la generación de energía renovable e indica que las tecnologías similares basadas en recursos renovables necesarias para la descarbonización de las industrias de gran consumo de energía podrían experimentar una tendencia de reducción de los costes similar.

Ilustración 4: media ponderada mundial del coste nivelado de la energía (verde) y de los precios de subasta de los acuerdos de compra de energía (rojo) correspondientes a la energía solar fotovoltaica, eólica marina/en tierra y solar de concentración entre 2010 y 2023. Fuente: IRENA.



Además, según la hoja de ruta de la Agencia Internacional de la Energía, se prevé que la actual capacidad mundial de producción de energía fotovoltaica pase de 200 GW instalados (el 25 % correspondiente a la UE) a 3 000 GW (el 5 % correspondiente a la UE) de aquí a 2050.

La principal ventaja de la energía renovable es su flexibilidad en términos de utilización. Las instalaciones conectadas a la red obtienen energía para su propio consumo y tienen la posibilidad de enviar el excedente a la red. Por el contrario, las instalaciones no conectadas a la red operan de manera aislada y se encuentran ubicadas en lugares remotos para responder a la demanda de electricidad. Las instalaciones no conectadas a la red requieren la instalación de baterías para almacenar el excedente de electricidad.

Existen otras dos vías principales para la utilización de la electricidad renovable producida a partir de energía solar fotovoltaica, energía solar de concentración y energía eólica marina/en tierra. La vía más sencilla es la sustitución directa de la electricidad basada en fósiles dentro de los procesos industriales actuales. La segunda vía consiste en electrificar los procesos que actualmente se basan en un suministro de calor obtenido a partir del uso de combustibles no renovables, como el gas natural, el carbón y otros¹⁹. Además, las tecnologías alimentadas por electricidad abarcan la amplia gama de temperaturas que requiere la industria²⁰, y las aplicaciones que requieren temperaturas bajas y medias, como las calderas eléctricas y las bombas de calor para el suministro de calor o frío, no son específicas de un sector, por lo que pueden aplicarse de manera transversal¹⁸.

¹⁹ Lechtenböhmer S, Nilsson LJ, Åhman M, Schneider C. Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. Energy. 2016;115:1623-1631. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.110

²⁰ Madeddu S, Ueckerdt F, Pehl M, et al. The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). Environ Res Lett. 2020;15(12):124004. doi:10.1088/1748-9326/abbd02

Calor renovable

El calor renovable puede obtenerse a partir de diversas fuentes de energía renovable, como la energía solar térmica, las bombas de calor, la energía geotérmica, la biomasa, los biocombustibles y el hidrógeno verde.

Energía solar térmica

Los colectores solares térmicos son dispositivos que sirven para producir energía mediante la transformación de energía solar en calor que pueda utilizarse. Absorben la radiación solar, la convierten en calor y transfieren este calor a un medio (normalmente aire, agua o aceite) que circula por el colector. La energía solar así recogida se traslada desde el líquido en circulación, bien para su uso directo, bien para su almacenamiento en un tanque de almacenamiento de energía térmica²¹.

Cuadro 8: tipos de colectores comunes y rango de temperaturas que pueden ofrecer

Mecanismo	Tipo de colector	Tipo de absorbedor	Temperatura (°C)
No concentrador	Colector solar plano	Plano	30-8022
	Colector tubular de vacío	Plano	50-20022
Concentrador (seguimiento en un eje)	Colector cilíndrico-parabólico	Tubular	60-375 ²³
	Colector lineal Fresnel	Tubular	60-40024
Concentrador	Colector de disco parabólico	Puntual	750-1000 ²⁵
(seguimiento en dos ejes)	Receptor de central solar de torre	Puntual	500-1 500 ²⁶

²¹ Anastasovski A, Raskovic P, Guzovi'c Z, Sedić A. A Systematisation of Methods for Heat Integration of Solar Thermal Energy in Production Processes: A Review. 2020;8:410-437. doi:10.13044/j.sdewes.d7.0310

²² Wang R, Ge T. Advances in Solar Heating and Cooling. Woodhead Publishing; 2016.

²³ Belessiotis V, Kalogirou S, Delyannis E. Thermal Solar Desalination: Methods and Systems. Elsevier; 2016.

²⁴ GmbH IS. Fresnel Collector LF-11 Datasheet.; 2021.

²⁵ Berrada A, El Mrabet R. Hybrid Energy System Models. Academic Press; 2020.

²⁶ Qazi S. Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas. Elsevier; 2016.

²⁷ Sornek K, Filipowicz M, Jasek J. The Use of Fresnel Lenses to Improve the Efficiency of Photovoltaic Modules for Building-integrated Concentrating Photovoltaic Systems. J Sustain Dev Energy, Water Environ Syst. 2018;6:415-426. doi:10.13044/j.sdewes.d6.0204

Existen dos tipos de colectores solares: no concentradores (o fijos) y concentradores. Los colectores concentradores alcanzan un mayor nivel de temperatura que los no concentradores. Los colectores no concentradores resultan apropiados para las aplicaciones que requieren una temperatura entre baja ($<150~{\rm ^{\circ}C}$) y media ($150~{\rm ^{\circ}C}-400~{\rm ^{\circ}C}$). Sin embargo, para temperaturas más altas ($>400~{\rm ^{\circ}C}$) se requieren colectores concentradores. En el cuadro 8 se recogen los tipos de colectores más comunes y su rango de temperaturas.

Casi todos los procesos industriales con demanda de calor requieren temperaturas que pueden lograrse a través de un sistema solar térmico. Entre las industrias de gran consumo de energía, el sector químico tiene un elevado porcentaje de demanda de temperaturas bajas y medias entre sus procesos de producción (>50 %) y es el sector industrial más apropiado (entre las industrias de gran consumo de energía) en el que podría utilizarse el calor solar térmico de una manera satisfactoria.

La selección del colector solar adecuado para cada caso depende de múltiples factores: las temperaturas de funcionamiento, la eficiencia térmica, la producción de energía, el coste, el espacio ocupado y otros.

Bomba de calor

Una bomba de calor es un dispositivo que transforma el calor del aire, el suelo y el agua en calor aprovechable. Tiene una amplia gama de usos y puede emplearse en los ámbitos residencial, comercial e industrial. Una bomba de calor puede suministrar calefacción, refrigeración y agua caliente. La transformación se efectúa a través de un ciclo de refrigeración.

El refrigerante es un fluido especial que circula por un circuito cerrado que recorre los cuatro dispositivos principales de la bomba de calor, esto es, el evaporador, el compresor, el condensador y la válvula de expansión. Las bombas de calor son dispositivos que utilizan trabajo mecánico para convertir la energía en calor. El principio termodinámico básico de las bombas de calor es el hecho de que comprimir fluidos en un volumen más pequeño genera un aumento de su temperatura. Véase la ilustración 5.

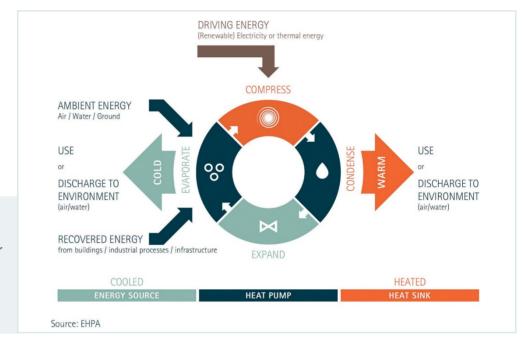


Ilustración 5: ciclo de compresión del vapor con producción simultánea de calefacción y refrigeración.

Existen diferentes tipos de bombas de calor para distintas necesidades y condiciones ambientales. Las bombas de calor subacuáticas utilizan una fuente de agua como medio para el intercambio térmico y se considera que son sumamente eficientes debido a las excelentes características en términos de temperatura que presenta el agua en tanto que vector energético. Esta particularidad hace que este tipo de bombas de calor sean especialmente interesantes para los lugares con unas condiciones meteorológicas extremas. Por el contrario, las bombas que utilizan el aire como fuente se instalan en la superficie y utilizan como principal fuente de energía el calor procedente del aire ambiente que las rodea. Las bombas de calor de escape son otro tipo de bombas de calor que utilizan el aire como fuente, en este caso empleando el calor de escape de procesos de manufacturación. Puesto que el calor de escape tiene una temperatura superior a la del aire ambiente, el proceso que va desde la evaporación hasta la condensación resulta más efectivo con este tipo de bombas de calor. Por lo tanto, estos tipos de bombas de calor pueden implantarse con gran facilidad en el sector industrial.

²⁸ Zühlsdorf B, Bühler F, Bantle M, Elmegaard B. Analysis of technologies and potentials for heat pump-based process heat supply above 150 °C. Energy Convers Manag X. 2019;2:100011. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100011

En las industrias de gran consumo de energía, el uso de bombas de calor es limitado debido a numerosos motivos. No hay suficientes fabricantes de equipos centrados en el concepto de las bombas de calor. Los equipos disponibles no pueden suministrar el amplio rango de temperaturas de proceso que normalmente requiere la industria. Aunque las industrias de gran consumo de energía tienen una gran demanda de calor que llega hasta los 200 °C, la mayoría de los fabricantes comerciales ofrecen equipos capaces de suministrar una temperatura máxima de 90 °C. Son muy pocos los proveedores que ofrecen equipos que puedan suministrar calor de entre 120 °C y 165 °C. Además, una serie de proyectos en curso han demostrado ser capaces de suministrar calor de entre 160 °C y 200°C²⁸.

Energía geotérmica

Se considera que la energía geotérmica es una fuente de energía que contribuirá a la descarbonización de la industria. Las proyecciones indican que, para 2050, los recursos de energía geotérmica ofrecerán aproximadamente ente 100 y 210 TWh/año32. Incluso si las principales aplicaciones de la energía geotérmica han sido en los sectores residencial y comercial en forma de calefacción urbana, también se prevé su uso en los sectores agrícola e industrial^{29, 30, 31}.

A excepción de Islandia y de otras regiones europeas con una clara actividad volcánica, todas las regiones de Europa tienen un potencial económico en lo relativo a las aplicaciones de la energía geotérmica que depende de la profundidad. En estas regiones, el potencial para producir electricidad a partir de energía geotérmica se limita a los depósitos situados a una profundidad superior a 2 km (véase la ilustración 6). No obstante, todavía es posible construir aplicaciones geotérmicas directas con este nivel de profundidad en los invernaderos agrícolas y en la industria³⁰.

Se considera que financiación y el desarrollo de nueva infraestructura de red para el calor representan un importante para energía geotérmica. Por lo la retroadaptación tanto, podría ser una alternativa para la implantación de la energía geotérmica en el calefacción sector de la

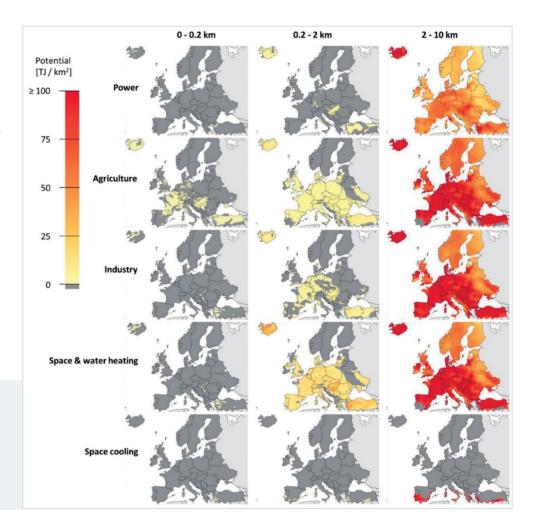


Ilustración 6: potencial económico a largo plazo de diversas aplicaciones geotérmicas en Europa en tres rangos diferentes³².

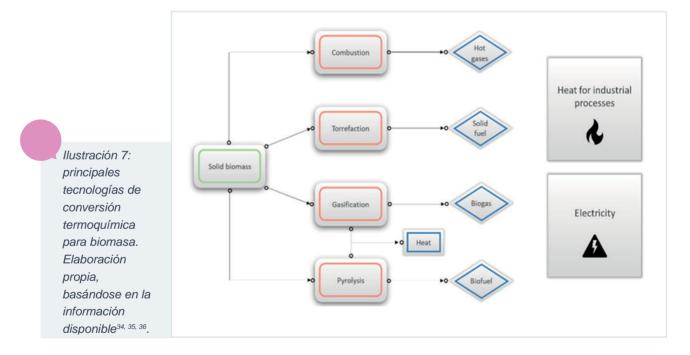
- ²⁹ Urbancl D, Trop P, Goričanec D. Geothermal heat potential-the source for heating greenhouses in Southestern Europe. Therm Sci. 2016;20(4):1061-1071.
- ³⁰ Østergaard PA, Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. Appl Energy. 2011;88(2):479-487. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.018
- ³¹ Barkaoui A-E, Boldyryev S, Duic N, Krajacic G, Guzović Z. Appropriate integration of geothermal energy sources by Pinch approach: Case study of Croatia. Appl Energy. 2016;184:1343-1349. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.112
- ³² Dalla Longa F, Nogueira LP, Limberger J, Wees J-D van, van der Zwaan B. Scenarios for geothermal energy deployment in Europe. Energy. 2020;206:118060. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060

Biomasa

Se ha determinado que la biomasa sólida, que es con gran diferencia la principal materia prima para la generación de biocalor (91 %), es un combustible clave para la transición hacia la energía renovable. La conversión de la biomasa en formas de energía aprovechables puede lograrse a través de tres principales vías de conversión, que se corresponden con los procesos de conversión **termoquímica**, **fisicoquímica** y **bioquímica**.

A través de los procesos de conversión termoquímica puede producirse calor renovable. En la ilustración 7 se exponen las principales tecnologías de conversión termoquímica capaces de producir calor y energía renovable a partir de biomasa sólida. Todas las tecnologías de conversión termoquímica se encuentran disponibles a escala comercial, dependiendo de la materia prima utilizada, si bien cabe señalar que utilizan la combustión de manera más generalizada que las demás tecnologías. El uso de biomasa no selectiva es una de las principales ventajas que ofrecen estas tecnologías. Otra ventaja es que mediante la biomasa puede producirse energía no intermitente, lo que permite generar las cantidades de energía requeridas cuando se necesitan.

En 2018, el sector del papel y la pasta papelera y las industrias maderera y de los productos de la madera representaron conjuntamente el 81 % de la biomasa utilizada para consumo de energía por parte de las industrias de la UE. Estuvieron seguidas de cerca por las industrias de los minerales no metálicos, como el vidrio, la cerámica y el cemento, que son las terceras mayores usuarias de biomasa en términos de volumen. Por otra parte, los sectores químico y petroquímico, siderúrgico y de los metales no férreos solamente utilizaron un 0,64 %, un 0,04 % y un 0,03 % de biomasa, respectivamente, para sus necesidades de consumo de energía³³.



- ³³ Calderón C, Avagianos I, Jossart J-M. Bioheat Statistical Report.; 2020.
- ³⁴ McKendry P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresour Technol. 2002;83(1):47-54. doi:https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5
- ³⁵ Islas J, Manzini F, Masera O, Vargas V. Chapter Four Solid Biomass to Heat and Power. In: Lago C, Caldés N, Lechón YBT-TR of B in the B, eds. Academic Press; 2019:145-177. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2
- Malico I, Nepomuceno Pereira R, Gonçalves AC, Sousa AMO. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry.
 Renew Sustain Energy Rev. 2019;112:960-977. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022

Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles que se obtienen mediante la conversión de biomasa en una forma de combustible líquida (más común), sólida o gaseosa³⁷. La materia prima utilizada para la producción de los biocombustibles desempeña una función importante a la hora de clasificarlos como biocombustible convencional (biocombustibles de primera generación) o avanzado (biocombustibles de segunda generación)³⁸. Mientras que los biocombustibles convencionales destacan por producirse a partir de materias primas comestibles y que requieren el uso de la tierra, los avanzados utilizan materias primas orgánicas distintas de los alimentos y los piensos³⁹.

La mayoría de los biocombustibles comercializados, como el biodiésel y el bioetanol, se emplean en el sector del transporte⁴⁰, mientras que su uso en industrias de gran consumo de energía dentro de los sectores del cemento, el hierro, la cerámica y los productos químicos, entre otros, es limitado. Estos sectores siguen dependiendo del uso de combustibles fósiles convencionales, que podrían sustituirse por electricidad renovable y biometano, para sus procesos (por ejemplo, utilizan electricidad y gas natural basados en la combustión de carbono para la producción de calor). Existen numerosas similitudes entre la composición del gas natural y del biometano, por lo que lo ideal sería sustituir la combustión de gas natural por este gas renovable⁴¹. El biometano no solo se obtiene mediante la degradación anaerobia de múltiples materias primas orgánicas renovables, sino que su uso en la industria no requiere ninguna modificación de los procesos industriales actuales. Véase el cuadro 9.

Cuadro 9: comparación entre el gas natural, el biogás y el biometano.

Compuesto	Gas natural (%) ⁴²	Biogás (%)⁴³	Biometano (%) ⁴⁴
Metano	87,0-98,0	50-75	>90
Etano	1,5-9,0	No aplicable	No aplicable
Butano	0,1-1,5	No aplicable	No aplicable
Pentano	<0,4	No aplicable	No aplicable
N2	5,5	0-10	No aplicable
CO	0,05-1,0	25-50	No aplicable
O2	<0,1	0-2	No aplicable
H2	No aplicable	0-1	<5

³⁷ Suurs RAA, Hekkert MP. Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands. Energy. 2009;34(5):669-679. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.002

³⁸ Heyne S, Harvey S. Assessment of the energy and economic performance of second generation biofuel production processes using energy market scenarios. Appl Energy. 2013;101:203-212. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.034

³⁹ IRENA. Advanced Biofuels, What Holds Them Back?; 2019. https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Advanced-biofuels-What-holds-them-back

⁴⁰ Ajanovic A, Haas R. On the future prospects and limits of biofuels in Brazil, the US and EU. Appl Energy. 2014;135:730-737. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.001

A pesar de la viabilidad técnica del biometano, uno de los obstáculos para su utilización está sumamente relacionado con su disponibilidad⁴⁵. Se prevé que, para 2030, el biometano únicamente sustituya al 8 % del consumo total de gas natural de la UE⁴⁶.

Hidrógeno verde

El hidrógeno es un vector energético que puede elaborarse a partir de combustibles fósiles y biomasa, a partir de agua o de una combinación de ambos. Tiene un mercado consolidado y la mayor parte se consume en el sector químico. En la actualidad, aproximadamente el 95 % de la producción de hidrógeno del mundo procede de combustibles fósiles.

Para la generación de hidrógeno pueden utilizarse diferentes procesos y se está expandiendo el uso de una nomenclatura basada en un código de colores para facilitar el debate (véase la ilustración 8). El hidrógeno se considera renovable o verde cuando las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo derivadas del proceso de producción son cercanas a cero. El método más común para producir hidrógeno verde es mediante la electrólisis del agua (en un electrolizador alimentado por electricidad) utilizándose electricidad procedente de fuentes renovables, pero también pueden emplearse otras vías. En la ilustración 9 se presentan los diferentes métodos basándose en las tres materias primas que pueden utilizarse para generar hidrógeno: **electricidad renovable, biomasa y biogás** e **irradiación solar**.

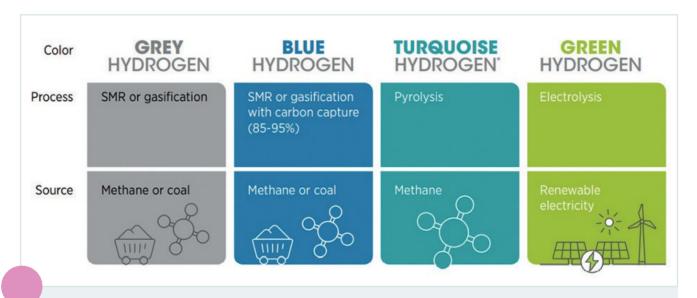


Ilustración 8: algunos de los colores de las fuentes de hidrógeno⁴⁷.

⁴¹ Corbellini V, Kougias PG, Treu L, Bassani I, Malpei F, Angelidaki I. Hybrid biogas upgrading in a two-stage thermophilic reactor. Energy Convers Manag. 2018;168:1-10. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.074

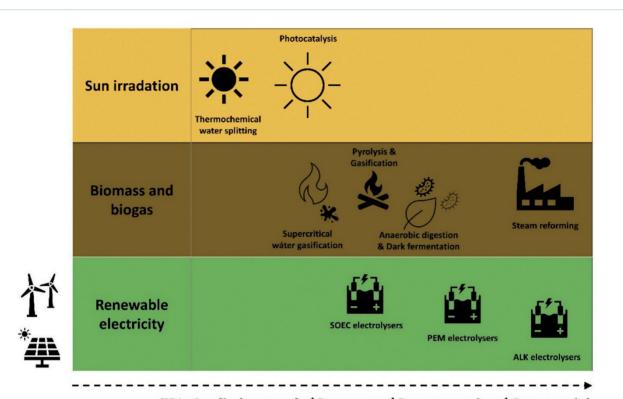
⁴² Arinelli L de O, Teixeira AM, de Medeiros JL, Araújo O de QF. Supersonic separator for cleaner offshore processing of natural gas with high carbon dioxide content: Environmental and economic assessments. J Clean Prod. 2019;233:510-521. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.115

⁴³ Matuszewska A, Owczuk M, Zamojska-Jaroszewicz A, Jakubiak-Lasocka J, Lasocki J, Orliński P. Evaluation of the biological methane potential of various feedstock for the production of biogas to supply agricultural tractors. Energy Convers Manag. 2016;125:309-319. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.072

⁴⁴ Cavaignac RS, Ferreira NL, Guardani R. Techno-economic and environmental process evaluation of biogas upgrading via amine scrubbing. Renew Energy. 2021;171:868-880. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.097

⁴⁵ Association EB. EBA Statistical Report 2020.; 2020.

Además de la electrólisis con electrolizadores alcalinos, el reformado con vapor del biometano/biogás con o sin captura y utilización/almacenamiento de carbono es una tecnología sólida y consolidada. Otros métodos menos desarrollados son la gasificación y la pirólisis de biomasa, la descomposición termoquímica del agua, la fotocatálisis, la gasificación de biomasa con agua supercrítica, la fermentación oscura combinada y la degradación anaerobia.



TRL: Applied research / Prototype / Demonstration / Commercial

Ilustración 9: métodos para la obtención de hidrógeno renovable y niveles actuales de desarrollo48.

Si bien en la actualidad no existe una producción de hidrógeno significativa a partir de fuentes renovables y el hidrógeno verde se limita a proyectos de demostración⁴⁹, se prevé que en los próximos años se produzca una ampliación.

En los segmentos industriales que requieren un grado de calor bajo o medio, según la Empresa Común Pilas de Combustible e Hidrógeno, el uso de electricidad renovable es la principal vía para descarbonizar los procesos industriales⁵⁰. En cuanto a los procesos industriales del segmento que requiere un elevado grado de calor, el hidrógeno puede ofrecer beneficios debido a su capacidad para generar temperaturas elevadas utilizando procesos similares a los actuales. Además de para los procesos que requieran un elevado nivel de calor, las industrias de gran consumo de energía pueden utilizar el hidrógeno verde para la producción de productos químicos y combustibles sintéticos y como agente reductor (industrias siderúrgicas)¹⁸.

- ⁴⁸ IRENA. Hydrogen from Renewable Power, Technology Outlook for the Energy Transition. 2018. https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/sep/irena_hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf.
- ⁴⁹ IRENA. Hydrogen: A Renewable Energy Perspective. 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA Hydrogen 2019.pdf.
- ⁵⁰ FCHJU FC y HJU. Hydrogen Roadmap Europe A Sustainable Pathway for the European Energy Transition. 2019. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen RoadmapEurope_Report.pdf.

3-

Casos de integración exitosa de la energía renovable en industrias de gran consumo de energía

Existen diversos ejemplos de integración exitosa de la energía renovable en distintas industrias de gran consumo de energía. En este capítulo se presentan cinco casos, correspondientes a España, Grecia, Bélgica y Alemania, en los que industrias de gran consumo de energía han adoptado con éxito varias medidas de descarbonización. Las empresas de estos casos de éxito pertenecen a los sectores siderúrgico (ArcelorMittal y Ebroacero), del cemento (Heracles y Heidelberg Materials) y del vidrio (Verallia) y sirven como ejemplo para otros agentes de la industria.

Cuadro 10: información clave sobre los casos de éxito

Caso de éxito

Información clave sobre el caso

Medidas de descarbonización

ArcelorMittal

Meta: reducir las emisiones de CO₂ en 3,9 millones de toneladas/año para 2030.

Energía eólica: 12 turbinas eólicas con un diámetro del rotor de 162 m, una altura de 230 m y una capacidad de 6 MW/turbina. Energía producida: 45 GWh/año. Emisiones de CO₂ evitadas: 11 225 toneladas/año.

Ebroacero

Meta: reducir las emisiones de CO₂ en 46,81 t/año.

Emisiones actuales de Ebroacero: 936,18 t de CO₂ eq.

Energía solar: más de 27 000 paneles solares desde 2019. Es el tercer parque de mayor tamaño de Bélgica, con una superficie de 100 000 metros cuadrados. Energía producida: 10 GWh/año.

Principal medida de 2021: acuerdo con Solarfarm para la instalación de células solares fotovoltaicas. Primer objetivo del proyecto: establecer 186,84 Wp para autoconsumo de electricidad renovable.

Energía producida: ~207 254 kWh/año, 4-5 % del consumo de energía total.

Emisiones de CO₂ evitadas: 46,81 t de CO₂ eq.

HERACLES

Objetivos estratégicos de la empresa: Reducir las emisiones totales brutas de CO₂ a 1 522 kt de CO₂ para 2030, desde 2 103 kt en 2019.

Aumentar la sustitución de combustibles fósiles por **combustibles alternativos** hasta el **50** % para 2023.

La tecnología de energía renovable utilizada en la fábrica de cemento de Milaki se basa en el concepto del coprocesamiento, consistente en reciclar materiales minerales y de manera simultánea recuperar la energía en el marco de la fabricación de cemento.

La fábrica coprocesa biomasa, combustible fósil recuperado y lodos de aguas residuales secos.

Verallia

Meta: reducir las emisiones de CO2 un 46 % para 2030 (tipos 1 y 2).

Energía eólica: Verallia está invirtiendo en la transformación de las tecnologías, los recursos y los equipos industriales utilizados en sus emplazamientos, con el objetivo de reducir sus emisiones de CO2 en un 46 % para 2030 (tipos 1 y 2). En 2021, Verallia también decidió fijarse un objetivo de reducción de las emisiones de CO2 de tipo 3, que deberá lograrse en colaboración con sus proveedores.

Witnica Solar Parkt

Emisiones de CO2 de Górazdze:

2,73 millones de toneladas (2018).

Meta de Górazdze Cement SA:

hormigón neutro en carbono para 2050 y lograr una reducción de las emisiones de CO2 específicas netas a menos de 525 kg por tonelada de material basado en cemento. La instalación de 159 856 paneles fotovoltaicos conlleva una reducción de las emisiones de CO2 de 63 000 t y la producción de 68 GWh de electricidad a partir de fuentes de energía renovable al año, lo que significa que con la electricidad verde del parque solar podría abastecerse a aproximadamente 2 500 hogares.

Acería de ArcelorMittal Ghent

Uno de los casos de éxito seleccionados para el proyecto de RE4Industry es ArcelorMittal Bélgica, debido a los enormes esfuerzos realizados por la industria para reducir las emisiones de CO₂ conexas mediante el uso de fuentes de energía renovables en su línea de producción básica y el empleo de tecnologías de captura y utilización de carbono (CUC).







Ilustración 10: turbinas eólicas y paneles solares en la fábrica de ArcelorMittal Ghent.

Con miras a lograr sus metas para 2030, en el emplazamiento de Ghent habrá una planta de producción de hierro directamente reducido de 2,5 millones de toneladas y una instalación con un horno de arco eléctrico que operarán en paralelo al alto horno de última generación alimentado por residuos de madera y plástico de Ghent (proyecto Torero de Horizonte 2020)⁵¹.

Además, el proyecto de Carbalyst⁵²/Steelanol⁵³ promueve la CUC mediante la conversión biológica de gases residuales capturados de altos hornos en bioetanol, que puede reutilizarse como materia prima química o licuarse para su uso como combustible líquido. Se prevé que los dos proyectos anteriormente mencionados se encarguen en 2022.

Antes de que finalice 2022 se colocarán tres turbinas eólicas, lo que promoverá el uso de la energía eólica. Además, se ha finalizado la instalación de más de 27 000 paneles solares en el tejado de la fábrica de ArcelorMittal de Ghent, convirtiéndose de este modo en el mayor tejado solar de Bélgica. En la actualidad, ArcelorMittal posee el cuarto parque solar de mayor tamaño de Bélgica y el mayor tejado solar del país.

Por último, ArcelorMittal Bélgica y Dow Benelux han llevado a cabo ensayos con una nueva planta piloto situada en las instalaciones de ArcelorMittal de Ghent que separa el CO₂ y el monóxido de carbono (CO) de los gases de salida calientes generados durante la producción de acero. En total, esto traerá consigo una reducción anual de las emisiones de CO2 de 3 toneladas, en comparación con 2018, y permite crear sinergias en la hoja de ruta de ArcelorMittal Bélgica para lograr unas emisiones de carbono netas nulas para 2050. La reducción de las emisiones prevista también contribuirá en gran medida al ambicioso objetivo de la empresa de reducir las emisiones de carbono en 3,9 millones de toneladas al año para 2030^{54} .

⁵¹ Torero - fueling a subtainable future

⁵² Carbalyst®: Capturing and re-using our carbon-rich waste gases to make valuable chemical products | ArcelorMittal

⁵³ Home | Steelanol

⁵⁴ RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: ArcelorMittal Ghent steel plan

Generación de electricidad in situ mediante tecnología fotovoltaica en la industria siderúrgica: Ebroacero (Zaragoza, España)



El sector europeo del acero se encuentra bajo presión debido a las emisiones de CO₂ que generan sus procesos, que requieren un gran uso de energía y recursos. En 2018, la Comisión Europea publicó su estrategia a largo plazo para la protección climática con miras a lograr que la región esté libre de emisiones de gases de efecto invernadero para 2050. El sector europeo de la producción de acero convencional es una de las mayores fuentes de emisiones de CO₂.

En este sentido, en 2021 Ebroacero firmó un acuerdo con Solarfarm para la instalación de tecnología de células solares fotovoltaicas en la fábrica situada en Zaragoza.

Esta medida ha garantizado a Ebroacero una producción total de energía eléctrica sobre el terreno de aproximadamente entre el 4 y el 5 %. Se prevé que esta cantidad se consuma en su totalidad en sus propias instalaciones y que no se vendan excedentes a la red.



Ilustración 11: aplicaciones de tecnología fotovoltaica sobre el terreno. Fuente: Ebroacero.

La inversión total es de aproximadamente 150 000 € y persigue el objetivo de sustituir la adquisición de electricidad producida externamente.

Además, los resultados han mostrado un ahorro total de 29,4 toneladas de gas natural, lo que se traduce en 86,33 toneladas de CO₂ equivalente evitadas.

La instalación de tecnología fotovoltaica ayudará a reducir las emisiones de tipo 2. En la actualidad, Ebroacero tiene unas emisiones totales de aproximadamente 936,18 toneladas de CO₂ equivalente. Tal como se ha indicado anteriormente, la instalación de nueva tecnología fotovoltaica podría garantizar la producción de aproximadamente 207 254 kWh/año a partir de fuentes renovables, lo que representa entre el 4 y el 5 % del consumo total de energía. Esta cantidad ayudará a evitar aproximadamente 46,81 toneladas de CO₂ equivalente⁵⁵.

⁵⁵ RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: Electrical generation in-situ by means of photovoltaics in the steel industry – Ebroacero (Zaragoza, Spain)

Coprocesamiento de biomasa en la industria del cemento: fábrica de cemento de HERACLES-Holcim en Milaki



La fabricación de cemento es un proceso de gran consumo de energía debido a la necesidad de calentar las materias primas a una elevada temperatura (aproximadamente 1 450 °C). En Europa, donde la industria del cemento está modernizada y ya aplica tecnología de vanguardia, se requieren aproximadamente 3 300 MJ de energía térmica para producir una tonelada de clínker[h]. Por lo tanto, el coste de combustible para la producción de esta energía térmica es un importante factor de coste de la producción de cemento.

En 2020, HERACLES (miembro del Grupo Holcim y uno de los principales fabricantes de cemento de Grecia) diseñó y puso en marcha un proyecto innovador centrado en el coprocesamiento de biomasa para la producción de cemento en las instalaciones de su fábrica de cemento de Milaki, situada en la isla de Evia.

Uno de los componentes más importantes de la estrategia de HERACLES para el cambio climático es la sustitución de los combustibles fósiles por combustibles alternativos, con el fin de reducir la huella ambiental de la empresa, y al mismo tiempo aumentar el coprocesamiento de biomasa en la industria del cemento y la competitividad de los productos de la fábrica de cemento de Milaki de HERACLES-Holcim. En concreto, los objetivos estratégicos de la empresa en materia de energía y clima incluyen los siguientes:

- Reducir las emisiones totales brutas de CO₂ (tipo 1) hasta 1 522 kt de CO₂ para 2030. A modo de comparación, en 2019 se emitieron 2 103 kt de CO₂.
- Aumentar la sustitución de los combustibles fósiles por combustibles alternativos hasta el 50 % para 2023. La introducción de combustibles alternativos en las fábricas de cemento de HERACLES ha sido un proceso gradual. Los procedimientos de autorización para el uso de combustibles alternativos dieron comienzo en 2009, mientras que la introducción gradual en el proceso de producción se inició en 2013. En 2020, HERACLES utilizó 130 000 toneladas de combustibles alternativos para la producción de energía térmica, lo que correspondió al 27,7 % del insumo total de combustible para energía, de modo que se ahorraron 85 000 toneladas de emisiones de CO₂ y se redujeron las emisiones totales de CO₂ de la empresa en un 7 %.

Para lograr estos objetivos, la empresa realizó una inversión total de 2 millones € destinada a sustituir por combustibles de biomasa alternativos los combustibles fósiles sólidos (por ejemplo, coque de petróleo) utilizados para la producción de cemento. Se prevé que esta sustitución conlleve una reducción de las emisiones de CO₂ de 70 000 toneladas anuales.

A través de esta inversión se pueden valorizar aproximadamente 75 000 toneladas de biomasa al año (principalmente sarmientos y otros residuos agrícolas), lo que contribuye a la promoción de los principios de la economía circular y reduce el volumen de residuos vertidos.





Ilustración 12: pila de biomasa (izquierda) y primer plano de partículas de biomasa (derecha).

Implantación de la combustión combinada de biocombustibles en los hornos de la industria del vidrio: Verallia Spain S.A. (Zaragoza)



La industria de la fabricación de vidrio tiene un gran consumo de energía debido a la necesidad de calentar las materias primas a altas temperaturas para fundir, formar, revestir y recocer los envases de vidrio, las fibras o las platinas de vidrio planas (aproximadamente 1 600 °C).

En 2020, Verallia Spain S.A., la filial española de la destacada empresa de fabricación de vidrio, decidió integrar la innovación en estos procesos con el objetivo de mejorar las estrategias de descarbonización de la empresa en las instalaciones situadas en Zaragoza.

Verallia considera que el uso de biocombustibles para llevar a cabo una combustión combinada en sus hornos resulta clave para la sustitución de los combustibles líquidos no renovables utilizados en sus hornos. En este contexto, la fábrica de Zaragoza (España) ya combina biocombustible con gas natural en uno de sus hornos (10 % de biocombustible en términos de peso). Es probable que sustituir el gas natural por biocombustibles como el biometano haga que esta combustión sea neutra en CO₂.

El Grupo tiene la intención de aplicar una política que favorezca las soluciones de energía renovable (en particular los biocombustibles), así como la integración de soluciones alternativas para el transporte por carretera, como el ferrocarril.

En línea con sus metas, en la región de Champagne Verallia utiliza biocombustible de colza, lo que supone una reducción del 60 % de sus emisiones de CO₂ derivadas del transporte en dicha región y, por consiguiente, una disminución de las partículas finas del 80 % en comparación con el uso de diésel.



Teniendo en cuenta un consumo medio de 2 000 t/ mes y un porcentaje de sustitución con biocombustibles de aproximadamente un 10 %, esto conllevará un ahorro de emisiones de CO_2 de 395,6 t CO_2 /mes⁵⁷.

Uso de tecnología solar fotovoltaica (ACE) en el Parque Solar de Witnica (Polonia)



BayWa r.e., un promotor de energía renovable, proveedor de servicios, distribuidor y proveedor de soluciones energéticas líder a nivel mundial, y la filial polaca de Heidelberg Materials (Górazdze Cement) han firmado un acuerdo de compra de energía (ACE) virtual corporativo de diez años para el Parque Solar de Witnica (Polonia), cuya construcción finalizó en 2021. La firma del contrato del proyecto de Witnica es un paso importante para Górażdże hacia la neutralidad en carbono en lo relativo a las emisiones de tipo 2. La capacidad contratada permitirá satisfacer aproximadamente el 10 % del consumo anual de Heidelberg Materials.



Ilustración 14: imagen aérea del Parque Solar de Witnica. Fuente: Ceenergynews.

El parque solar está conectado a la red eléctrica de Polonia y suministrará electricidad verde a la empresa hasta 2031.

En la actualidad, Witnica es el mayor parque solar de Polonia, con una capacidad de 64,6 MWp. Además, se trata del primer parque solar sin filiales cuya electricidad se comercializa a través de un ACE virtual a largo plazo. Por lo tanto, BayWa r.e. espera que esta cooperación allane el camino para la firma de más ACE virtuales en la región y hace hincapié en que este proyecto facilitará la energía limpia más rentable de todo el país. En este sentido, el comprador (Heidelberg Materials) logró una reducción de las emisiones de CO₂ de más de

63 000 toneladas y cada año se producen 68 GWh de electricidad a partir de fuentes de energía renovable.

Además, el parque solar, que producirá suficiente electricidad verde como para alimentar al equivalente de alrededor de 22 500 hogares, es con diferencia el proyecto solar de mayor tamaño de Polonia.

En agosto de 2021, el parque solar fue adquirido por el Grupo Alternus Energy. BayWa r.e., en tanto que productor de energía paneuropeo independiente, seguirá prestando servicios de operaciones y mantenimiento para Alternus Energy en el emplazamiento de Witnica⁵⁸.

4.

Estudios de caso sobre soluciones de energía renovable en industrias de gran consumo de energía

En este capítulo se informa sobre los estudios de caso realizados respecto de tres industrias de gran consumo de energía que forman parte del consorcio del proyecto. El objetivo es exponer soluciones y beneficios de mercado específicos en el marco de una estrategia de integración de la energía renovable y descarbonización a largo plazo.

Se ha mantenido un diálogo entre los asociados técnicos encargados de cada uno de los estudios de caso (CIRCE, BTG y CERTH) y los anfitriones de los estudios de caso (SIDENOR, CORBION y MYTILINEOS) desde un primer momento con el fin de conocer primero sus necesidades y expectativas. Una vez evaluadas las tecnologías de energía renovable apropiadas para cada caso, se debate de manera conjunta sobre la decisión final de qué tecnología debe integrarse. A continuación, se presenta de manera general la primera fase.



Fuente: datos del DTUE y cálculos de CE Delft. * Ajuste fiscal en frontera con datos preliminares. Ilustración: emisiones de CO2 en el RCDE UE procedentes de las industrias de gran consumo de energía, EU-27, 2008-2018.

Mytilineos

MYTILINEOS es una empresa griega que opera en el sector industrial y energético, tanto en Grecia como en el resto del mundo. Se creó en 1908 como una pequeña empresa metalúrgica de propiedad familiar situada en Piraeus, tras lo que en 1990 se fundó el grupo MYTILINEOS y en 2017 la empresa se consolidó como nueva entidad empresarial independiente con un volumen de negocios de 2 260 millones € y aproximadamente 3 850 empleados (directos e indirectos).



Ilustración 15: principales bloques de la fábrica de AoG y la central de cogeneración alimentada por gas natural.

El estudio de caso de RE4Industry se centra en la fábrica de Aluminium of Greece (AoG), que forma parte de la unidad empresarial metalúrgica de MYTILINEOS. AoG es el mayor productor de alúmina y aluminio verticalmente integrado de la Unión Europea, con una capacidad de producción anual de 900 kt de alúmina y 222 kt de productos de aluminio (192 kt de aluminio primario + 30 kt de fracciones recicladas).

CERTH ha señalado cuatro posibles soluciones que se consideran lo suficientemente sólidas como para ponerse en marcha en 2030 y que, por lo tanto, deben analizarse en mayor medida.

- La electrificación de los hornos de retención para aluminio podría conllevar una reducción de las emisiones de CO₂ de hasta 26 500 t.
- El actual consumo de gas natural puede sustituirse de manera casi equivalente por biometano obtenido mediante degradación anaerobia.
- Se considera que el gas natural empleado para la calcinación de alúmina podría sustituirse por gas sintético derivado de la gasificación de biomasa.
- Aunque el hidrógeno verde es la opción a largo plazo más prometedora, todavía queda mucho por hacer para lograr la paridad económica⁵⁹.

⁵⁹ RE4Industry Project: D4.2 – Initial vision document of current and future energy needs and solutions

Corbion

Corbion es el líder mundial del mercado del ácido láctico y sus derivados y uno de los principales proveedores de emulgentes, mezclas de enzimas funcionales, minerales, vitaminas e ingredientes derivados de algas. Comercializa sus productos a través de una red mundial de oficinas de venta y distribuidores y cuenta con una cadena de suministro mundial que incluye puntos de fabricación en Estados Unidos, Tailandia, Brasil, los Países Bajos y España. Dentro del estudio de caso de RE4Industry, se analiza la integración de la energía renovable en el emplazamiento de Corbion situado en Gorinchem (Países Bajos).

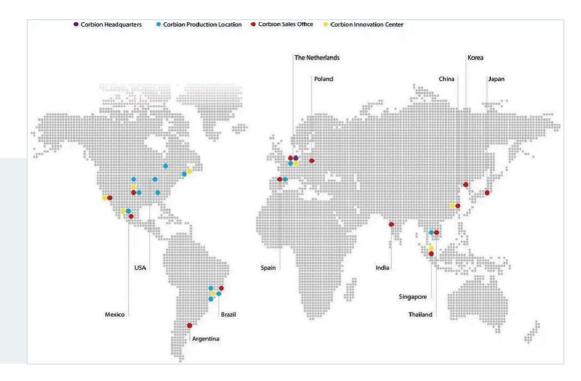


Ilustración 16: ubicación de la sede, los lugares de producción, las oficinas de venta y los centros de innovación de Corbion.

En vista del plan de descarbonización a largo plazo de la empresa y de las actividades que está llevando a cabo para reducir su huella de carbono, así como de la necesidad de tomar medidas decisivas para reducir las emisiones de GEI de tipo 1, 2 y 3 en un 33 % de aquí a 2030, se decidió centrar el estudio de caso en la sustitución de la caldera de vapor central de 15 MW alimentada con gas natural.

Se llevó a cabo una evaluación inicial de las posibilidades técnicas y de la viabilidad financiera y BTG y Corbion debatieron estos aspectos. Las tres opciones propuestas fueron: sustituir el gas natural por electricidad renovable para la producción de vapor (conversión de energía en calor), utilizar hidrógeno procedente de energía renovable y utilizar biomasa para la producción de vapor. Las evaluaciones dieron lugar a las siguientes observaciones:

- Se eligió la caldera eléctrica como opción que se seguiría estudiando. Los inconvenientes son su dependencia de unos precios de la electricidad bajos y la existencia de unos costes de conexión a la red y unas tasas de red elevados.
- La combustión de hidrógeno es un proceso sencillo. Por lo tanto, se seleccionó para que se siguiera estudiando.

- Entre los principales puntos débiles se encuentran el hecho de que la disponibilidad actual de hidrógeno renovable asequible es reducida o nula y la ausencia de infraestructura para suministrar el hidrógeno.
- Si bien las opciones de bioenergía son viables desde el punto de vista técnico y financiero, Corbion considera que se trata de una tecnología de alto riesgo en términos de sostenibilidad y aceptación social.
- Debido a su elevada densidad de energía volumétrica, el aceite de pirólisis es desde el punto de vista logístico la solución bioenergética más atractiva y se estudiará en mayor medida⁵⁹.

Sidenor

SIDENOR es una empresa siderúrgica líder en la industria siderúrgica europea en el ámbito de la fabricación de productos de acero largos especiales. Además, es un importante proveedor de productos acabados en frío para el mercado europeo. La empresa cuenta con centros de producción en el País Vasco, Cantabria y Cataluña. También posee instalaciones sumamente especializadas que ofrecen soluciones para todos los sectores industriales que requieren servicios siderúrgicos de gran calidad.

El estudio se centró en la fábrica de SIDENOR de Basauri, situada en la región del País Vasco, en la zona norte de España. El motivo por el que se eligió esta fábrica es que es una buena representación del consumo de energía de SIDENOR, tanto en términos de cantidad como en lo relativo a los tipos de energía consumida. Las soluciones de energía renovable propuestas incluyen el uso de electricidad y calor.



Cuadro 11: comparación de soluciones de energía renovable para su posterior selección como estudio de caso para SIDENOR.

Opción	Viabilidad técnica	Viabilidad financiera	Implantable en la fábrica de Basauri desde el punto de vista logístico	Sustitución íntegra de las opciones fósiles	Sostenibilidad	Aceptación social	Seleccio nada como estudio de caso
ACE*	+++	+++		+	+++	+++	No
Tecnología fotovoltaica	+++	+++	+++	+	+++	+++	No
H ₂ verde	++	+/-		++	+++	++	Sí
Biometano	+	+++		++	+++	+	Sí
Pirólisis**	++	++	+/-	+/-	++	+/-	Sí
Bombas de calor	++	+	+++	++	+++	++	No

Acuerdos de compra de energía. ** De biomasa para producir biocarbón.

- En primer lugar, se ha debatido la posibilidad de celebrar acuerdos de compra de energía y de instalar tecnología fotovoltaica en las fábricas de SIDENOR.
- Con respecto a las soluciones renovables para la producción de calor, se han analizado el hidrógeno verde, el biometano, el biocarbón a partir de biomasa pirolizada y las bombas de calor.
- En función de un análisis que incluía varios factores, como la viabilidad técnica y económica de las soluciones, su implantación desde el punto de vista logístico, el porcentaje de sustitución de las energías fósiles actuales, la sostenibilidad y la aceptación social, se ha decidido seleccionar el hidrógeno verde, el biometano y el biocarbón para que se estudien en mayor medida⁵⁹.

Los socios

Expertos tecnológicos y sociales

Fundación CIRCE - Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (coordinadora del proyecto)



Además de actuar como coordinadora, la CIRCE es la principal responsable de la evaluación de las tecnologías existentes y futuras en el ámbito de la descarbonización industrial, así como del análisis de las necesidades de la industria, tomando como base su amplia experiencia en materia de proyectos de retroadaptación industrial y actividades de promoción de la energía renovable.

Biomass Technology Group (BTG)



El BTG se encarga de elaborar la metodología de base de RE4Industry para el diseño de planes de acción en las industrias de gran consumo de energía. Su equipo interdisciplinar tiene una dilatada experiencia en lo relativo al análisis de innovaciones industriales y de servicios y ya ha trabajado en la esfera de la aceptación de tecnologías y transportistas de base biológica por parte de la industria de la UE a través de proyectos como BIOFIT o MUSIC.

Centre for Research and Technology Hellas (CERTH HELLAS)



El CERTH, uno de los principales centros de investigación de Grecia, tiene una amplia experiencia tanto en términos de desarrollo tecnológico como de transferencia de conocimientos en lo relativo al sector de la energía. En el marco de RE4Industry, CERTH es el principal responsable de analizar la situación en que se encuentra el sector de las industrias de gran consumo de energía y de encontrar casos de integración satisfactoria de la energía renovable.

WIP Renewable Energies



WIP, una empresa privada activa en el campo de las tecnologías de energía renovable, se ocupa de dirigir la estrategia de replicación de RE4Industry. Sus conocimientos especializados se basan en la organización de eventos internacionales sobre energía renovable que colman la laguna entre la investigación sobre los sistemas de energía renovable y su implantación. Además, colabora con la industria para la supervisión y la ejecución de proyectos, lo que resulta fundamental para maximizar el impacto de los casos de uso de replicación.

White Research (WR)



WR es una pyme de investigación social especializada en análisis de mercado, estrategia empresarial, gestión de la innovación y cuestiones relacionadas con las políticas y los clientes encargada de diseñar la estrategia de participación de RE4Industry y la red de colaboración para el paquete de trabajo 2. Además, facilita el apoyo necesario para los casos de uso con el fin de superar las trabas jurídicas, sociales y financieras que podrían obstaculizar la aceptación de las energías renovables en las industrias seleccionadas.

Asociaciones orientadas a la energía renovable

Bioenergy Europe



En tanto que voz de la bioenergía europea en aras del desarrollo de un mercado justo para la bioeconomía, BIOEU se ocupa de organizar las principales actividades de capacitación, presión y promoción del proyecto. Está compuesta por más de 40 asociaciones y 90 empresas y centros de I+D, lo que dota a RE4Industry de una masa crítica de partes interesadas en materia de bioenergía para lograr y replicar sus objetivos.

Energy Efficiency in Industrial Processes (EEIP)



En tanto que plataforma empresarial y en materia de políticas para la transición energética que estudia nuevas soluciones técnicas y modelos de negocio sólidos que aceleren el crecimiento del mercado, EEIP dirige las actividades de difusión y comunicación del proyecto aprovechando los usuarios de la red EEIP, que abarca la cadena de valor en su totalidad (suministro y demanda de las tecnologías de energía renovable exploradas en el marco de RE4Industry).

Alianza Europea para la Innovación en Energía Sostenible (ESEIA)



La ESEIA, que es la Alianza Europea para la Innovación en Energía Sostenible, cuenta con 27 organizaciones de investigación e innovación punteras en el ámbito de los sistemas de energía sostenible pertenecientes a 13 países europeos. Es la responsable de que toda la red conozca los resultados de RE4Industry con el fin de que se convierta en el mercado semilla del proyecto.

Industrias de gran consumo de energía

SIDENOR



SIDENOR es el mayor fabricante de aceros especiales, piezas de forja y piezas fundidas de España, así como uno de los principales fabricantes de piezas matrizadas, y representa el principal caso de uso para la validación de la metodología de RE4Industry en España. Además, tiene varios puntos de producción en Alemania, Francia, Italia y el Reino Unido, lo que permite la transferencia interna de resultados dentro de la UE.

MYTILINEOS



MYTILINEOS es el mayor productor de aluminio primario verticalmente integrado de Europa y posee minas de bauxita, una refinería de alúmina y plantas de fundición de aluminio. Es el principal caso de uso de Grecia y sigue llevando a cabo actividades relacionadas con optimizar la eficiencia energética y reducir las emisiones de GEI. Los puntos de fabricación de que dispone dentro y fuera de Europa también permiten replicar los resultados en una gran variedad de países.

PURAC (CORBION)



CORBION es el líder del mercado mundial del ácido láctico y sus derivados y una de las empresas más destacadas en los campos de los emulgentes, las mezclas de enzimas funcionales, los minerales, las vitaminas y los ingredientes derivados de algas. Por lo tanto, se trata de una empresa sólida del sector de las soluciones de ingredientes sostenibles para los productos bioquímicos y los alimentos y su principal caso de uso corresponde a los Países Bajos.

