



# DESCARBONIZACIÓN Y EMPLEO EN EL SECTOR SIDERÚRGICO ESPAÑOL

## INFORME RESUMEN



Impactos sobre el empleo asociados a la implementación de nuevas tecnologías y cambios en los procesos industriales para la descarbonización del sector siderúrgico

Con la colaboración de:



## Agradecimientos

El presente informe ha sido posible gracias a la colaboración de las siguientes personas:

- Tamara Antón. CCOO de Industria.
- Ana Isabel Martínez. Syndex.
- José Manuel Casado. CCOO de Industria.
- Ángel Muñoa. CCOO de Industria.
- Alejandro González. CCOO de Industria.

Asimismo, queremos agradecer la colaboración de las siguientes personas, organizaciones y entidades:

- Luis Mouliá. CCOO de Industria de Euskadi.
- Representación sindical de CCOO en Nervacero, Arcelor Etxebarri, ACB Sestao, Tubos Reunidos y Tubacex.
- Andrés Barceló. Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID).
- Aitor Goti Elordi. Universidad de Deusto.
- Cristina Lesta Iñiguez. Xunta de Galicia-Subdirección de Formación Profesional.
- Francisco Ortega Fernández. Universidad de Oviedo-Escuela Ingeniería de Minas.
- Julio Lorente. Federación Española de Recuperación y Reciclaje.
- Miguel Ángel Fernández. Centro Nacional del Hidrógeno.
- Asier San Millán. Asociación Clúster de Siderurgia (SIDEREX).
- Luis Ángel Colunga. Comisionado para el PERTE de descarbonización industrial.
- Joaquín Barreiro García. Universidad de León- Dto. Ingeniería mecánica.
- Pablo Ignacio Fernández Suárez. Centro de Referencia Nacional de la familia profesional de fabricación mecánica, área de construcciones metálicas y fundición.
- Ignacio Santos Fernández. Centro de Referencia Nacional de la familia profesional de fabricación mecánica, área de construcciones metálicas y fundición.
- Juan Almagro. Acerinox.
- Aitor Larrea. Centro de Formación Profesional de Laudio (Álava).
- Sergio San Martín. Centro de Formación Profesional de Somorrostro (Bilbao).
- Laura Izaguirre. Agencia Vasca de Desarrollo Empresarial (SPRI).
- Aitor Cobanera. Agencia Vasca de Desarrollo Empresarial (SPRI).
- Sonia García. Formación Profesional del Gobierno de Navarra.
- Sarah López. Ecologistas en Acción.
- Asier Madariaga. Corredor Vasco del hidrógeno (BH<sub>2</sub>C).
- Sara Pérez. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Manuel Belber. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Santiago Oliver. Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID).
- Milena Ferrari. Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID).

El presente informe ha sido elaborado por la Fundación 1º de Mayo, con la colaboración de Syndex.

### **Autores:**

**F 1º de Mayo:** Antonio Ferrer Márquez, Olga López Maeztu, José Ignacio Miñambres Maldonado y Pablo José Moros García

**Syndex:** Raquel Barreiros Novoa

**Depósito Legal:** M-1986-2025

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>PARTE 1. CONTEXTO PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LA SIDERURGIA ESPAÑOLA.....</b>	<b>7</b>
<b>1. El sector siderúrgico español .....</b>	<b>7</b>
<b>2. El contexto para la descarbonización de la siderurgia española .....</b>	<b>11</b>
2.1. El mercado eléctrico español .....	11
2.2. Las energías renovables .....	11
2.3. Instalaciones de horno de arco eléctrico (EAF).....	12
2.4. Hierro de reducción directa (DRI).....	13
2.5. Hidrógeno verde (H <sub>2</sub> V).....	14
2.6. La sequía y su impacto en la disponibilidad de recursos hídricos en la siderurgia.....	18
2.7. La geopolítica para la ubicación de la industria: hacia un modelo regional de materias primas ..	19
2.9. La chatarra como materia prima clave para la transición.....	19
<b>PARTE 2. ESCENARIOS PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LA SIDERURGIA ESPAÑOLA .....</b>	<b>23</b>
<b>3. Escenarios para la descarbonización de la siderurgia española 2030.....</b>	<b>23</b>
3.1. Escenario 1: BF-BOF (Escenario 1A) y EAF 100% chatarra (Escenario 1B) .....	23
3.2. Escenario 2: EAF-DRI-GAS NATURAL (Escenario 2A) y EAF 100% chatarra con electricidad renovable (Escenario 2B).....	28
3.3. Escenario 3: Uso del hidrógeno verde en un EAF-DRI con electricidad renovable.....	35
<b>4. Análisis de la posible evolución del empleo en el sector siderúrgico en España a partir de los escenarios planteados .....</b>	<b>41</b>
<b>PARTE 3. IMPACTOS SOBRE EL EMPLEO .....</b>	<b>47</b>
<b>5. Impactos sobre los perfiles profesionales del sector de la siderurgia .....</b>	<b>47</b>
5.1. Nuevos perfiles demandados por el sector siderúrgico .....	48
5.2. Profesiones siderúrgicas con mayores posibilidades de afectación.....	49
5.3. Ocupaciones de la siderurgia integral potencialmente más afectadas .....	50
5.4. Ocupaciones con menos nivel de cualificación .....	51
5.5. Ocupaciones desarrolladas a pie de proceso .....	52
<b>6. Impactos sobre el empleo en la cadena de valor .....</b>	<b>53</b>
6.1. La chatarra férrea.....	53
6.2. Producción de hidrógeno verde .....	53
6.3. Fabricación de DRI con Hidrógeno Verde (H <sub>2</sub> DRI) .....	55
<b>PARTE 4. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA UNA INDUSTRIA SIDERÚRGICA SOSTENIBLE Y DESCARBONIZADA.....</b>	<b>57</b>





# INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica española es un sector estratégico clave en nuestra economía, desempeñando un papel crucial en el tejido productivo y tecnológico del país. Desde el punto de vista laboral, proporciona un empleo de calidad, con cerca de 22.000 puestos directos en la fabricación y primera transformación del acero.

Este sector se enfrenta a retos y desafíos muy importantes, principalmente asociados a la estrategia de descarbonización a medio-largo plazo adoptada a nivel europeo y que implica alcanzar la neutralidad climática en 2050. En España, la industria siderúrgica es responsable de aproximadamente el 4% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> y, como el resto de los sectores, debe adoptar las medidas necesarias para reducir su impacto en el clima.

Ante este escenario de descarbonización, el sector de la fabricación de acero en el conjunto de la UE se encuentra sumido en un difícil contexto internacional: incertidumbre regulatoria y tecnológica, costes energéticos elevados, pérdida de competitividad frente al acero chino que está inundando el mercado europeo, etc.

No obstante, la siderurgia española cuenta con diversas fortalezas y oportunidades que pueden ayudar a la transición hacia la neutralidad climática de su producción y a la defensa de los puestos de trabajo del sector. España es uno de los países dentro de la UE con mayor producción de acero a partir de chatarra reciclada y cuenta con una ventaja competitiva a la hora de integrar las energías renovables al proceso industrial. Ambos elementos posicionan a nuestro país como exportador de conocimiento y tecnología de hornos de arco eléctrico (EAF) a otros países que aún dependen de los altos hornos y necesitan avanzar tecnológicamente. En relación con el hidrógeno verde, el vector clave de la descarbonización del sector, España también presenta un gran potencial en su producción al contar con una gran cantidad de recursos solares y eólicos, una base industrial sólida en esta área, con empresas líderes en la producción de electrolizadores y otros componentes clave. Además, la Hoja de Ruta del Hidrógeno verde y las numerosas iniciativas empresariales en torno a este campo podrían posicionarnos como líderes en un mercado emergente, de llegar a materializarse y de superarse algunos cuellos de botella que existen en la actualidad.

En cualquier caso, la transición del sector de la siderurgia hacia la neutralidad climática requiere del estudio de los posibles escenarios tecnológicos y de la propuesta de alternativas para proteger a las personas trabajadoras que puedan verse afectadas por una posible pérdida de empleo o por las consecuencias derivadas de las nuevas necesidades de cualificación y formación de una industria abocada a un profundo cambio tecnológico.

Este ha sido el principal objetivo del proyecto EMDESID, en el que se ha analizado el impacto sobre el empleo del proceso de descarbonización del sector siderúrgico en España y que plantea una propuesta para una transición justa hacia una industria siderúrgica sostenible.





# PARTE 1. CONTEXTO PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LA SIDERURGIA ESPAÑOLA

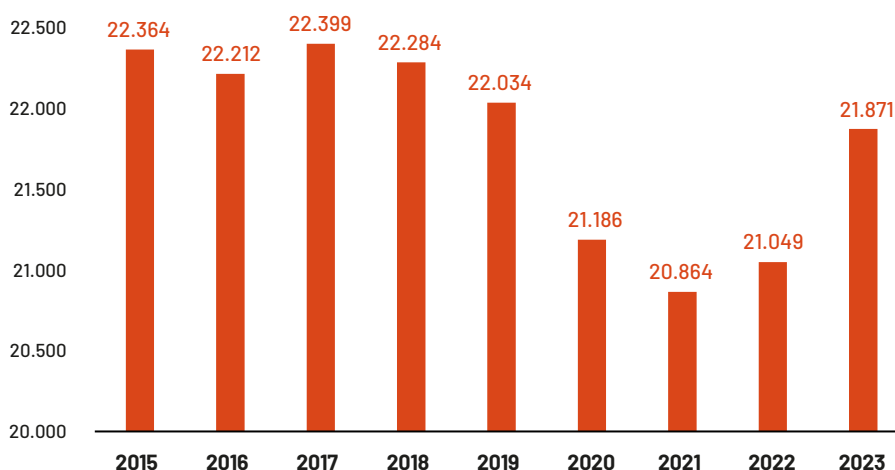
## 1. El sector siderúrgico español

La siderurgia española se enfrenta a desafíos concretos que tendrá que abordar en el corto y medio plazo. La competencia a nivel europeo y global, la fluctuación de los precios de las materias primas y el proceso de transición ecológica y digital conllevan un periodo de ajuste que influirá tanto en los niveles de producción como en el empleo.

El sector siderúrgico español, entendiendo por tal tanto la industria de fabricación del acero como la de su primera transformación, emplea de manera directa a 21.871 personas<sup>1</sup>. El empleo asociado a la fabricación de acero asciende a cerca de 12.000 puestos de trabajo, repartidos entre 22 plantas distribuidas por nueve comunidades autónomas<sup>2</sup>, si bien es en la cornisa cantábrica dónde está implantada el 50% de las instalaciones<sup>3</sup>. El resto del empleo se concentra en las 50 instalaciones de primera transformación y laminación, con una implantación territorial similar a la de la fabricación de acero.

La evolución del empleo en la siderurgia española a lo largo de las últimas décadas ha estado marcada por diversos factores como la globalización, la automatización, la transición energética y las distintas crisis económicas. Actividad clave en la industrialización de nuestro país, a partir de los años setenta comienza un proceso de reconversión que conllevó el cierre de muchas empresas y la especialización en aceros especiales y de alta calidad, lo que permitió la estabilización del empleo hasta la crisis de 2008.

### Evolución del empleo en siderurgia y primera transformación



Fuente: UNESID

1. Datos de 2023: [https://unesid.org/descargas\\_files/Revista2023.pdf](https://unesid.org/descargas_files/Revista2023.pdf)
2. Galicia, Asturias, Cantabria, Euskadi, Aragón, Cataluña, Andalucía, Extremadura y Madrid.
3. <https://unesid.org/produccion-de-acero/>





En la práctica totalidad de las instalaciones el acero se obtiene mediante la vía de *horno de arco eléctrico* (EAF, por sus siglas en inglés), una tecnología en la que la materia prima, generalmente chatarra de acero o mineral de hierro al que se ha sometido a un proceso de eliminación de oxígeno por reducción (DRI), se introduce en un horno eléctrico para su fusión.

Tan sólo en 1 de las 22 instalaciones siderúrgicas, ubicada en Asturias y propiedad de la multinacional ArcelorMittal, se produce acero por la vía de alto horno (BF-BOF), conocida como siderurgia integral.

La vía integral emplea como materia prima mineral de hierro, que se funde en un reactor vertical o alto horno, produciendo el arrabio, metal fundido que contiene carbono e impurezas y cuyo destino puede ser las fundiciones de hierro o bien continuar su tratamiento para obtener acero líquido en un horno de oxígeno básico<sup>4</sup>. La siderurgia integral es la que tiene que enfrentar los mayores retos en el camino a la descarbonización de su producción, debido a su nivel de emisiones de gases de efecto invernadero por su dependencia de los combustibles fósiles en su proceso.

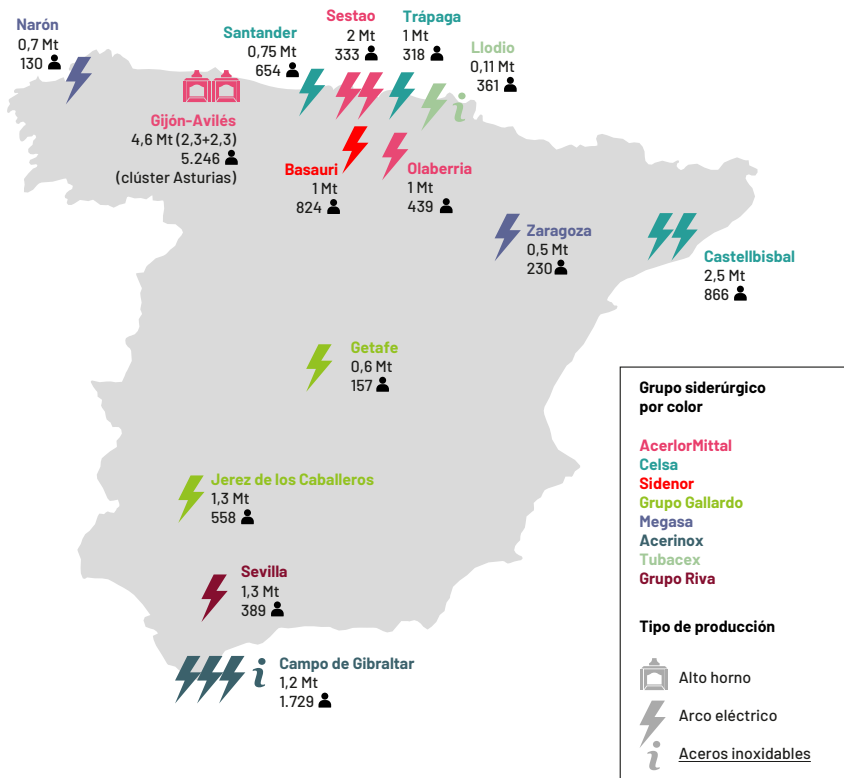
Las necesidades de mano de obra de ambas tecnologías, aunque dependiente de las dimensiones y complejidad de la instalación, son muy diferentes pero elevadas en ambos casos, siendo la siderurgia integral la más intensiva en empleo. Así, mientras que en las acerías de arco eléctrico podemos hablar de varios cientos de trabajadores por instalación, en la siderurgia integral el número de personas trabajadoras se puede elevar a miles. En concreto, el empleo directo asociado a la siderurgia de alto horno de Asturias (Gijón y Avilés) asciende a más de 5.000 personas. Ello da idea del peso que este tipo de actividades tienen tanto para la ocupación industrial como para el tejido socioeconómico de los territorios en los que se ubican, al actuar como tractores y dinamizadores de otros segmentos y sectores productivos.

En cuanto a la caracterización del empleo en el sector siderúrgico español, la edad de la mayoría de las personas trabajadoras (65%) se concentra en el segmento de 30-50 años, con un porcentaje relevante de las plantillas por encima de los 50 años (superior al 20%), mientras que los menores de 30 años representan el rango etario más minoritario (10-15%). En cuanto al tipo de contratación, cerca del 90% del personal en plantilla tienen contrato indefinido. Atendiendo al género, el empleo en el sector es mayoritariamente masculino, con una tasa de empleo femenino de tan solo un 10%. Por puestos de ocupación, hay una brecha significativa en la representación de género en diferentes roles: mientras que en los puestos técnicos y de dirección la presencia de las mujeres alcanza el 21%, en otros grupos profesionales, como las operarias de producción, sigue siendo menor.

4. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040202-hornosaltos-arrabio\\_tcm30-446948.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040202-hornosaltos-arrabio_tcm30-446948.pdf)



## Instalaciones de cabecera de producción de acero bruto: capacidad de producción (Mt) y empleo por planta



Fuente: Global Energy Monitor, información de Grupos siderúrgicos y CC00

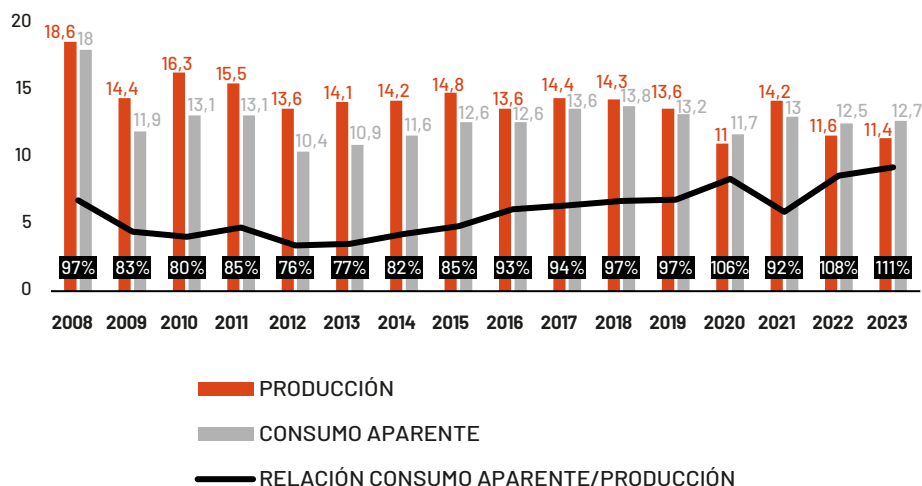
## Instalaciones de transformación por tipo de producto y empleo



Fuente: Global Energy Monitor, información de Grupos siderúrgicos y CC00

En el año 2023, la fabricación española de acero crudo obtuvo valores históricamente bajos, situándose en 11,4 Mt, sólo por encima de la producción alcanzada en 2020 en plena pandemia. La relación entre producción y consumo aparente de acero presenta un consumo siempre por detrás del nivel de producción, salvo en 3 años: 2020, 2022 y 2023, donde el consumo aparente superó a la producción de acero en 700kt, 900kt y 1.300kt respectivamente, lo que da muestras de la penetración de importaciones de acero para consumo interno, especialmente las provenientes de países del sudeste asiático.

### Producción de acero bruto y consumo aparente en España (Mt)



Fuente: World Steel

Durante los 8 primeros meses de 2024, la producción de acero bruto en España aumentó un 4%, representando un incremento de más de 300 kt con respecto al mismo período de 2023, situando el nivel de producción en valores similares a los del año 2022.



## 2. El contexto para la descarbonización de la siderurgia española

### 2.1. El mercado eléctrico español

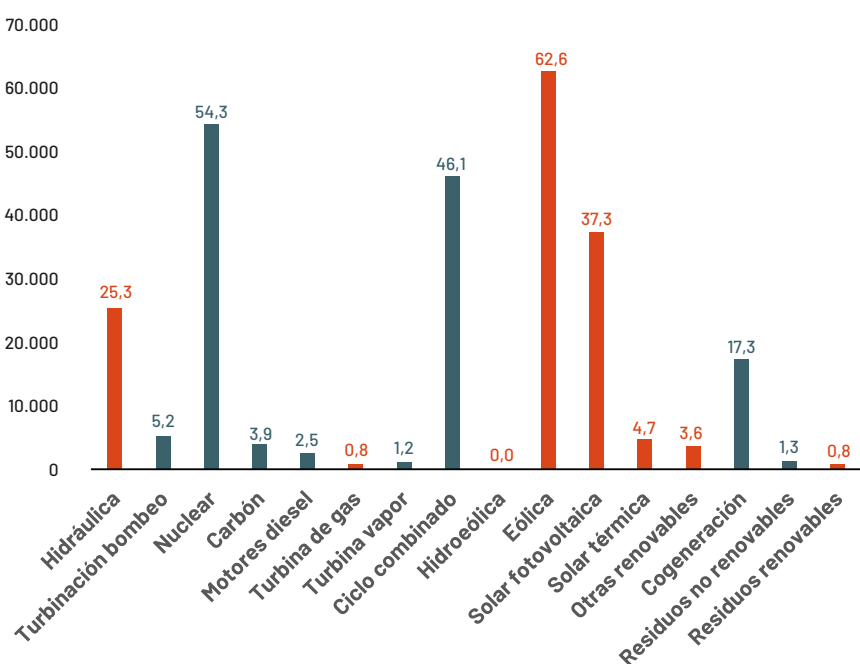
El mercado eléctrico español está experimentando una profunda transformación impulsada por la creciente participación de las energías renovables, la necesidad de descarbonizar el sector y el impacto de la crisis energética internacional.

El aumento de la generación renovable ha modificado la curva de demanda (con picos de producción durante el día y descensos por la noche) exigiendo una mayor flexibilidad del sistema, lo que ha llevado a la implementación de un mecanismo de capacidad por el que se subastan pagos a las centrales eléctricas de ciclo combinado por su disponibilidad para generar energía en momentos críticos. Paralelamente, se está completando el proceso de cierre de centrales térmicas de carbón e impulsando medidas para fomentar la electrificación de la economía. Sin embargo, la crisis energética ha provocado un fuerte aumento de la volatilidad de los precios, impactando negativamente en la garantía del suministro, desincentivando la inversión en renovables y aumentando la pobreza energética. Durante el mes de abril de 2024 se registraron por primera vez precios negativos en el mercado diario eléctrico español, debido principalmente a una generación renovable elevada y a una baja demanda. Pero también debido a las limitaciones de la red de transporte para evacuar toda la energía renovable que se genera, especialmente en algunas zonas. Estos precios negativos plantean un debate sobre la eficiencia del mercado eléctrico y demuestran, de nuevo, la necesidad de reformas para garantizar un suministro de energía sostenible y competitivo que, por otro lado, España sí está preparada para asumir.

### 2.2. Las energías renovables

España dispone de importantes recursos renovables, con elevados potenciales de aprovechamiento de energía solar y eólica, lo que la sitúa en ventaja frente a otros países del entorno europeo. En 2023, las energías renovables generaron el 50,3% de la electricidad del país, superando la media europea.

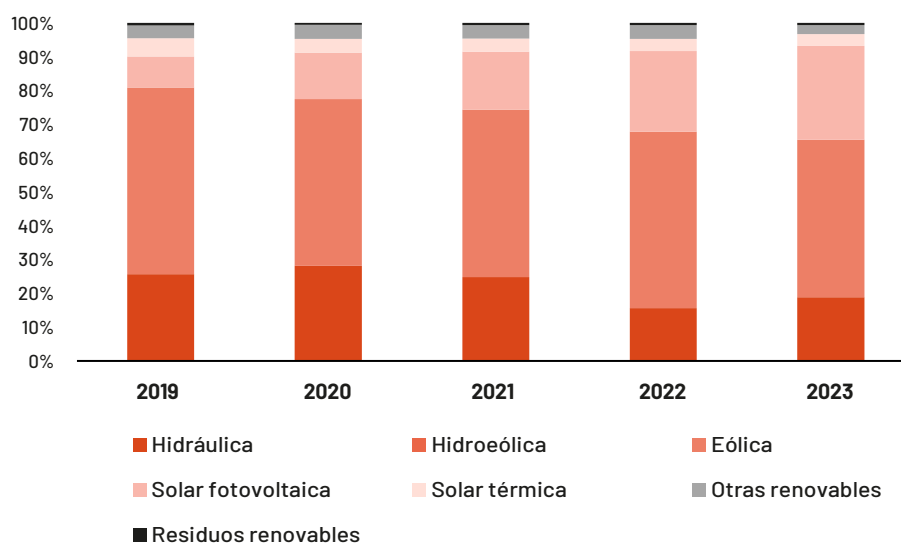
#### Estructura de la generación de energía por tecnología (MWh) 2023



Fuente: REData



## Evolución de la estructura de la generación de energía renovable



Fuente: REData

Se están implementado diversas políticas y medidas para facilitar el desarrollo de las energías renovables y su integración en el sistema eléctrico. Y mientras se promueve la investigación y el desarrollo de tecnologías para mejorar la eficiencia y el almacenamiento de energía renovable, se están realizando también inversiones para actualizar y modernizar la red eléctrica.

Uno de los principales desafíos para la integración de las energías solar y eólica en el sistema eléctrico español es su carácter no gestionable, lo que implica la necesidad de disponer de sistemas de almacenamiento, de dispositivos y de redes inteligentes que permitan la incorporación equilibrada de la electricidad generada por estas tecnologías en la red eléctrica.

### 2.3. Instalaciones de horno de arco eléctrico (EAF)

El horno de arco eléctrico (EAF) permite reciclar chatarra metálica y producir acero de alta calidad con un menor consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los procesos de la siderurgia integral, basados en el mineral de hierro y el carbón.

España cuenta con una amplia red de instalaciones de EAF, principalmente ubicadas en regiones con una fuerte tradición industrial como País Vasco, Cataluña y Asturias, representando en torno al 70% del acero de producción nacional, superando los 10 millones de toneladas anuales. La adopción de EAF ha permitido reducir la dependencia de las importaciones de materias primas, como el mineral de hierro y el coque, y ha contribuido a la creación de un ciclo más cerrado y sostenible de producción y consumo de acero. Esto posiciona a España como uno de los países europeos con mayor proporción de acero producido a partir de chatarra reciclada, lo que contribuye significativamente a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El hecho de que la etapa principal del EAF —la fusión de chatarra— tenga lugar con energía eléctrica facilita la integración más efectiva de la electricidad de origen renovable en el proceso de fabricación de acero. La experiencia en este tipo de instalaciones puede situar a España como exportador de conocimiento y tecnología EAF frente a otros países que aún dependan en gran medida de los altos hornos y que necesitarán avanzar tecnológicamente para cumplir con los objetivos climáticos de la UE.

## 2.4. Hierro de reducción directa (DRI)

La obtención de hierro de reducción directa (DRI), también conocido como esponja de hierro, es una alternativa a la obtención de arrabio a través del proceso de alto horno (BF-BOF), con el fin de usarlo como materia intermedia en la fabricación de acero.

La fabricación de acero en hornos de arco eléctrico a partir de DRI y chatarra reciclada pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> sensiblemente. Mezclas de 35% de chatarra y 65% de DRI reducen las emisiones entre un 17% y un 35%. No obstante, se trata de procesos alimentados con gas natural. La sustitución del gas natural por hidrógeno renovable puede suponer reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> del orden de un 70%, lo que hace que la fabricación de DRI con este tipo de hidrógeno, en combinación con hornos de cuba y de arco eléctrico alimentados por fuentes energéticas renovables sea una vía clave para la descarbonización de la siderurgia.

Las principales modificaciones tecnológicas para la sustitución completa de gas natural por hidrógeno en una instalación de DRI consisten en dotar a la planta de una entrada de hidrógeno proveniente del exterior o integrada en una unidad propia de generación de hidrógeno, y reemplazar o reconvertir el reformador de gas natural por un calentador que eleve la temperatura del hidrógeno. Todo ello implica modificaciones en otros parámetros del proceso principalmente relativos a flujos y temperaturas.



## 2.5. Hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V)

El hidrógeno en la industria siderúrgica se emplea, fundamentalmente, como agente reductor en los procesos de transformación del mineral de hierro en acero. La descarbonización del sector implica la sustitución del hidrógeno de origen fósil por hidrógeno obtenido de fuentes energéticas renovables, así como la incorporación de este hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) y sus combustibles derivados (combustibles renovables no biológicos como el amoníaco, el metanol o los combustibles sintéticos) en procesos térmicos de producción que requieran de elevadas temperaturas.

Existen numerosos proyectos en los ámbitos de la industria, la energía y el transporte para dar cabida a una producción de hidrógeno descarbonizado. Sin embargo, este tipo de fabricación alternativa continúa ocupando una posición marginal: sólo el 1% del hidrógeno consumido a nivel global se obtuvo mediante procesos de bajas emisiones mientras que el 99% restante es fabricado a partir de combustibles fósiles.

Las proyecciones para el futuro del hidrógeno de bajas emisiones a nivel global son esperanzadoras, previendo una producción de 49 Mt por año en 2030, lo que supondrá desplegar 520 GW de electrolizadores, de los que sólo el 4% se encuentra en la actualidad como proyectos con inversiones aprobada o en construcción.

La capacidad de fabricación de electrolizadores se cifra en 25 GW/año, correspondiendo el 60% a China. Se trata de una capacidad muy infrutilizada: en 2023 sólo se utilizó un 10% de la misma, lo que se explicaría por una todavía muy baja demanda de este tipo de hidrógeno ocasionada por su elevado coste de producción, entre 1,5 y 6 veces superior al hidrógeno convencional.

La capacidad de producción europea de hidrógeno en general es de unas 11,2Mt, de las que el 95,6% se obtuvieron a partir de combustibles fósiles, y sólo un 3,5% corresponden al proceso de electrólisis. La capacidad de producción española en el año 2023 de hidrógeno fue de 756 kt, posicionándonos en el sexto lugar de la lista de países europeos, por detrás de Alemania, Países Bajos, Polonia, Francia e Italia. El 93% de esa capacidad la constituye el reformado del gas natural y apenas un 1% procede de la electrólisis.

El actual coste de producción de hidrógeno guarda una estrecha relación con el sistema para su obtención. Los valores más bajos coinciden con el método de fabricación más extendido, el reformado de metano con vapor de agua, que representa un coste promedio de 3,76€/kg de H<sub>2</sub> y que, puesto que la mayor parte de las inversiones realizadas en las instalaciones para su obtención ya estarían amortizadas, podría incluso reducirse a los 3,5€/kg de H<sub>2</sub>. En el extremo opuesto se encuentra la electrólisis, ya sea en conexión a la red eléctrica o directamente a una fuente de energía renovable, con costes medios de 7,94€/kg de H<sub>2</sub> y de 6,61€/kg de H<sub>2</sub> respectivamente, existiendo fuertes diferencias entre países.

### Coste nivelado de producción de hidrógeno en Europa, año 2023

Tecnología	Coste medio (€/kg de H <sub>2</sub> )
Reformado de metano con vapor (SMR)	3,76 <sup>(1)</sup>
SMR con captura de carbono	4,41
Electrólisis conectada a la red	7,94 <sup>(2)</sup>
Electrólisis del agua con conexión directa a una fuente de energía renovable	6,61 <sup>(3)</sup>

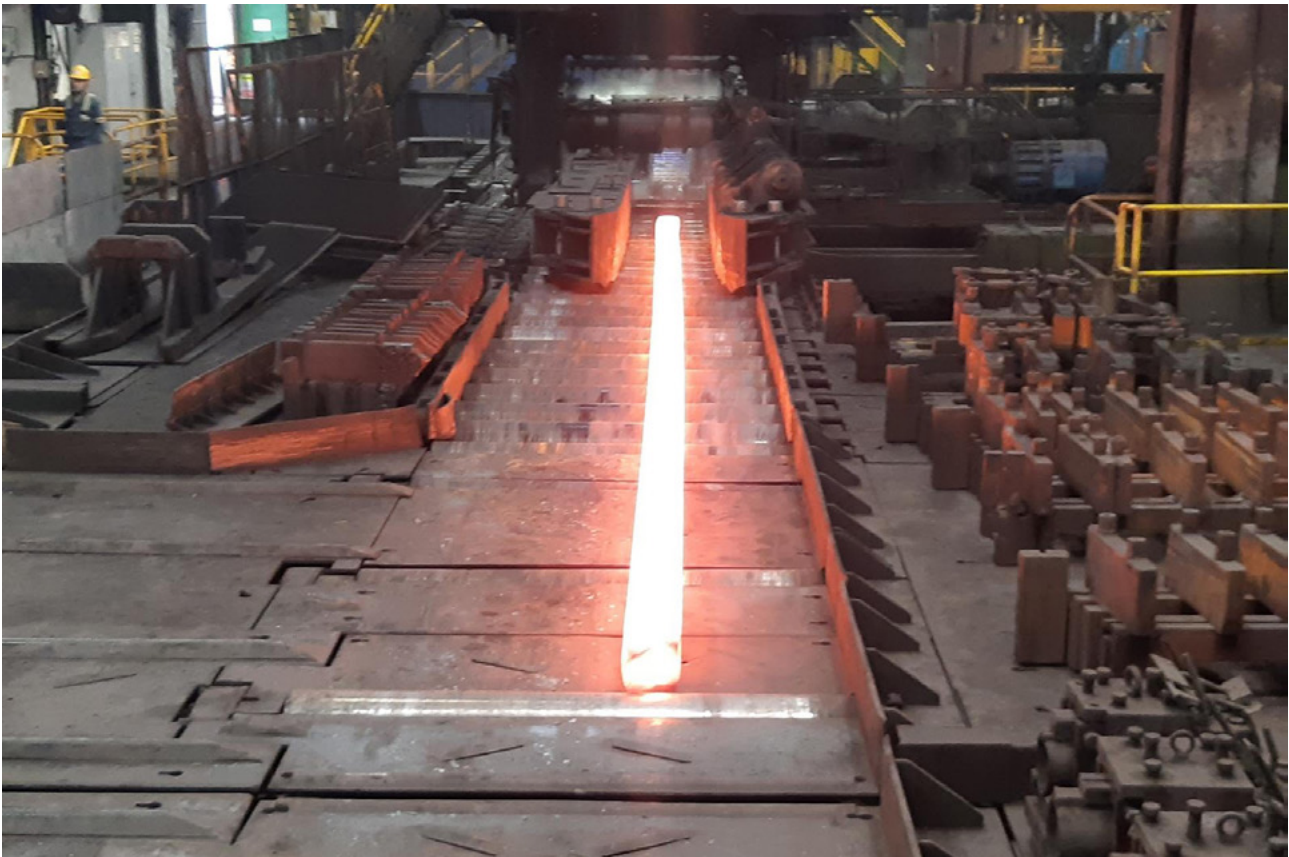
<sup>(1)</sup> Puede llegar a 3,5€/kg debido a que las inversiones en la mayoría de las plantas ya están amortizadas.

<sup>(2)</sup> Rango de variación de 4,06 a 17,36 €/kg.

<sup>(3)</sup> Rango de variación de 4,13 a 9,30€/kg.

Fuente: Observatorio Europeo del Hidrógeno





Este elevado coste de producción de  $H_2V$  supone un obstáculo para su desarrollo como vector para la descarbonización de los diferentes sectores productivos.

Existen diversas políticas e iniciativas europeas y nacionales destinadas a superar estas dificultades. En el contexto europeo destaca la Hoja de Ruta del Hidrógeno, publicada en 2020, que prevé el desarrollo de hidrógeno limpio entre 2020 y 2050 a lo largo de tres fases, la primera se concentraría en el despliegue inicial cerca de los centros de demanda; la segunda se centraría en la reducción de costes y la construcción de infraestructuras; y la tercera se enfocaría en el despliegue y la demanda a gran escala.

El objetivo de esta estrategia sería producir 10 millones de toneladas de  $H_2V$  e importar 10 millones de toneladas de este gas de aquí a 2030, lo que supondría un total de 20 millones de toneladas.

A nivel nacional, la Hoja de Ruta del Hidrógeno de España, aprobada en 2020, establece tres hitos: lograr en 2030 el desarrollo de la tecnología, en 2040 hacer del  $H_2V$  una fuente de energía plenamente competitiva, y en 2050 convertir a España en un país exportador de  $H_2V$ . Plantea una potencia instalada de electrolizadores de 4 gigavatios (GW) en 2030 (10% del objetivo de la UE), un 25% de consumo de  $H_2V$  en la industria, y un despliegue de casi 9.000M€ en inversiones para proyectos de producción. Recientemente, el Real Decreto 986/2024, de 24 de septiembre, por el que se aprueba la actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) para el periodo 2023-2030 amplía el objetivo de capacidad de electrólisis hasta los 12 GW.

Para cumplir estas metas, durante los últimos años se han implementado diversos planes de apoyo al  $H_2V$  que incluyen distintas herramientas de financiación. En este contexto han proliferado numerosas iniciativas empresariales destinadas a crear centros de producción de  $H_2V$  combinados con la instalación de parques de energías renovables y sistemas de distribución y almacenamiento que se reparten por diferentes territorios, promovidos, en muchas ocasiones, en colaboración con sectores industriales con necesidades de hidrógeno como insumo de sus procesos y potencialmente demandantes de energía descarbonizada.

Estos conglomerados o Hubs de actividad industrial y empresarial articulados en torno a la generación de H<sub>2</sub>V pueden actuar como importantes tractores de las economías regionales. Su viabilidad depende de muy diversos factores como son el acceso a financiación —pública, o privada— el apoyo institucional, la cooperación empresarial intra e intersectorial, la disponibilidad de recursos renovables e hídricos, la presencia de redes de suministro y evacuación eléctrica y gasística y las posibilidades de una demanda consistente y continuada. La conjunción de todos estos elementos permitiría la obtención y comercialización de H<sub>2</sub>V a precios competitivos.

Entre 2020 y 2024, el censo de proyectos de H<sub>2</sub>V en España ha contabilizado 166 iniciativas que suman 22 GW, duplicando casi la potencia propuesta contenida en la última revisión del PNIEC.

Aunque gran parte de los proyectos planteados están planificados para el periodo 2025-2026, en junio de 2024 sólo el 3% de los emprendimientos anunciados se encontraban en operación, un 5% en construcción, un 23% había recibido algún tipo de financiación pública y un 71% aún se encontraban en fase de estudio.

En la mayoría de los proyectos, la financiación pública únicamente cubre una parte de la capacidad de electrolisis. Estas ayudas proceden de diversos fondos y planes a nivel europeo y nacional creados en el marco de las políticas de promoción del H<sub>2</sub>V como vector de la transición energética. Dentro del ámbito europeo destacan las subvenciones del Fondo Europeo de Innovación, las provenientes del Banco Europeo del Hidrógeno y las asociadas a los Proyectos Importantes de Interés Común Europeo.

A nivel nacional, la principal vía de apoyo al desarrollo del H<sub>2</sub>V es el PERTE de energías renovables, hidrógeno renovable y almacenamiento (PERTE ERHA), dotado de un presupuesto de 10.797 M€, de los que 3.155 M€ (29,2%) están destinados a la financiación de hidrógeno renovable.

Hasta mediados de 2024 se habían ejecutado 624M€ para subvencionar diferentes proyectos, 39 relativos a la producción de H<sub>2</sub>V que suman una capacidad electrolítica de 772 MW y que deberían estar operativos entre 2025 y 2026 y 12 proyectos pioneros para aplicaciones del H<sub>2</sub>V con una potencia de 309 MW.

Los proyectos subvencionados hasta la fecha se ubican, principalmente, en los entornos territoriales de las ciudades de Gijón, Huelva, Sevilla, Algeciras, Tarragona, Zaragoza y León, lugares que podrían ser los núcleos alrededor de los cuales se vertebran los futuros Hubs o “Valles o Corredores del H<sub>2</sub>”.

Todo parece apuntar a que España está bien posicionada y, si desarrolla su potencial, podría convertirse en un país líder en la producción y el uso del H<sub>2</sub>V. Sin embargo, para que pueda alcanzar ese liderazgo, es fundamental superar varios desafíos clave, entre los que destacan la reducción del coste de producción y las infraestructuras de transporte.

El proceso de electrólisis, el más común para producir H<sub>2</sub>V a partir de energías renovables, requiere una inversión considerable tanto en tecnología como en energía. Si bien se espera que los costes disminuyan a medida que la tecnología mejore y aumente la producción en masa, será necesario acelerar este proceso mediante inversiones públicas y privadas, así como con incentivos fiscales. Además, es imprescindible crear un mercado propio para el H<sub>2</sub>V, pues a pesar de los avances a nivel europeo, en España aún no existe este mercado. Es necesario un marco regulatorio claro que estimule la inversión y genere demanda en sectores clave, como la industria, el transporte y la generación eléctrica.

El hidrógeno requiere redes específicas para su almacenamiento y distribución debido a sus características físico-químicas, o la modificación en profundidad de las ya existentes para el gas natural. España necesitará invertir en estas infraestructuras tanto a nivel local como transfronterizo si aspira a exportar H<sub>2</sub>V a otros países europeos. Además, será clave desarrollar una red interna que conecte los centros de producción, ubicados en zonas con abundantes recursos solares y eólicos, con los principales polos industriales y consumidores. Actualmente cuenta con una red de gas natural, de más de 11.000 km de longitud que podría ser adaptada para el transporte de H<sub>2</sub>V, aunque esto requeriría modificaciones significativas. Según Enagás, ya se ha identificado que un 30% de los tramos de gasoducto

podrían convertirse en hidrodutos, y este porcentaje podría incrementarse hasta el 70%. Sin embargo, se deben considerar los desafíos clave en esta adaptación: la compatibilidad de los materiales de los gasoductos con el hidrógeno, que puede provocar fragilización en las tuberías actuales; la modificación de las estaciones de compresión, diseñadas para gas natural pero no aptas para el hidrógeno; y la necesidad de gestionar adecuadamente la mezcla de hidrógeno con gas natural, que está limitada a bajos porcentajes sin afectar la seguridad y eficiencia de la infraestructura (hasta un 10-20% de hidrógeno por volumen sin requerir modificaciones importantes).

El aspecto positivo de las infraestructuras existentes es que permiten reducir costes, aceleran el propio desarrollo del H<sub>2</sub>V y permiten un buen aprovechamiento de la experiencia. Sin embargo, además de la adaptación, hace falta seguir desarrollando un marco regulatorio válido y normas técnicas para el transporte del H<sub>2</sub>V. En el siguiente cuadro se puede ver el coste económico de reutilizar o sustituir la red de transporte.

### Costes de reutilización o sustitución de la red de transporte de gas

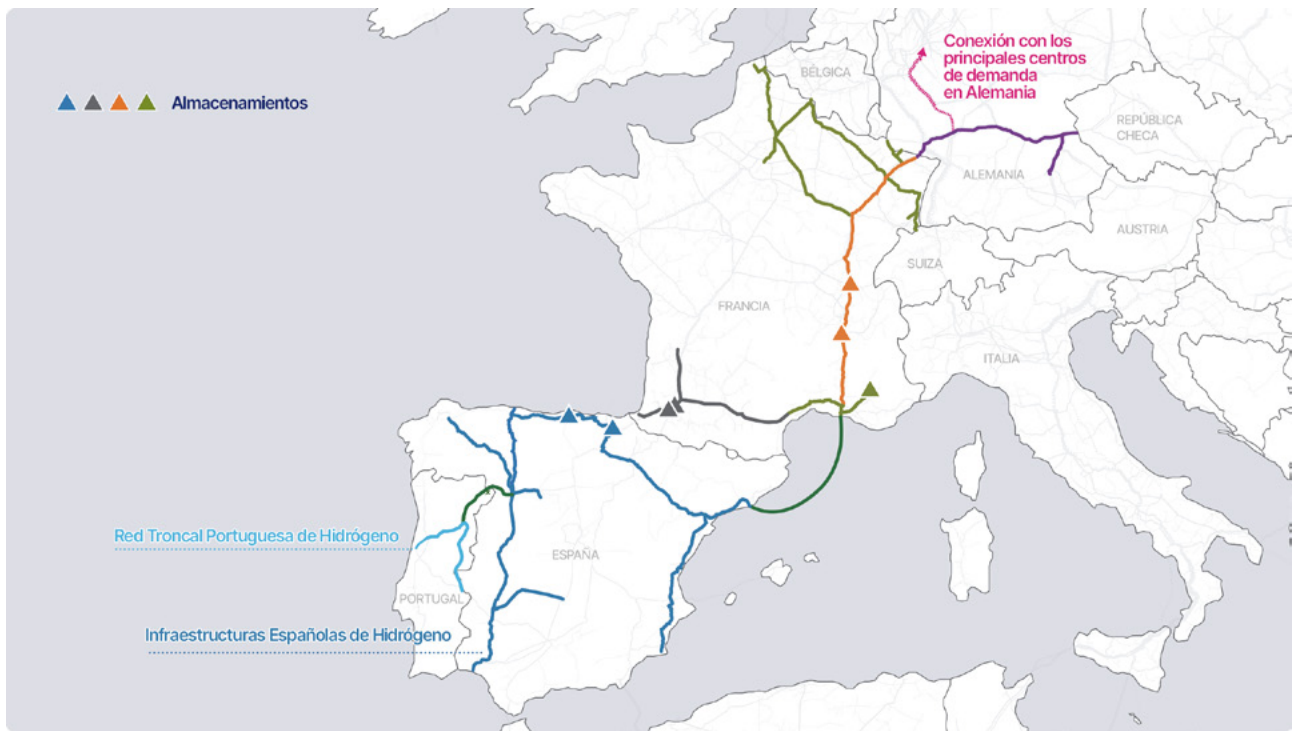
Componente	Valor (2019)	Comentario	Fuente
Inversión reutilización de gasoductos existentes	0,37 M€/km	Basado en el caso de Alemania, coste de reutilización del 15% en comparación con el nuevo gasoducto (excl. compresores)	(1)
Coste de inversión para un nuevo gasoducto (rangos)	0,93 M€/km	Diámetro medio de 16 pulgadas. Costes para el transporte de 6.600 km en el Reino Unido	(2)
	2,1 M€/km	Tubería de 48 pulgadas, operando entre 30-80 bar con una longitud de 300 km en el Reino Unido	(3)
	3,28 M€/km	Tubería de 48 pulgadas (Compresores excluidos)	(4)
Inversión en un nuevo compresor (rango)	0,65 M€/MW	Costes de un compresor, con un caudal de 240 t/día	(5)
	1,07 M€/MW	5,8 MW de capacidad de compresor, calculada según la curva de costes de la fuente (los compresores se necesitan cada 100-600 km, muy específicos para cada caso)	(4)
LCOT* para el transporte de H <sub>2</sub> : reutilización de la infraestructura de gas natural	3,7 M€/MWh H <sub>2</sub> por 600 km	Reutilización de las infraestructuras de gas existentes para 100% hidrógeno	(6)
LCOT para el transporte de H <sub>2</sub> : nueva infraestructura (rango)	4,6 M€/MWh H <sub>2</sub> por 600 km	Tubería de 48 pulgadas. Incluye los gastos el CAPEX y el OPEX de los gasoductos y compresores, así como los gastos de los combustibles de compresión	(6)
	11,4 M€/MWh H <sub>2</sub> por 600 km	El transporte a lo largo de 1.500 km se asume en origen, teniendo en cuenta todos los costes de capital y explotación. Normalizado a 600km.	(7)
	45 M€/MWh H <sub>2</sub> por 600 km	Costes estimados de compresión incluidos para tuberías de diámetros comprendidos entre 7 y 10 pulgadas a lo largo de 100 km, según la fuente. Normalizado a 600 km	(8)

\* Costes nivelados de transmisión

Fuentes: (1) FNB Gas, 2019, (2) Element Energy & E4Tech, 2018, (3) Navigant, 2019, (4) Jacobs, Element Energy, 2018, (5) Baufamé, 2012, (6) Navigant, 2019, (7) IEA, 2019, (8) DNV GL, 2019

Uno de los proyectos más importantes en relación con el desarrollo de la infraestructura de transporte de H<sub>2</sub>V en España es H<sub>2</sub>med, una iniciativa transnacional para interconectar las redes de hidrógeno de la península ibérica con el noroeste de Europa y que forma parte de la lista de Proyectos de Interés Común de la UE. H<sub>2</sub>med contempla 703 km de longitud de tubería, 2Mt de capacidad de transmisión por año, un presupuesto de 2.500M€ y una puesta en servicio prevista para 2030. En España, propone dos ejes troncales de transporte y dos almacenamientos subterráneos (Cantabria y País Vasco).





Fuente: H<sub>2</sub>med

En la UE hay 260.000 km de infraestructura de transporte para el gas natural y tan sólo 2.000 km para el H<sub>2</sub> (Bélgica, Alemania, Francia y Países Bajos), dado que la mayor parte del hidrógeno se produce en el lugar de demanda.

## 2.6. La sequía y su impacto en la disponibilidad de recursos hídricos en la siderurgia

La sequía es un fenómeno que, intensificado por el cambio climático, presenta para España un problema cada vez más acuciante. En el caso del sector del acero, la producción puede verse dificultada al reducirse la disponibilidad del agua que requieren sus procesos industriales. Además, compromete la generación eléctrica a partir de fuentes renovables.

España es uno de los países de la UE-27 más afectados por el estrés hídrico.

Las precipitaciones registradas a lo largo del año, especialmente abundante durante el mes de octubre, han revertido en buena medida el panorama de principios de 2024 en el que la situación de sequía prolongada afectaba a un 22,5% de la superficie del país. La industria siderúrgica, gran consumidora de agua, utiliza este recurso principalmente para procesos de enfriamiento y, en menor medida, para la limpieza de gases y operaciones mecánicas como el laminado. El sector ha implementado medidas para reducir su consumo de agua, como el uso de circuitos de enfriamiento semiabiertos que permiten reutilizar el agua, limitando la necesidad de extracción directa. Sin embargo, en instalaciones con sistemas de enfriamiento abiertos, el consumo de agua puede ser significativamente mayor, alcanzando hasta 100-2000 m<sup>3</sup> por tonelada de acero fabricada.

Aunque en la actualidad el sector siderúrgico no se ve altamente afectado por la situación de la sequía en España, si este fenómeno se sigue acrecentando, puede convertirse en un impacto significativo sobre la producción. Por otro lado, la escasez de agua puede afectar a la viabilidad de los proyectos de descarbonización sustentados en el empleo de electricidad de origen renovable y en el uso de hidrógeno verde. Así, la obtención de hidrógeno por electrólisis consume entre 4 y 12 litros de agua de calidad por cada kilogramo de hidrógeno producido.

## 2.7. La geopolítica para la ubicación de la industria: hacia un modelo regional de materias primas

La transición hacia un modelo más sostenible exige no solo cambios tecnológicos y operativos, sino también una reevaluación de las consideraciones geopolíticas y estratégicas en la ubicación de las factorías siderúrgicas. La proximidad a fuentes de energía renovable, el acceso a materias primas y la capacidad para aprovechar la infraestructura existente y las cadenas de suministro regionales son factores que pueden reducir significativamente los costes y la huella de carbono de la producción de acero, determinando el éxito de los esfuerzos de descarbonización.

En un mundo globalizado, los eventos geopolíticos como las guerras, sanciones y cambios en las alianzas internacionales tienen un impacto significativo en la disponibilidad y el costo de las materias primas. La transición hacia un modelo productivo descarbonizado abre la oportunidad de reconfigurar estas dependencias:

- La geopolítica del hidrógeno verde podría redefinir la ubicación de las plantas siderúrgicas. España, con su potencial de energías renovables tiene la oportunidad de convertirse en un líder en la producción de hidrógeno verde, lo que podría justificar la relocalización o la creación de nuevas instalaciones siderúrgicas cerca de fuentes de energías renovables en el territorio.
- La proximidad a los mercados europeos y la estabilidad geopolítica del entorno regional hacen de España un lugar atractivo para la inversión, en el caso de que se desarrolle una estrategia que tenga en cuenta las dinámicas geopolíticas globales y regionales, asegurando que la industria siderúrgica pueda adaptarse a las fluctuaciones en el suministro de insumos y a las regulaciones ambientales cada vez más estrictas.

El concepto de un modelo regional de materias primas implica la creación de una cadena de suministro más local y resiliente. Para la industria siderúrgica española esto podría traducirse en un enfoque centrado en la maximización de los recursos locales y regionales.

En términos de ubicación, las plantas siderúrgicas se situarían en regiones estratégicamente seleccionadas por su acceso a energías renovables, infraestructuras de transporte eficientes y recursos reciclables. Un modelo que podría fomentar el desarrollo de una mayor colaboración dentro de la Unión Europea, donde la integración de políticas energéticas y ambientales podría facilitar la creación de un mercado común del hidrógeno verde y otros recursos clave.

Este enfoque ofrecería una mayor estabilidad frente a las tensiones geopolíticas que afectan a los mercados internacionales de materias primas. Sin embargo, también existen múltiples desafíos y limitaciones que ponen en cuestión su viabilidad y efectividad. La dependencia de las importaciones es un problema que puede que no se resuelva tan solo con aplicar un enfoque regional, es más, la propuesta de un modelo regional de materias primas podría llevar a una concentración de la producción en áreas específicas, creando nuevas vulnerabilidad y desigualdades territoriales.

## 2.9. La chatarra como materia prima clave para la transición

En el contexto de la descarbonización de la industria siderúrgica, la chatarra ha emergido como una materia prima clave para la producción de acero, desempeñando un papel central en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a su capacidad para reducir la dependencia de materias primas vírgenes como el mineral de hierro y el coque, cuya extracción y procesamiento son altamente intensivos en carbono. La utilización de chatarra en la fabricación de acero conlleva importantes beneficios ambientales y económicos para la industria siderúrgica: se considera que por cada tonelada de acero reciclado se ahorra 1,5 toneladas de mineral de hierro, un 85% de agua, un 80% de energía y un 95% de carbón. En términos de ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de chatarra de acero ahorra aproximadamente un 58% de estas emisiones en comparación con las materias primas extraídas.

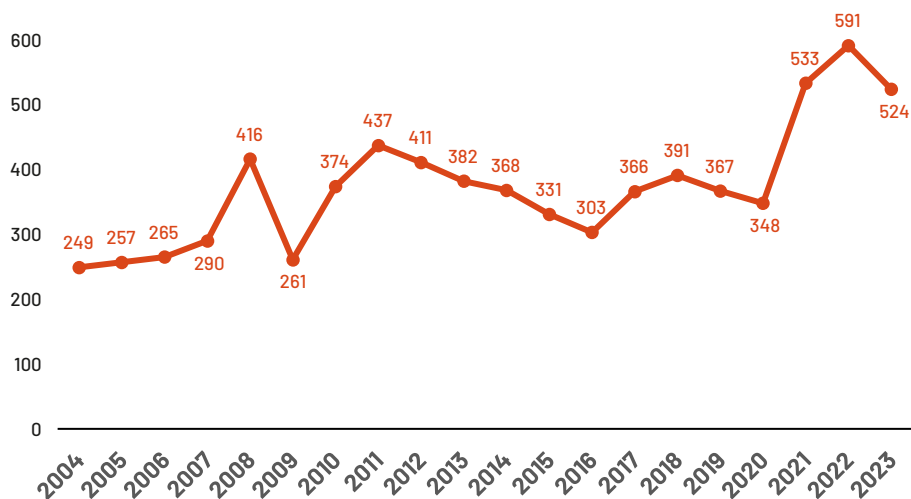
En España se reciclan aproximadamente 11 millones de toneladas de chatarra metálica, de las cuales cerca de 8 millones se destinan a la producción de acero mediante hornos de arco eléctrico. Este volumen sitúa a España como uno de los mayores recicladores de chatarra metálica de Europa, contribuyendo de manera significativa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector industrial. Aproximadamente el 80% del acero fabricado en nuestro país el año 2023 se obtuvo a partir de este material. Más de 6 millones de toneladas de chatarra férrea tuvieron un origen nacional pero cerca del 30% de las necesidades de la chatarra utilizada en los hornos eléctricos se cubrieron a través de la importación, poniendo de relieve que España actualmente no puede autoabastecerse de esta materia prima secundaria.

Esto obedece a que en España existe una limitación en cuanto a la disponibilidad de residuos brutos de hierro y acero de los que se extrae la chatarra. Las principales fuentes de este tipo de materiales son cuatro: el achatarramiento de automóviles, la construcción/demolición, la industria y el post consumo. Por ejemplo, los turismos y vehículo industriales de menos de 3.500 kg achatarrados en 2023 fue un 17% inferior a 2014. En cuanto al sector de la construcción y demolición, todavía se encuentra en fase de recuperación después de las crisis de 2008 y de la pandemia de Covid19, con un crecimiento positivo pero lento.

En este contexto, la demanda de acero producido a partir de chatarra ha ido en aumento, no solo por sus beneficios ambientales, sino también por las ventajas económicas que ofrece en un mercado donde los precios de las materias primas tradicionales pueden ser altamente volátiles. En este sentido, la chatarra se ha convertido en un recurso estratégico, no solo para cumplir con los objetivos de descarbonización, sino también para asegurar la resiliencia de la industria frente a las fluctuaciones del mercado global.

Según los datos de la Federación Española de Asociaciones de Fundiciones (FEAF), el precio medio de compra de la chatarra de acero se ha ido incrementando desde comienzos del presente siglo. Así, ha pasado de los 249 €/t de 2004 a los 524 €/t de 2023. Esta tendencia al alza podría estar reflejando una menor disponibilidad de oferta frente a una demanda mantenida o creciente en el tiempo.

### Precio medio de compra de la chatarra de acero 2004 - 2023 (€/t)



Fuente: FEAF

Uno de los principales desafíos es la disponibilidad de un producto de alta calidad, que puede ser limitado debido a la competencia global y a la variabilidad en las calidades del material reciclado. Para superar esto, es crucial mejorar la tecnología de reciclaje y procesamiento de chatarra, así como fortalecer los sistemas de recolección y clasificación de residuos metálicos.



Otro desafío importante es la elevada atomización del mercado nacional de la chatarra, compuesto en gran medida por empresas pequeñas y medianas, lo que dificulta la creación de una oferta estable y bien estructurada: en 2022 había registradas 5.384 empresas con actividades de recogida, separación y clasificación de metales ferrosos que ocuparon a 35.258 personas, y supusieron una cifra de negocio de casi 16.758 millones de euros, aproximadamente el 1,2% del PIB nacional.

La estructura empresarial de este sector se caracteriza por una fuerte presencia de la pequeña y mediana empresa al ser, en buena medida, empresas de naturaleza familiar.

### Número y porcentaje de empresas de residuos registradas por códigos CNAE

	(381) Recogida		(382) Tratamiento y eliminación		(383) Valorización	
<b>Total</b>	<b>1.771</b>	<b>–</b>	<b>527</b>	<b>–</b>	<b>477</b>	<b>–</b>
De 0 a 9	1.389	78%	361	69%	233	49%
De 10 a 19	138	8%	56	11%	115	24%
De 20 a 49	149	8%	59	11%	84	18%
De 50 a 249	70	4%	40	8%	41	9%
De 250 o más	25	1%	11	2%	4	1%

Fuente: INE

Geográficamente, existe una importante diseminación por el territorio nacional, con una tendencia a agruparse en torno a los territorios más industrializados y/o poblados y que por tanto suponen una fuente de residuos metálicos, como País Vasco, Cataluña y Madrid. En líneas generales las distancias entre los centros de acopio, separación y clasificación de la chatarra y los centros consumidores son inferiores a los 400 km, un hecho muy importante debido a que el transporte es un factor relevante en el incremento de los costes del producto y de la huella de carbono. Sin embargo, esta fragmentación puede limitar la capacidad de las empresas siderúrgicas para obtener grandes volúmenes de chatarra de manera eficiente y consistente. La falta de una consolidación adecuada en el mercado también provoca fluctuaciones en los precios y dificultades en la cadena de suministro. Para abordar este reto, sería beneficioso fomentar la cooperación entre estas pequeñas empresas y crear mecanismos que promuevan una mayor coordinación y eficiencia en la recolección y distribución de la chatarra.

La creciente demanda de acero producido a partir de chatarra representa una oportunidad significativa para España. A medida que la Unión Europea y otros mercados globales imponen regulaciones más estrictas sobre las emisiones de carbono, la demanda de acero verde se va incrementando. España, con su sólida infraestructura de horno de arco eléctrico y su capacidad para reciclar grandes volúmenes de chatarra, está bien posicionada para satisfacer la demanda y exportar productos de acero sostenible a otros mercados, siempre y cuando invierta en tecnología, innovación y en la optimización de su infraestructura de reciclaje.

Según fuentes de la Federación Española de Reciclaje (FER), el sector de la recuperación de chatarra férrea dispone actualmente de un avanzado nivel tecnológico, lo que le permite alcanzar estándares de calidad del material elevados, capaces de satisfacer las exigencias de la industria del acero e importantes niveles de eficiencia, lo que la hace más atractiva que la chatarra de importación por lo general, de peor calidad. En la actualidad muchas instalaciones se encuentran operando por debajo de su capacidad.





# PARTE 2.

## ESCENARIOS PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LA SIDERURGIA ESPAÑOLA

### 3. Escenarios para la descarbonización de la siderurgia española 2030

En este apartado se analizan tres posibles escenarios progresivos para la descarbonización de la producción de acero en España en el horizonte 2030. El primero de ellos consistente en mantener la tecnología actual, lo que proporciona un referente de comparación con los dos escenarios restantes basados en la aplicación de diferentes estrategias y tecnologías destinadas a lograr una industria siderúrgica más sostenible. Cada escenario se desglosa en sub-escenarios específicos que permiten evaluar los costes de producción y ambientales derivados de la aplicación de cada una de las opciones planteadas en función de diferentes variables como los precios del CO<sub>2</sub>, el gas natural, la energía eléctrica, el hidrógeno, el uso de chatarra y el DRI. Este análisis permite identificar oportunidades y desafíos que los cambios tecnológicos pueden suponer para la descarbonización del sector.

El primero de los escenarios que contempla la ruta del alto horno - horno básico de oxígeno y los hornos de arco eléctrico, un segundo escenario que contempla la implementación de alternativas tecnológicas como la combinación de EAF con DRI obtenido con gas natural y energía de origen renovable y, el tercero de los escenarios que plantea un paso más al presentar la sustitución del gas natural por hidrógeno verde en el proceso de reducción directa de hierro (DRI) y la integración de la electricidad renovable.

#### 3.1. Escenario 1: BF-BOF (Escenario 1A) y EAF 100% chatarra (Escenario 1B)

Este primer escenario refleja la situación actual de la producción de acero en España, que está basada en dos rutas: la de alto horno - horno básico de oxígeno (BF-BOF), y los hornos de arco eléctrico (EAF) utilizando chatarra. Se ha dividido en dos sub-escenarios 1A y 1B, correspondientes a cada una de estas vías.

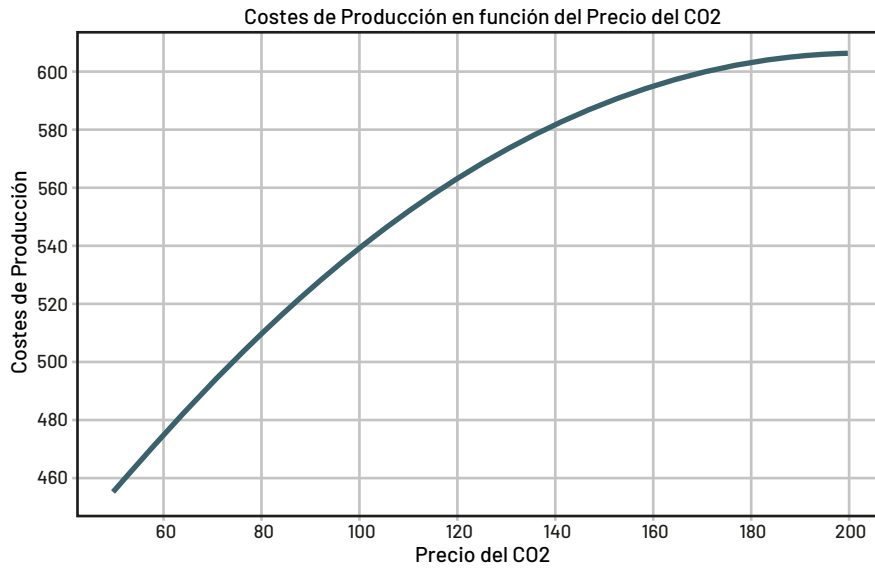
En este caso no se ha considerado ningún coste de inversión de capital puesto que se parte de instalaciones actualmente en operación. Concretamente, los dos altos hornos en funcionamiento están próximos al fin de su vida útil, por lo que la inversión inicial no incide especialmente en sus costes de producción.

##### 3.1.1. Escenario 1A: Ruta convencional BF-BOF

Este escenario plantea la producción de acero primario y es la más contaminante por el empleo en el proceso de combustibles fósiles. Se ha estudiado la variación de los costes de producción de la ruta BF-BOF en función de dos variables: el precio del CO<sub>2</sub> y el precio de la electricidad. En el primero de los supuestos se ha hecho variar el precio del CO<sub>2</sub> en el intervalo de 50€/t a 200€/t, manteniendo el precio de la electricidad constante en 80€/MWh (Gráfica 1).

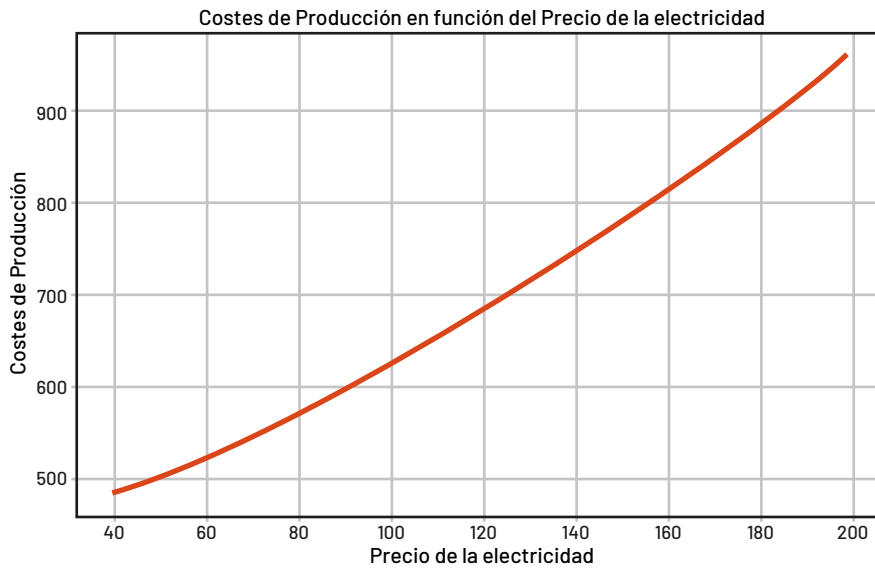


**Gráfica 1**



En un segundo supuesto, se ha hecho variar el precio de la electricidad en una horquilla de 40€/MWh a 200€/MWh, dejando fijo el precio del CO<sub>2</sub> en 130€/t (Gráfica 2).

**Gráfica 2**



Se observa una relación directa entre los costes de producción y las dos variables analizadas, si bien ambas muestran un comportamiento diferente a lo largo de los intervalos considerados.

- Un aumento en el precio del CO<sub>2</sub> incrementa los costes de producción debido a su coeficiente de interacción positivo con la electricidad; sin embargo, el coeficiente cuadrático negativo sugiere una moderación en el incremento a niveles más altos del precio del CO<sub>2</sub>. Esto se explica porque no se espera que el precio del CO<sub>2</sub> suba por encima de los 200€/t para 2030, pero sí para las décadas de 2030-2050, de manera que en un análisis que llegase hasta 2050 apuntaría a que los costes de producción lejos de estabilizarse seguirían aumentando progresivamente.
- El precio de la electricidad guarda una relación más lineal y directa con los costes de producción que el precio del CO<sub>2</sub>. Ello es consecuencia de que la electricidad es un gasto variable directo con un impacto constante sobre el coste de producción, mientras que el precio del CO<sub>2</sub> tiene un comportamiento más complejo debido a su interacción con otras variables, así como su vinculación a medidas de control ambiental tipo Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) que incrementa su precio.

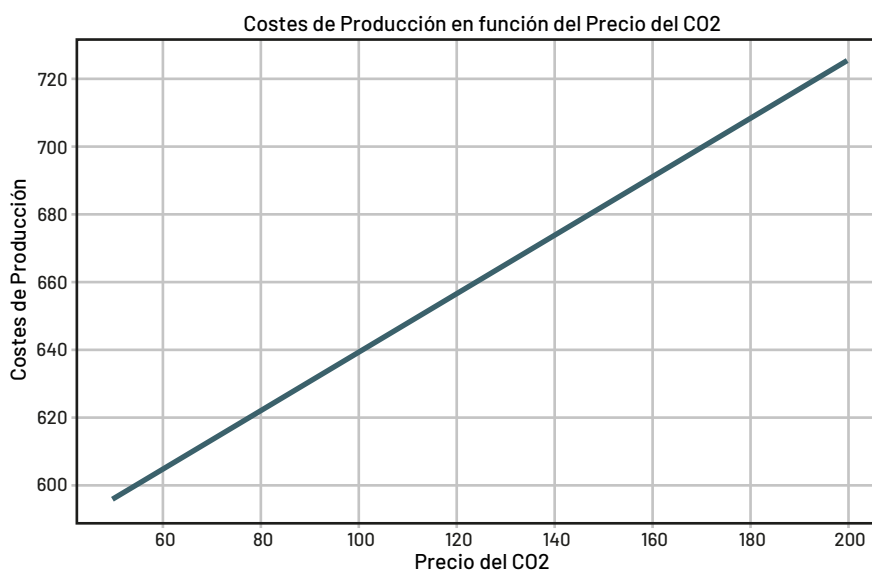
**En este sub-escenario, el coste de producción para un precio de la electricidad de 80€/MWh y un precio del CO<sub>2</sub> de 130€/t es de 573€/t, de acero**, un valor que servirá como referencia para comparar los costes de producción obtenidos en el resto de los escenarios analizados.

### 3.1.2. Escenario 1B: EAF 100% chatarra

Analiza los costes de producción de acero reciclado, reforzando así la economía circular del sector, mediante hornos de arco eléctrico (EAF) que utilizan como materia prima exclusivamente chatarra, a diferencia de otras que emplean algún tipo de formato de mineral de hierro o diversas combinaciones de materiales. En el análisis se han considerado tres variables: el precio del CO<sub>2</sub>, el coste de la electricidad y el precio de la chatarra.

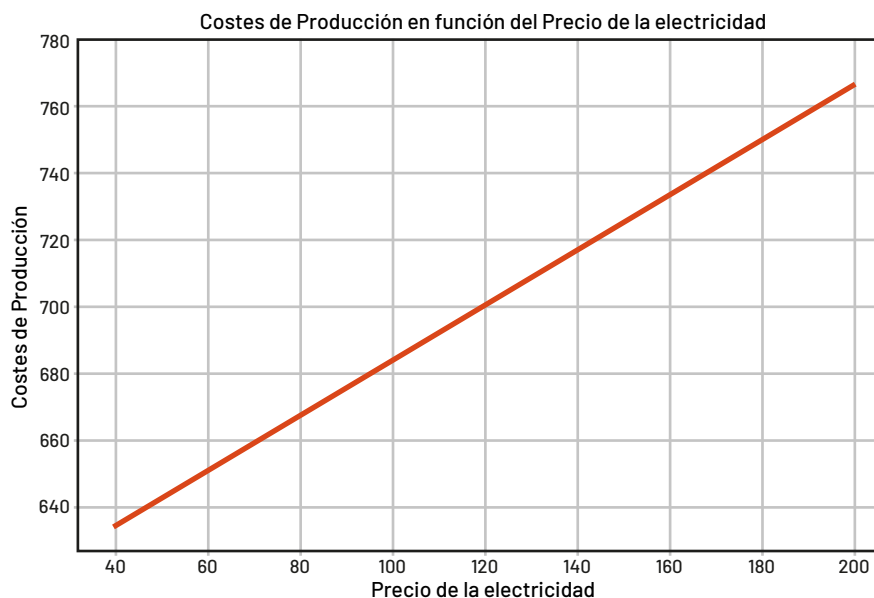
Primeramente, se ha estudiado la evolución del coste de producción en un intervalo de precio del CO<sub>2</sub> de entre 50€/t y 200€/t, considerando unos precios constantes para la electricidad de 80€/MWh y para la chatarra de 450€/t (Gráfica 3).

**Gráfica 3**

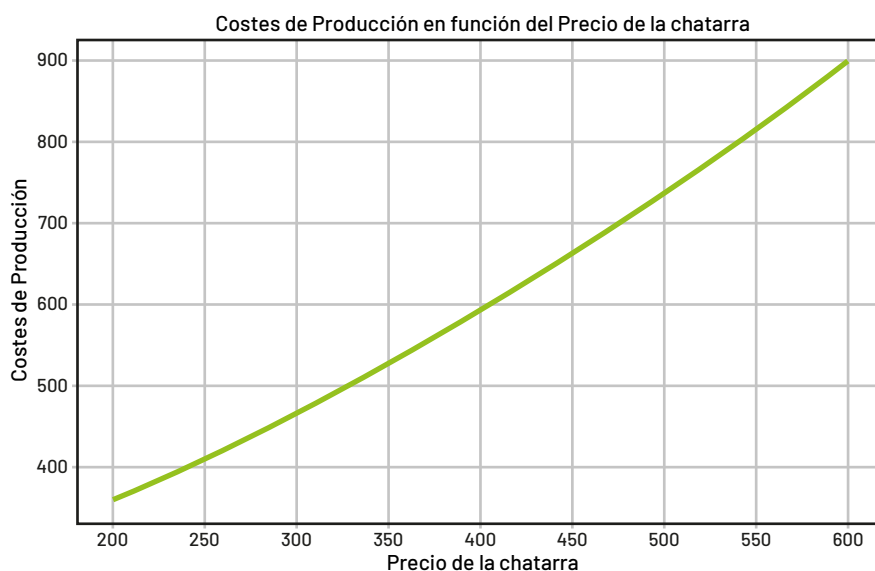


A continuación, se ha observado el desarrollo de los costes de producción en función del precio de la electricidad en el segmento comprendido entre los 40€/MWh y los 200€/MWh, dejando constantes los precios del CO<sub>2</sub> y de la chatarra en 130€/t y 450€/t respectivamente (Gráfica 4). Se ha repetido el estudio variando el precio de la chatarra entre los 200€/t y los 600€/t, atribuyendo unos valores fijos de los precios del CO<sub>2</sub> y de la electricidad de 130€/t y de 80€/MWh cada uno (Gráfica 5).

**Gráfica 4**



**Gráfica 5**





En todos los casos se aprecia una relación directa entre los costes de producción y las variables analizadas; aunque como ya sucediera en el sub-escenario 1A, esta correspondencia es diferente para cada una de las variables consideradas:

- La relación entre el precio de la chatarra y los costes de producción es casi lineal, indicando una alta dependencia del coste de este insumo. La importante subida del precio de la chatarra en los últimos años debido a una demanda superior a la oferta eleva el coste productivo de esta ruta, que en un contexto de precios de la electricidad bajos o medios podría estar por debajo del coste de la vía BF-BOF convencional. Esto se aprecia en las gráficas del precio de la electricidad y del CO<sub>2</sub>, también, que tienen altos valores al darse un precio fijo de la chatarra en ellas de 450€/t, mientras que en el gráfico del precio de la chatarra se pueden ver valores muy amplios y diferenciados entre sí en función de diferentes precios de la chatarra. De hecho, si la chatarra tuviera un precio de 300 €/t, el coste de producción bajaría hasta 467.33 €/t, un 30% menos del estimado con la chatarra a 450€/t.
- El coste de producción también aumenta con el precio de la electricidad, y aunque esta relación es menos pronunciada que con el precio de la chatarra, no debe pasar desapercibida, por tratarse de un coste variable directo en la vía EAF.
- Del mismo modo, el precio del CO<sub>2</sub> también impacta en el coste de producción, elevándolo. Sin embargo, la diferencia con el escenario 1A es importante: la ruta EAF con 100% de chatarra supone unas emisiones de 0,84t de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero producida frente a las 2 t/CO<sub>2</sub> emitidas por los altos hornos, lo que finalmente puede representar un ahorro de costes significativo.

**Este sub-escenario proporciona un coste de producción, para un precio de electricidad de 80 €/MWh, un precio de chatarra de 450 €/t y un precio del CO<sub>2</sub> de 130 €/t, de 665 €/t de acero proyectado a 2030.**

Se trata de un coste superior al que suministra el sub-escenario 1A, correspondiente al BF-BOF, de 573€/t de acero. Ello se debería a dos razones:

1. El precio del CO<sub>2</sub>, que afecta en gran medida a la ruta BF-BOF, se presenta creciente para 2030, pero todavía no se encontrará en su mayor pico de crecimiento, sino que éste se espera que se dé a partir de 2030;
2. El precio de la chatarra, que se ha visto fuertemente incrementado en los últimos cinco años, y se espera siga creciendo hasta 2030, si bien, se podría vislumbrar una estabilidad e incluso una caída posterior.

En base a esto, en esta proyección a 2030, no se está todavía manifestando el efecto potencial que puede tener el incremento del precio del CO<sub>2</sub> sobre la ruta BF-BOF a medio-largo plazo, mientras que se está magnificando el efecto del precio de la chatarra sobre el coste productivo de la ruta EAF.



### 3.2. Escenario 2: EAF-DRI-GAS NATURAL (Escenario 2A) y EAF 100% chatarra con electricidad renovable (Escenario 2B)

Dentro de este escenario se exploran alternativas tecnológicas maduras pero emergentes que pueden contribuir a descarbonizar la producción, de cuya aplicación efectiva dependerá de factores clave como la inversión en infraestructura, el desarrollo de nuevas capacidades técnicas y la evolución de los mercados de la energía y de las materias primas.

Las tecnologías consideradas son la combinación de EAF con DRI obtenido utilizando gas natural, y la utilización de electricidad de origen renovable. La producción de DRI mediante gas natural se aplica desde hace años en plantas distribuidas por diferentes países, disponiendo de sistemas comerciales como Midrex y HYL. Su adopción a gran escala puede requerir inversiones significativas que permitan la adaptación de las acerías existentes. El uso de electricidad de origen renovable en la ruta EAF introduce nuevas consideraciones relacionadas con la necesidad de inversiones en infraestructura y ajustes operacionales, y con la fiabilidad del suministro y la gestión de la intermitencia inherente a algunas de las tecnologías de producción energética, como la eólica o la fotovoltaica. Cada una de las tecnologías contempladas se valoran en sub-escenarios diferentes.

#### 3.2.1. Escenario 2A: EAF-DRI-GAS NATURAL

La ruta EAF en combinación con DRI y el gas natural podría ser una alternativa la producción primaria de acero mediante la ruta BF-BOF, que reduciría las emisiones al tiempo que mantendría la calidad del acero.

El proceso implica el uso de gas natural como agente reductor para producir DRI, que se funde posteriormente en un EAF para obtener acero. La utilización de gas natural en lugar de coque disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero no las suprime, siendo todavía relevantes. Aun así, esta alternativa tiene la ventaja de ofrecer una plataforma flexible adaptable a futuras mejoras tecnológicas, como la integración de hidrógeno verde, una opción con un elevado potencial para reducir significativamente las emisiones, facilitando la alineación con los objetivos de descarbonización a largo plazo.

Dentro de este sub-escenario, basado en el empleo de gas natural en la obtención del DRI, se ha estudiado el impacto sobre el coste de producción de acero de las siguientes alternativas: la utilización de una mezcla del 50% DRI y 50% chatarra, la compra de DRI en lugar de su producción en planta, y la implementación de electricidad renovable en el proceso.

#### Escenario EAF – DRI

##### 2A EAF-DRI-GAS NATURAL (100% DRI PRODUCIDO EN PLANTA)

2A1. 50% DRI y 50% CHATARRA

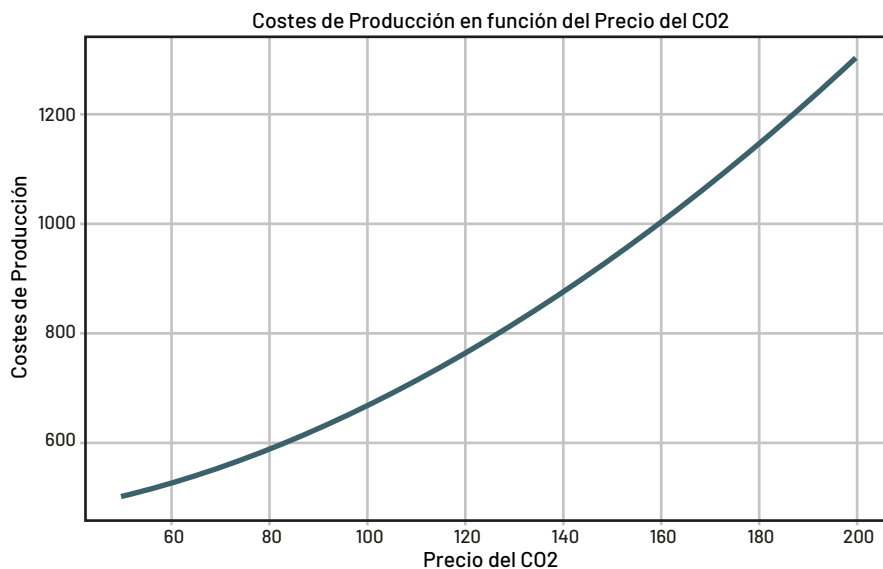
2A2 100% DRI COMPRADO

2A3 50% DRI COMPRADO y 50% CHATARRA

##### 2B EAF-DRI-ENERGIA RENOVABLE

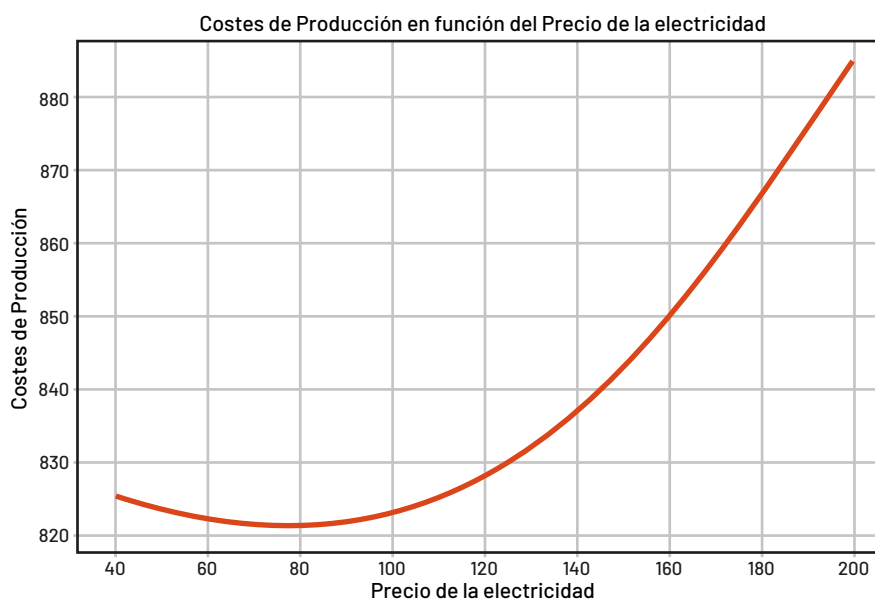
Cuando el DRI se fabrica con gas natural en la propia factoría (Escenario 2A) y el coste de producción se analiza para un intervalo de precios de CO<sub>2</sub> comprendido entre los 50€/t y los 200€/t manteniendo un precio de la electricidad constante de 80€/MWh (Gráfica 6), se observa un comportamiento exponencial en la evolución de dicho coste. Tal hecho refleja la dependencia de esta ruta del precio del CO<sub>2</sub> debido al uso significativo de gas natural, que contribuye a las emisiones.

**Gráfica 6**



Al realizar el mismo análisis haciendo variar el precio de la electricidad en el segmento de los 40€/MWh - 200€/MWh, y con un precio constante del CO<sub>2</sub> de 130€/t (Gráfica 7) se aprecia como, los costes de producción inicialmente disminuyen levemente hasta alcanzar un punto mínimo antes de aumentar de manera exponencial con el incremento del precio de la electricidad. Ello pone de manifiesto la alta sensibilidad de la ruta EAF al coste de la electricidad.

**Gráfica 7**





**A través de esta alternativa se obtendría un coste de producción de 821€/t de acero, considerando un precio de la electricidad de 80€/MWh y un precio del CO<sub>2</sub> de 130€/t.** Se trata de un valor un 43% mayor que el obtenido en el subescenario 1A. La diferencia entre ambos costes se atribuye a:

- El gasto en capital (CAPEX) por la inversión en la compra del EAF y del horno de eje para la producción de DRI.
- La reducción de solo un 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- El coste del gas natural requerido para el proceso de obtención de DRI.
- El aumento del consumo de electricidad, que pasa de 0,536MWh en la ruta BF-BOF a 1,23 MWh.

A pesar de este aumento del coste productivo, la opción EAF-DRI supone un paso importante en la reducción de emisiones, tanto por el abatimiento del 30% de las mismas, como por la posibilidad de constituir un paso intermedio hacia la sustitución del gas natural por el hidrógeno verde en un futuro.

### **Escenario 2A1: EAF-DRI-GAS NATURAL con un 50% chatarra y 50% DRI**

**Introducir un 50% de chatarra (0,536t) en esta ruta productiva del acero permite reducir:**

- Al 50% la carga de pellets de mineral de hierro para fabricar el DRI (0,738t), así como el gas natural requerido en dicho proceso (2,3 MWh).
- Un 21% de las emisiones de CO<sub>2</sub>: 1,1t
- Un 12% de la electricidad requerida: 1.0745MWh.
- **Un 22% los costes de producción<sup>5</sup>: 643€t.**

La introducción de chatarra reduce el coste productivo de esta ruta, a pesar de tener en cuenta un precio de la chatarra de 450€/t, que como ya se ha explicado en el escenario 1B, es un precio bastante alto. Si el precio de la chatarra estuviese a 300€/t, el coste productivo de esta ruta EAF-DRI-GAS NATURAL con un 50% de chatarra sería de 562€/t, un 31% más bajo que mediante la ruta con 100% DRI.

### **Escenario 2A2: EAF-DRI-GAS NATURAL en el que se compra el DRI en vez de producirlo en la planta**

Aunque la producción de DRI en la propia planta es una práctica establecida, la compra de DRI puede ofrecer flexibilidad y reducir los costes operativos, especialmente si se logra asegurar un suministro seguro y competitivo. Actualmente no es algo que se haya generalizado, pero sí algo que se está valorando seriamente.

Comprar DRI en vez de producirlo permite reducir:

- Un 55% el gasto en capital, al no necesitarse el horno de eje que produce el DRI: 17,73€/t/año<sup>6</sup>.
- Un 66% las emisiones directas del proceso productivo al no requerirse el uso de gas natural y reducirse el uso total de electricidad: 0,47t<sup>7</sup>.
- Un 16% el uso de electricidad: 1,03 MWh<sup>8</sup>.

<sup>5</sup>. Estimados mediante una función lineal en vez de cuadrática al no disponer de los datos de los costes de producción concretos de esta variante de la ruta. Lo mismo sucede con el resto de las variantes presentadas a continuación.

<sup>6</sup>. El CAPEX del EAF es de 184€/t, aplicando una vida útil de 15 años y una tasa de capital del 5%, el flujo anualizado el CAPEX total es de 17,73€/t. Fuente: Arias et al. (2022).

<sup>7</sup>. No se tienen en cuenta las emisiones asociadas a la compra del DRI, solamente las del propio proceso productivo.

<sup>8</sup>. Aunque se elimina el uso de electricidad que supone el horno de eje que produce el DRI, se produce un ligero aumento de la electricidad requerida en el EAF debido a que no se precalienta el DRI.

Sin embargo, mantener el uso de 1,504t de DRI para producir una tonelada de acero, genera un efecto contrario en el coste de producción a las reducciones presentadas, puesto que el precio de compra del DRI no es bajo. Teniendo en cuenta un precio del DRI para 2030 de 250€/t<sup>9</sup>, y junto con el resto de las variables, **la ruta EAF-100%DRI comprando el DRI, en vez de produciéndolo, supone unos costes de fabricación de 537€/t, un 34% menos.** Este coste de producción es altamente dependiente del precio del DRI. Así, en el caso de que el coste del DRI fuese de 400€/t, el gasto de producción aumentaría hasta los 763€/t. Por ello, a pesar de las ventajas de esta opción en cuanto a costes de producción y reducción de emisiones directas, su alta dependencia de un poco consolidado mercado de DRI, cuya alta volatilidad previsiblemente se mantendrá hasta el año 2030, la convierte en una alternativa bastante arriesgada y podría comprometer la constancia del proceso de producción del acero.

### Escenario 2A3: EAF-DRI con un 50% de chatarra y el DRI comprado

Si se tiene en cuenta una unión de las dos variantes anteriores, entonces las variables a tener en cuenta serían las siguientes: 0,68t de CO<sub>2</sub>, 0,738t DRI comprado, 0,536t de chatarra, CAPEX del EAF y 1,03 MWh de electricidad.

Las emisiones son menores que en el escenario principal por el hecho de comprar el DRI, sin embargo, el uso de chatarra también compensa esa caída, y no se están teniendo en cuenta las emisiones derivadas del proceso de compra de DRI, que, aunque son indirectas, podrían aumentar el precio.

**El coste de producción de la ruta EAF-DRI con un 50% de chatarra y el DRI comprado, con un precio de la chatarra de 450€/t y un precio del DRI de 250€/t, ronda los 614€/t.** Si el precio de la chatarra fuera más bajo, de 300€/t, entonces el coste de producción sería de 534€/t; pero si el precio del DRI fuese mayor, de 400€/t, entonces los costes de producción ascenderían hasta 725€/t.

Todos estos datos demuestran una alta sensibilidad de esta alternativa al precio de la chatarra, así como al precio del DRI, lo que pone en alto riesgo la constancia y seguridad del proceso productivo.

### Escenario 2A4: EAF-DRI con electricidad renovable

En general, el uso de electricidad renovable tiene dos implicaciones: por un lado, una reducción considerable de emisiones de CO<sub>2</sub>; y, por otro lado, una reducción en el precio (el precio asumido para 2030 de la electricidad no renovable es de 80€/MWh<sup>10</sup>, mientras que para la electricidad renovable se estima en 30€/MWh<sup>11</sup>).

9. El mercado del DRI no está desarrollado, por lo que para obtener un precio estimado de compra se ha unido el precio de los pellets de mineral de hierro con el coste de conversión de los mismos en DRI mediante gas natural en Europa. Estos datos están disponibles para los años 2022-2024, y siendo el precio de 2024 un total de 362,65€ en su última consulta, y estimando una caída de ambos precios con el paso de los años, se ha llegado a la estimación de un precio de DRI en torno a 250€/t. Sin embargo, es un mercado muy emergente del que habrá que revisar sus variaciones. Fuente: Argusmetals (2024): Directly reduced iron conversion cost excl iron ore Natural Gas Ex-Works NW Europe EUR/mt. Argusmetals (2024): Iron ore 67pc DRI pellet freight adjusted cfr Rotterdam EUR/mt.

10. Estimaciones en base a los precios históricos de la electricidad en España y las proyecciones de evolución esperadas para 2030. Fuente: EUROSTAT (2024): [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_205/default/table?lang=en&category=nrg.nrg\\_price.nrg\\_pc](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_price.nrg_pc)

11. Estimaciones en base a los precios históricos de la electricidad renovable en España y las proyecciones de evolución esperadas para 2030. Fuentes: OMIE, REER, LevelTen Energy, Ibedrola, diferentes notas de prensa.

La implementación de electricidad renovable se puede tener en cuenta tanto para el subescenario principal como para sus diferentes variantes. Lo que se tiene que considerar es que la electricidad no renovable emite 460 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sup>12</sup>, mientras que la electricidad renovable emite 40 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sup>13</sup>, es decir, la electricidad renovable emite un 90% menos de CO<sub>2</sub>.

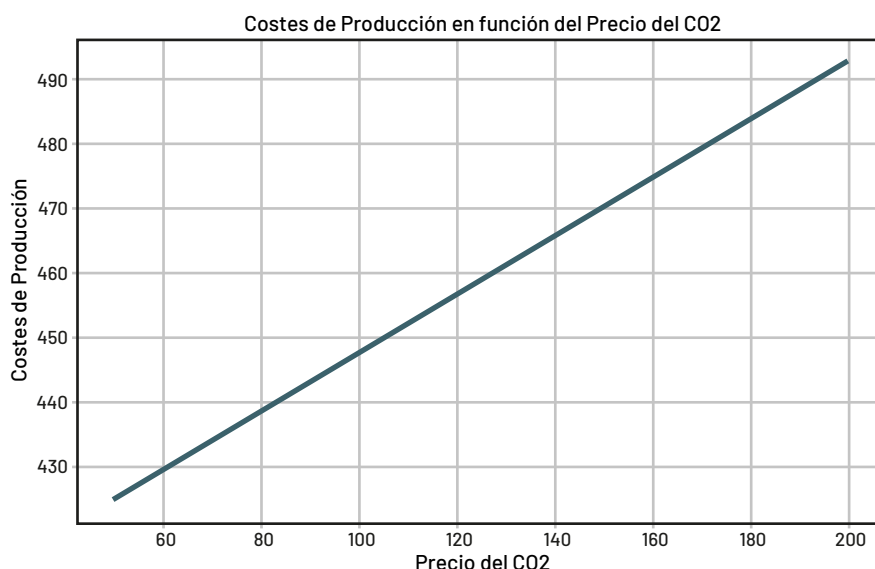
Sin embargo, y como se expone en el escenario 2B, la implementación de electricidad renovable en el proceso productivo no solo supone beneficios, sino también un proceso de inversión y de modificación de la infraestructura que se debe tener en cuenta en este análisis. Implementar la electricidad renovable en una planta productiva como las del sector siderúrgico implicaría tener en cuenta, también, un gasto de capital (CAPEX) anualizado de 61€/MWh (todos los detalles en el apartado 2B, a continuación).

### 3.2.2. Escenario 2B: EAF (100% chatarra) con electricidad renovable

Este escenario examina el uso de electricidad renovable para alimentar EAF que operan con un 100% de chatarra, produciendo acero secundario. Este enfoque busca reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub>, que por el uso de electricidad renovable pasan de 0,84t a 0,45t. La incorporación de este tipo de electricidad en los EAF implica una serie de ajustes técnicos con sus correspondientes inversiones, pero constituye una gran oportunidad para avanzar hacia una fabricación de acero más limpia y eficiente, sin repercutir de manera significativa en los costes de producción.

La implementación de electricidad renovable al proceso EAF con 100% de chatarra reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, si bien el precio de este sigue siendo determinante en el coste productivo del proceso (Gráfica 8).

**Gráfica 8**

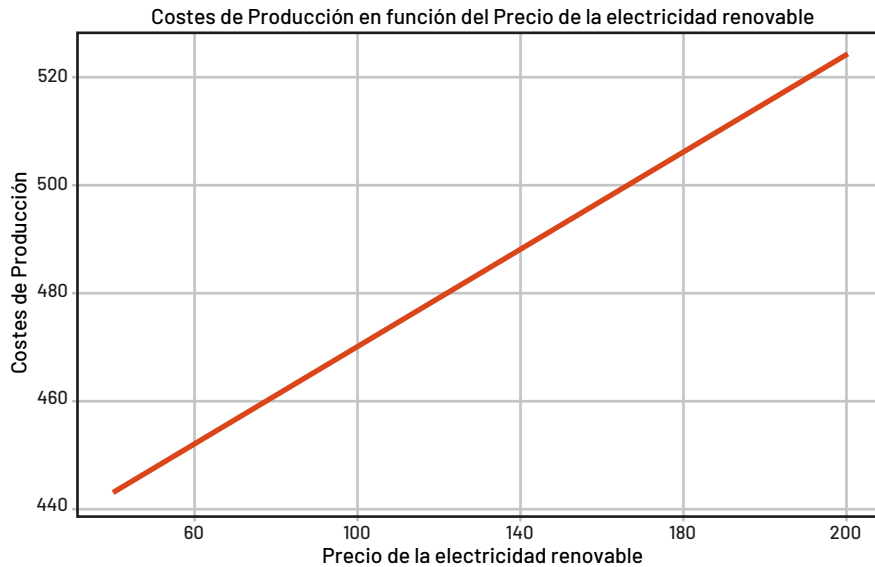


12. Fan & Friedmann (2021).

13. NREL (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics.

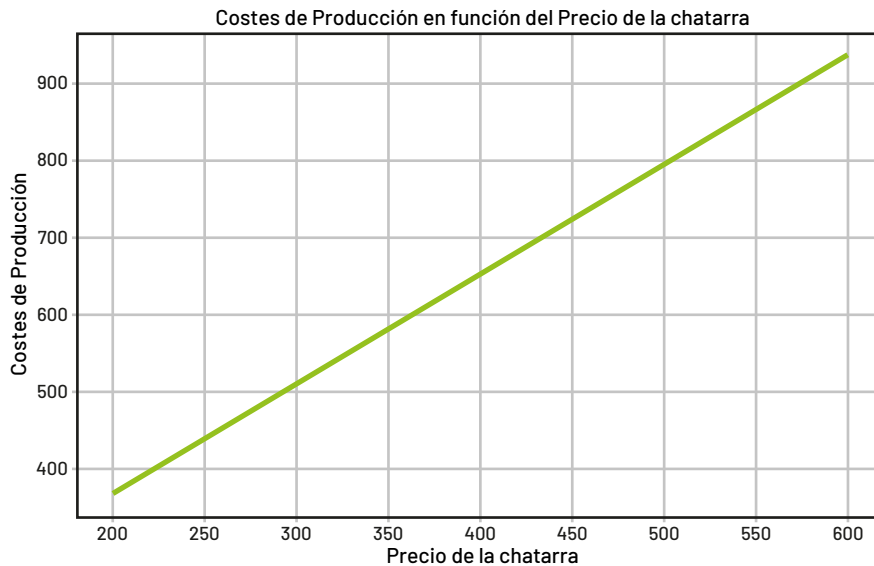
Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wisner, (2014): Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.

### Gráfica 9



El coste de producción en la alternativa analizadas también resulta altamente sensible al precio de la chatarra (Gráfica 10).

### Gráfica 10



**El coste de producción obtenido para esta opción, considerando un precio de la electricidad renovable de 30€/MWh, un coste del CO<sub>2</sub> de 130€/t, y un precio de 450€/t la chatarra es de 461€/t de acero.** Cómo se ha apuntado en casos anteriores, reducir el precio de la chatarra a 300€/t se refleja en una caída del coste de producción hasta 355€/t.



En este escenario es crucial evaluar el coste de la infraestructura necesaria para integrar la electricidad renovable. Esta puede llevarse a cabo mediante la instalación de fuentes de generación para el autoconsumo, o mediante la conexión a la red eléctrica de origen renovable. La conexión a la red reduce las inversiones necesarias en infraestructura propia), pero está sujeta a la disponibilidad y a los costes en el mercado, así como a la estabilidad y capacidades de la red para manejar una alta demanda. El autoconsumo mediante la instalación de paneles solares o turbinas eólicas reduce esta dependencia, otorgando más estabilidad y predictibilidad, y aunque requiere de una inversión inicial significativa para la infraestructura necesaria y puede estar limitada por factores como la disponibilidad de espacio y condiciones climáticas, la energía generada se consume directamente en la planta, lo que puede reducir los costes operativos a largo plazo y proteger contra la volatilidad de los precios de la electricidad en el mercado.

Aunque en la industria siderúrgica española se están considerando ambos métodos de integración de electricidad renovable, la tendencia actual muestra un mayor interés hacia el autoconsumo, debido a la reducción de costes que puede ofrecer, así como al control directo sobre la generación y el uso de la energía. Además, la legislación y las ayudas gubernamentales han facilitado el crecimiento de proyectos de autoconsumo en el sector industrial, incentivando a las empresas a invertir en sus propios sistemas de generación.

En este sub-escenario se tiene en cuenta el gasto de capital (CAPEX) de invertir en un sistema de generación de electricidad renovable consistente en paneles fotovoltaicos y baterías para el almacenamiento de energía. Se ha tenido en cuenta el coste total de la instalación fotovoltaica (construcción, instalación y puesta en marcha)<sup>14</sup> y el coste de una batería de ion-litio de 4 horas<sup>15</sup>.

A pesar de la inversión económica que supone la incorporación de electricidad renovable al proceso productivo, su uso ofrece beneficios a largo plazo en términos de reducción de emisiones y potencialmente menores costes operativos debido a la estabilidad y al menor importe de los precios de la electricidad renovable a lo largo del tiempo. Comparando los escenarios 1B y 2B, se observa que la fuente de electricidad empleada marca una diferencia fundamental. Mientras que el escenario 1B depende de la electricidad no renovable sin requerir inversiones en CAPEX, el escenario 2B implica la implementación de electricidad renovable con una inversión inicial considerable que debe incorporar al coste de producción de acero el CAPEX anualizado. A pesar de ello, el escenario 2B, supone un coste productivo un 30% menor que el escenario 1B. Por esto, aunque la instalación de electricidad renovable en el proceso productivo del acero mediante EAF empleando 100% chatarra suponga un gasto de capital en la infraestructura necesaria, ésta compensa en términos económicos y ambientales.

---

**14.** Según IRENA (2022), este coste es de 8.76\$/kw, es decir, 779,64€/kw. Considerando un factor de capacidad medio para instalaciones fotovoltaicas del 20% y 8.760 horas de funcionamiento al año, así como la conversión a €/MWh, se obtiene el coste de 445€/MWh. Con una vida útil de 25 años y una tasa de descuento del 5%, el CAPEX anualizado de la instalación de generación de energía renovable es de 31,57€/MWh/año.

**15.** Según NREL (2023), este coste es de 326\$/kw, es decir, 290€/kw. Considerando un factor de capacidad medio para baterías de almacenamiento de energía del 25%, una duración de descarga de 4 horas y un ciclo anual de descarga de 300 días, así como la conversión a €/MWh, se obtiene el coste de 2.410,78€/MWh. Con una vida útil de 10 años y una tasa de descuento del 5%, el CAPEX anualizado de la batería de almacenamiento es de 29,36€/MWh/año.

### 3.3. Escenario 3: Uso del hidrógeno verde en un EAF-DRI con electricidad renovable

Este escenario presenta un enfoque principal: la sustitución del gas natural por hidrógeno verde en el proceso de reducción directa del hierro (DRI) y la integración de la electricidad renovable; por lo que plantea un paso más, y determinante, a la ruta planteada en el escenario anterior.

El proceso productivo planteado comienza con la producción de hidrógeno mediante electrolisis en un electrolizador, que utiliza electricidad renovable. Este hidrógeno verde se emplea como reductor en el horno de eje para producir DRI. El DRI es el insumo principal que se introduce en el EAF, también alimentado exclusivamente con electricidad renovable, para la producción de acero.

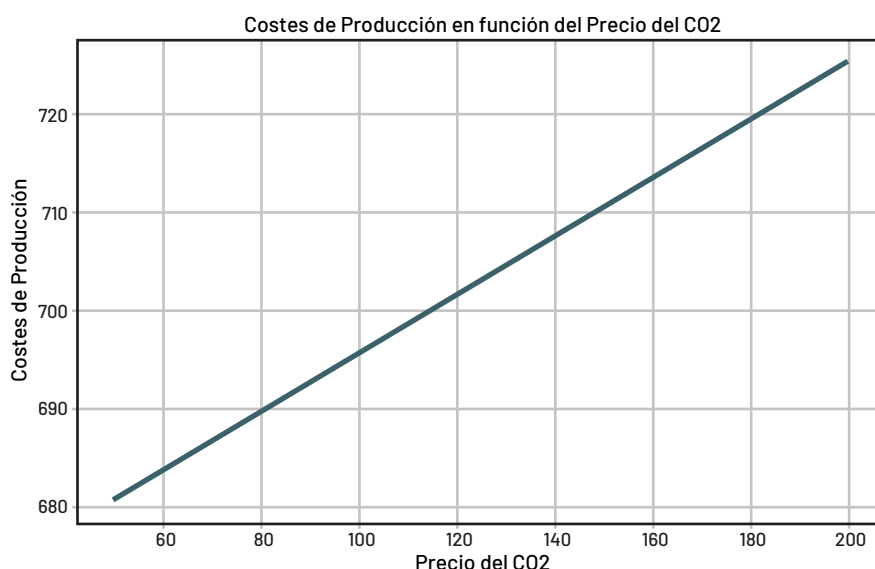
Este enfoque busca maximizar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, y el aprovechamiento de las fuentes de energía limpia disponibles, asegurando una producción más sostenible y eficiente.

Se plantean dos variantes, por un lado, la introducción de un 50% de chatarra para reducir el consumo de DRI (Escenario 3A), y por otro, la decisión de comprar el hidrógeno verde en vez de producirlo internamente en la planta (Escenario 3B). Se analiza la viabilidad económica y ambiental de cada una de estas opciones

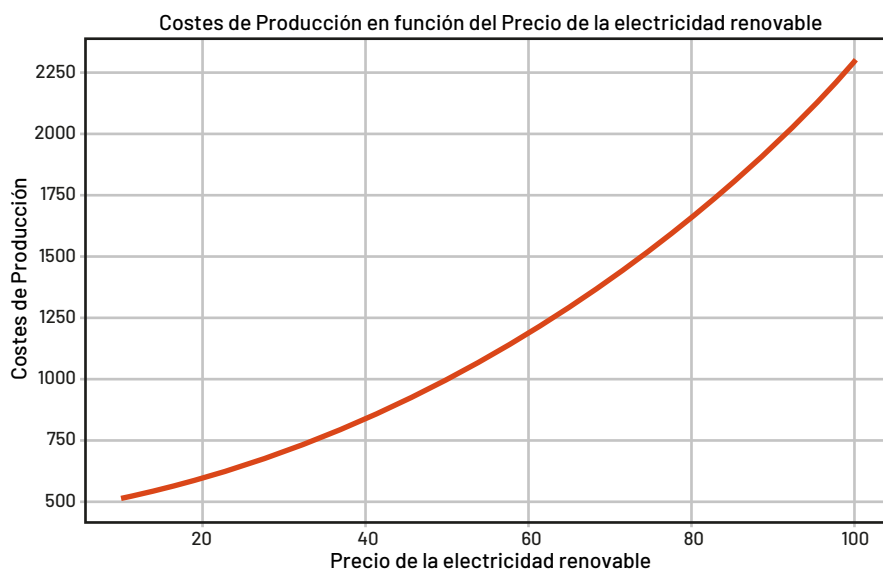
#### 3.3.1. Escenario 3 EAF-DRI-hidrógeno verde

Se ha analizado la evolución del coste de producción de acero haciendo variar el precio del CO<sub>2</sub> entre los 50€/t y los 200€/t considerando un precio de la electricidad renovable de 30€/MWh (Gráfica 11); y desplazando el precio de la electricidad renovable en el intervalo de 10€/MWh - 100€/MWh (Gráfica 12). El análisis ha tenido en cuenta el gasto de capital del electrolizador y de incorporación de la electricidad renovable, así como unos costes variables operativos, junto al correspondiente gasto de capital en EAF y el horno de eje.

**Gráfica 11**



### Gráfica 12



Como se puede observar, la sensibilidad del coste de producción respecto al precio del CO<sub>2</sub> es escasa debido a las escasas emisiones que comporta el proceso planteado (un 80% inferiores a las del escenario 2A, en el que se fabricaba DRI con gas natural). Sin embargo, se pone de manifiesto la elevada sensibilidad de esta opción al precio de la electricidad renovable. Así, para un precio de la electricidad renovable de 30€/MWh el coste de producción es de 704€/t de acero, pero si el precio de esta electricidad ascendiese hasta los 60€/MWh el coste de producción se elevaría hasta los 1.205€/t de acero. Se trata de la opción más sensible al precio de la electricidad, debido a su alto consumo que incluye al electrolizador que produce el hidrógeno verde. En caso de mantenerse un precio de la electricidad renovable en torno a los 30€/MWh, el coste de producción sería más bajo que el del escenario 2A, en el que se empleaba gas natural para producir acero mediante un EAF empleando 100% DRI, a pesar de estar teniendo en cuenta también, para el caso de este escenario 3 el gasto de capital del electrolizador y de la electricidad renovable, así como unos costes variables operativos, además del correspondiente gasto de capital en el horno de arco eléctrico y el horno de eje.

#### Escenario 3A: EAF-DRI con hidrógeno verde comprado y no producido en la planta

La compra de hidrógeno verde en vez de producirlo in situ elimina de los costes de producción la inversión inicial en el electrolizador, reduce el consumo de electricidad y la parte correspondiente a la inversión en instalación de potencia renovable; sin embargo, introduce una nueva variable: el precio en el mercado del hidrógeno verde.

El mercado de este gas se encuentra en desarrollo, lo que hace difícil establecer un precio actual para el mismo, con oscilaciones entre 4€/kg y 10€/kg<sup>16</sup>, sin embargo, “en los resultados de la primera subasta del Banco Europeo del Hidrógeno, el precio medio de producción de los proyectos de España es de 5,8€/kg”<sup>17</sup>. Lo que sí está más claro es que, precisamente todo el proceso de descarbonización y la posición estratégica que busca tener España en el sector podrá reducir ampliamente el precio del hidrógeno a medio y largo plazo, estimándose hasta por debajo de los 2€/kg<sup>18</sup>.

16. HidrógenoVerde (2021). <https://hidrogeno-verde.es/coste-del-hidrogeno-verde>  
PWC (2023). <https://ideas.pwc.es/archivos/20230519/asi-sera-el-mercado-del-hidrogeno-verde/>

EEX (2024). <https://www.eex-transparency.com/hydrogen/germany>

17. ELPAÍS (2024). <https://elpais.com/proyecto-tendencias/2024-07-17/hidrogeno-verde-para-un-transporte-sostenible-por-tierra-mar-y-aire.html>

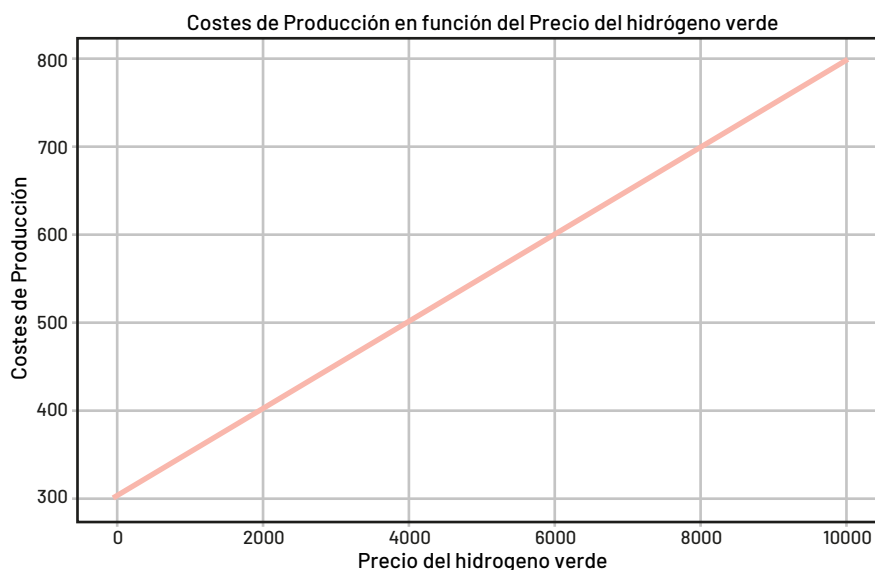
Comisión Europea (2024). [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip\\_24\\_2333](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_24_2333)

18. GREEN HYDROGEN CATAPULT (2024): <https://greenh2catapult.com/>

IEA (2023). Global Hydrogen Review 2023.

La siguiente gráfica muestra la relación entre los costes de producción y el precio del hidrógeno verde, haciéndolo variar desde 0€/t hasta 10.000€/t, es decir, desde 0€/kg hasta 10€/kg.

**Gráfica 13**



Es importante tener en cuenta que una función lineal no describe con la misma fidelidad el impacto de la variable sobre los costes de producción que una función cuadrática, de modo que, si se pudiese emplear en una función de este tipo para el supuesto que nos ocupa, el efecto que mostraría sería mayor.

**Para un precio del hidrógeno verde de 1.800€/t, los costes de producción serían de 392€/t de acero; sin embargo, subir el precio del hidrógeno verde a 5.000€/t implica un aumento en estos costes de hasta 552€/t, y subirlo hasta 8.000€/t implica un aumento de hasta 702€/t.** El impacto del precio del hidrógeno sobre en esta opción es evidente. También se puede observar, una vez más, la gran importancia que tiene la electricidad en este planteamiento, pues al comprar el hidrógeno en lugar de producirlo, se reduce en un 67% el consumo de electricidad, lo que se refleja claramente en los costes productivos.

Al generar hidrógeno verde internamente, la planta tiene un control total sobre el suministro, lo que disminuye la dependencia de proveedores externos y minimiza el riesgo de interrupciones por causas ajenas; además, ofrece una mayor estabilidad de costes a largo plazo, ya que los precios del hidrógeno en el mercado pueden ser volátiles, y el coste de producción puede ser optimizado con el tiempo a medida que se mejora la eficiencia del electrolizador y se reduce el coste de la electricidad renovable. Desde un punto de vista medioambiental, la integración completa de la producción de hidrógeno verde en la planta siderúrgica puede mejorar el perfil de sostenibilidad de la empresa y la inversión en esta tecnología puede otorgar ventajas competitivas en el mercado. Sin embargo, la instalación de electrolizadores y la infraestructura asociada requiere de una inversión de capital significativa, y el incremento del precio de la electricidad renovable puede acarrear elevados costes operativos.

Comprar el hidrógeno verde elimina la necesidad de inversión de capital para producirlo, simplifica la operación de la planta y flexibiliza la operatividad al poder adaptarse rápidamente a cambios en la demanda y ajustar las cantidades de hidrógeno según las necesidades de la producción. Pero también implica una alta dependencia de proveedores externos, algo arriesgado en caso de fluctuaciones del suministro o aumentos en los precios, puesto que el mercado del hidrógeno verde todavía es altamente volátil, no es maduro y no se puede determinar su evolución a largo plazo.



### Escenario 3B: EAF-DRI-HIDRÓGENO VERDE con un 50% chatarra y 50% DRI

La utilización como materia prima de una mezcla de chatarra (0,536 t por t de acero) y H<sub>2</sub>DRI a partes iguales en la producción de acero mediante EAF **permite** reducir:

- Al 50% la carga de pellets de mineral de hierro que producen el DRI (0,738t), así como el hidrógeno verde requerido en dicho proceso (25kg).
- Un 38% la electricidad requerida en el proceso productivo: 2,3 MWh.
- Estos ahorros inciden sobre el coste de producción **reduciéndolo** en un 6%<sup>19</sup> **situándolo en 659€/t de acero.**

Sin embargo, esta alternativa aumenta en un 33% las emisiones de CO<sub>2</sub> (0,4t), pues, aunque se reduce el consumo de electricidad, el uso de chatarra lleva asociado unas emisiones de +0,1t.

En este supuesto se ha considerado un coste de la chatarra de 450€/t, . Si su precio estuviese en 300€/t, el coste productivo sería de 578€/t de acero, un 18% más bajo que mediante la variante con 100% DRI.

La introducción de chatarra tiene un gran impacto en esta opción tan dependiente de la electricidad porque el uso de chatarra reduce, precisamente, la necesidad de electricidad.

### Escenario 3C: EAF-DRI y la transición de utilizar gas natural a hidrógeno verde

El proceso de producción de DRI en el horno de eje utilizando gas natural puede adaptarse para incluir hidrógeno verde. Este reemplazo se puede llevar a cabo hasta en un 30% sin realizar cambios en el proceso, aunque para una sustitución completa se requerirían modificaciones amplias.

La utilización de hidrógeno verde puede eliminar una cantidad significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con la fabricación del DRI: el uso de 100% hidrógeno verde reduce las emisiones a 142,8 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero frente a los 522 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de acero que supone el empleo del gas natural<sup>20</sup>.

El hidrógeno verde puede sustituir al gas natural en una proporción de 3:1 (3 m<sup>3</sup> de hidrógeno verde por 1 m<sup>3</sup> de gas natural). La calidad del hidrógeno y su pureza son factores determinantes para garantizar su eficacia. La etapa de precalentamiento y otros tratamientos previos a los que se tenga que someter el hidrógeno también dependerán tanto de esa calidad, como de la cantidad utilizada.

La transición de gas natural a hidrógeno verde en la producción de DRI es técnicamente factible y ambientalmente beneficiosa. A pesar de los costes iniciales asociados con la modificación de la infraestructura y la producción de hidrógeno verde, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> hace que la inversión sea valiosa a largo plazo. Además, esta transición puede posicionar a la industria siderúrgica a la vanguardia de la sostenibilidad.

<sup>19</sup>. Estimados mediante una función lineal al no disponer de los datos de los costes de producción concretos de esta ruta ni de sus variantes.

<sup>20</sup>. No se está teniendo en cuenta en la cuantía las emisiones que provienen del uso de electricidad: del horno de eje, del horno de arco eléctrico, ni del electrolizador, en su caso.



### 3.3.2. El Escenario 3 (EAF-DRI-HIDRÓGENO VERDE) y cómo afectan al CAPEX los diferentes puntos de partida

El punto de partida desde el que se comienza la transición hacia el uso de hidrógeno verde y electricidad renovable en el proceso de producción del acero influye directamente en el coste de capital necesario para implementar las nuevas tecnologías.

La transición desde los altos hornos (BF-BOF, escenario 1A) hasta la producción en hornos de arco eléctrico con DRI e hidrógeno verde (EAF-DRI-HIDRÓGENO VERDE, escenario 3) es la más extrema y requiere de una transformación de la planta de manera completa, desde un proceso tradicional basado en carbón a un proceso moderno basado en hidrógeno y electricidad renovable. En este caso, el CAPEX debe comprender la instalación del EAF, del horno de eje para la producción de DRI, del electrolizador para la producción de hidrógeno, del sistema de generación de electricidad renovable y de la batería de almacenamiento. En total, el CAPEX requerido para pasar de BF-BOF a EAF-DRI-HIDRÓGENO VERDE es de 61€/t/año más 61€/MWh/año.

Sin embargo, si primero se da un paso desde la ruta BF-BOF (escenario 1A) a la ruta EAF-DRI-GAS NATURAL (escenario 2A), y años después se termina de pasar a la ruta con hidrógeno verde (escenario 3), además de la electricidad renovable, el gasto de capital necesario se reparte en momentos del tiempo diferentes. Además, el desarrollo tecnológico para la primera parte de la transición es mucho mayor que para la segunda, por lo que tendría sentido hacerlo en dos partes, asegurando la inversión y la producción.

Si, por otro lado, se parte desde la ruta EAF en el que se emplea 100% chatarra (EAF-100% CHATARRA, escenario 1B) o desde la misma ruta, pero con electricidad renovable (escenario 2B), el gasto de capital necesario es inferior a los puntos anteriores. Para pasar desde EAF-100% CHATARRA a EAF-DRI-HIDRÓGENO VERDE, se tiene que invertir en el horno de eje para la producción de DRI y en el electrolizador, así como en el sistema de generación de electricidad renovable, esto es, 43€/t/año más 61€/MWh/año; mientras que, si se parte del escenario 2B en el que la electricidad renovable ya forma parte del proceso productivo, sería necesaria la primera parte de la inversión: 43€/t/año.

En base a esto, el punto de partida es crucial para determinar el CAPEX necesario para llegar a la producción de acero en un EAF con DRI a base de hidrógeno verde y utilizando electricidad renovable. Los costes de capital varían significativamente dependiendo de la infraestructura existente y la tecnología utilizada, la elección de cuándo y cómo hacer la transición es determinante no solo desde un punto de vista técnico y medioambiental, sino también económico. Adoptar una estrategia escalonada puede permitir a las empresas gestionar mejor los riesgos y los costes asociados con la implementación de nuevas tecnologías, facilitando la adaptación del personal y la optimización de los procesos y, minimizando la disrupción operativa. Esta aproximación no es solo financieramente prudente, sino que también promueve una transición más sostenible y manejable hacia la producción de acero con bajo impacto ambiental.

### Costes de producción de la tonelada de acero para los distintos escenarios

Precio de la electricidad constante a 80€/MVH y de 130€/t para el CO<sub>2</sub> si no se especifica otro valor.

Escenarios	Nombre del escenario	Otras variables	Costes de producción de la tonelada de acero
<b>Escenario 1</b>	1A BF-BOF		<b>573€/t</b>
	1B EAF 100% CHATARRA	a) Coste de la chatarra a 450€/t	<b>665€/t</b>
<b>Escenario 2</b>	EAF-DRI-GAS NATURAL (100% DRI PRODUCIDO EN PLANTA)	a) Requiere la utilización de gas como agente reductor en lugar de coque b) Plataforma flexible adaptable a futuras mejoras tecnológicas c) 100% DRI producido en planta	<b>821€/t</b>
	2A 2A1. 50% DRI y 50% CHATARRA		<b>643€/t</b>
	2A2. 100% DRI COMPRADO	a) Precio DRI a 2030 a 250€/t	<b>537€/t</b>
	2A3. 50% DRI COMPRADO y 50% CHATARRA	a) Precio DRI a 2030 a 250€/t b) Precio de la chatarra a 450€/t	<b>614€/t</b>
	2B EAF CON 100% CHATARRA Y CON ENERGIA RENOVABLE	a) Precio electricidad renovable 30€/MWh b) Precio de la chatarra a 450€/t	<b>461€/t</b>
<b>Escenario 3</b>		a) Precio de la electricidad renovable a 30€/MWh b) con reducción precio Chatarra a 300€/t	<b>355€/t</b>
	3A EAF-DRI, CON HIDROGENO VERDE (100% PRODUCCIÓN) Y ENERGÍA RENOVABLE	a) Precio del hidrogeno verde 1.800€/t	<b>392€/t</b>
		a) Precio del hidrogeno verde 5.000€/t	<b>552€/t</b>
		a) Precio del hidrogeno verde 8.000€/t	<b>702€/t</b>
	3B EAF-50%DRI Y 50% CHATARRA - CON HIDROGENO VERDE Y ENERGIA RENOVABLE	a) Coste de la chatarra a 450€/t	<b>659€/t</b>

## 4. Análisis de la posible evolución del empleo en el sector siderúrgico en España a partir de los escenarios planteados

Uno de los aspectos más críticos en la transformación de la industria siderúrgica española hacia la descarbonización es su impacto en el empleo. El éxito en la transición hacia un modelo más sostenible dependerá en gran medida de la capacidad de la industria y de las políticas públicas para gestionar esta transformación de manera justa y equitativa, asegurando que las personas trabajadoras sean apoyadas y que se creen oportunidades de empleo en los sectores emergentes, al tiempo que se mantienen en el propio sector.

En este contexto, a partir de los tres escenarios planteados en el apartado anterior es posible identificar diferentes implicaciones para el empleo, en función del rumbo que tomen las decisiones políticas y empresariales.

**En el primer escenario**, la continuidad de las tecnologías actuales ofrece una estabilidad a corto plazo, pero supone riesgos significativos de competitividad y sostenibilidad a largo plazo, que afectan al empleo. El mantenimiento de las tecnologías tradicionales garantiza la seguridad laboral a corto plazo, evitando cambios radicales en los procesos productivos, pero supone un riesgo importante. Las tecnologías contaminantes se volverán cada vez más costosas debido al aumento de los precios del CO<sub>2</sub> y de la electricidad no renovable, reduciendo la competitividad frente a alternativas más sostenibles. Las empresas que continúen utilizando altos hornos podrían volverse menos competitivas, afectando a la demanda y, en consecuencia, al volumen de empleo. Sin modernización y sustitución de las plantas de producción, estas compañías enfrentarán dificultades para adaptarse a nuevas normativas ambientales, lo que en último término podría llevar al cierre de plantas y con ello, a una pérdida total de los puestos de trabajo.

Además, este escenario puede llevar, y de hecho ya lo está haciendo, a acentuar el fenómeno de deslocalización de la producción hacia países fuera de Europa, donde las regulaciones ambientales son más laxas. La deslocalización ha sido un concepto teórico ampliamente estudiado en la historia de la industria y los recientes movimientos de inversión de los grandes grupos siderúrgicos muestran que se trata de una práctica en plena vigencia. Este desplazamiento de la producción es un riesgo real, y uno de los efectos más dañinos de no implementar una estrategia de descarbonización. La deslocalización no solo implica la pérdida de empleos locales, sino también la pérdida de conocimiento técnico y capacidades productivas que, una vez trasladadas a otros países, es difícil recuperar. Puede parecer una opción racional desde el punto de vista económico para las empresas que buscan maximizar beneficios, pero sus efectos en las economías locales y nacionales son devastadores, sobre todo en términos de empleo. Además, plantea dilemas para los gobiernos, que deben equilibrar las políticas de atracción de inversiones con la necesidad de proteger el empleo nacional y cumplir con los objetivos climáticos. En el caso de no desarrollar estrategias claras y efectivas de descarbonización, España podría verse más vulnerable ante este fenómeno, lo que provocaría no solo una pérdida de puestos de trabajo, sino también una disminución de la capacidad industrial nacional, afectando a largo plazo a la competitividad del país.

**El segundo escenario** propone una transición intermedia en el sector siderúrgico, donde uno de los cambios más significativos es el paso de la ruta BF-BOF a la ruta EAF. Este cambio conlleva una considerable pérdida de empleo, principalmente por la menor capacidad productiva de la vía EAF. La ruta BF-BOF, opera a mayor escala, y su proceso es más complejo (incluye etapas como la coquización y la sinterización) por lo que demanda más mano de obra. El reemplazo por la ruta EAF simplifica la producción, pero reduce drásticamente la necesidad de trabajadores en fábrica. La eliminación de procesos completos y la reducción de la cantidad de materias primas necesarias (como el carbón), supone la pérdida de una parte de la fuerza laboral asociada a estas actividades. El cambio de ruta siderúrgica es uno de los mayores desafíos laborales dentro de la descarbonización de esta industria. Los empleados que anteriormente operaban los altos hornos deberán adquirir nuevas competencias para poder manejar los hornos de arco eléctrico, que requieren habilidades distintas, particularmente en lo que respecta a la operación y mantenimiento de tecnologías más avanzadas. Esta formación o reciclaje profesional



será fundamental para garantizar la continuidad laboral de una parte de la fuerza de trabajo, aunque no todos los empleados podrán beneficiarse de ella. La adquisición de nuevas competencias y habilidades supone un desafío que habrá que abordar desde los distintos ámbitos de actuación. Aquellos trabajadores que logren adaptarse a las nuevas tecnologías deberán familiarizarse con procesos más automatizados y con mayor dependencia de la electricidad renovable.

Las pirámides de edades de las plantillas juegan un papel crucial para entender las implicaciones y la viabilidad de este reentrenamiento.

En el caso de la única planta de siderurgia integral existente en España, propiedad de Arcelor Mittal, la pirámide de edad de los trabajadores concentra casi el 75% de la plantilla en los rangos de 35 a 54 años. A esas edades muchos trabajadores ya han desarrollado competencias específicas y una especialización considerable en las tareas propias de los altos hornos. En los escenarios donde se sustituirán los altos hornos por EAF, estos trabajadores serán los más afectados, ya que se verán forzados a adaptarse a nuevas tecnologías y sistemas de producción. Sin embargo, debido a su edad y experiencia, podrían ser los más adecuados para beneficiarse de programas de reciclaje profesional que les permitan adaptarse a las nuevas exigencias del sector. Esta adaptación dependerá de la calidad y la eficacia de los programas de formación que se implementen, así como de la disposición de los trabajadores a aprender nuevas habilidades en esta etapa de sus vidas. El rango de más de 55 años representa el 16% de la plantilla aproximadamente. En este grupo etario las personas se encuentran en una etapa avanzada de sus carreras, lo que plantea un reto considerable en términos de formación y adquisición de nuevas capacidades. La proximidad a la jubilación podría desincentivar a muchos de estos empleados a adaptarse a las nuevas tecnologías, especialmente si esto implica aprender competencias completamente nuevas o asumir riesgos adicionales asociados a los nuevos procesos. Para estas personas, la opción más viable podría ser una combinación de programas de prejubilación y de formación adaptados que les permitan mantenerse en el sector sin tener que asumir una reconversión completa. En la práctica, es probable que muchos de ellos opten por la prejubilación si se ofrecen los incentivos adecuados. Finalmente, los empleados más jóvenes representan el menor porcentaje de la plantilla. Cuentan con la ventaja de estar en una etapa temprana de sus carreras, lo que los hace más flexibles y abiertos al aprendizaje de nuevas tecnologías y procesos y, por lo tanto, de ser los más susceptibles de beneficiarse de los programas de reentrenamiento en el caso de los escenarios de transición intermedia o avanzada.

Más allá de la plantilla vinculada a los altos hornos, un análisis más genérico en base a los datos de empleo a los que se ha podido acceder, en el sector de la siderúrgica en España el empleo se concentra en el rango de edad que va de los 35 a los 54 años, por lo que en líneas generales el análisis es el mismo que el presentado en el párrafo anterior para el caso concreto de ArcelorMittal.

Por lo tanto en los escenarios que impliquen cambios significativos, este grupo se verá afectado directamente al ser el segmento más numeroso y con una trayectoria profesional consolidada, y la necesidad de capacitación en nuevas habilidades y competencias será fundamental para que puedan adaptarse a las nuevas exigencias; sin embargo, este reciclaje profesional debe ser efectivo y práctico, ya que estos empleados, aunque en edad de seguir formándose, podrían enfrentarse a barreras significativas si las nuevas habilidades requeridas son demasiado diferentes o si la capacitación no está bien estructurada; esto es, el éxito de las políticas de transición justa será crucial para integrar a este grupo en las nuevas dinámicas laborales del sector siderúrgico. Las personas trabajadoras por encima de los 55 años representan también en torno al 16% de las plantillas, y son la parte más vulnerable ante procesos de descarbonización, ya que tienen menos incentivos para adaptarse a tecnologías nuevas y altamente especializadas, debido a la proximidad a su jubilación, por lo que se debe buscar herramientas para mitigar los efectos negativos en este grupo de edad, que podría no estar dispuesto o capacitado para reconvertirse completamente en nuevas tecnologías. Finalmente, los trabajadores por debajo de los 35 años, aunque minoritarios, son los que tienen una mayor oportunidad de formarse en las nuevas tecnologías desde una perspectiva temprana, lo que les permitirá crecer profesionalmente en un sector siderúrgico renovado y enfocado en la sostenibilidad.

El éxito para el mantenimiento del empleo en el proceso de descarbonización del sector dependerá, en gran medida, de la capacidad para implementar programas efectivos de reciclaje y adaptación profesional que permitan la recualificación de la mayor parte de la fuerza laboral, especialmente de aquellos en rangos de edad intermedios, quienes, por su experiencia y horizonte de vida laboral, se encuentran en una posición clave para beneficiarse de estas iniciativas. Para los trabajadores más cercanos a la jubilación, será necesario desarrollar políticas específicas que incluyan opciones de prejubilación o formación adaptada.

Además de la pérdida de empleo y la necesidad de formación en nuevas habilidades y competencias, este escenario también introduce la creación de nuevos empleos en sectores emergentes. La adopción de tecnologías como la reducción directa de hierro y el uso de electricidad renovable generarán puestos de trabajo en áreas como la gestión de infraestructuras energéticas y la operación de nuevas tecnologías de producción. También se espera que el aumento de la demanda de electricidad renovable para alimentar los procesos siderúrgicos estimule la creación de empleos en el sector de las energías renovables, particularmente en la construcción y operación de plantas solares, eólicas y de almacenamiento energético. No obstante, es crucial subrayar que estas oportunidades no reemplazarán de manera directa a los empleos perdidos en las fábricas siderúrgicas. Los nuevos puestos de trabajo, a menudo en áreas administrativas o técnicas, requieren competencias diferentes a las de los trabajadores desplazados por la desaparición de los altos hornos. Por tanto, el impacto sobre el empleo debe considerarse en su totalidad: la creación de nuevos empleos no compensa automáticamente la pérdida de puestos en el sector siderúrgico, y muchos de los trabajadores que pierden su empleo no podrán trasladarse directamente a estas nuevas oportunidades laborales.



**El tercer escenario**, el más ambicioso y transformador, ofrece oportunidades significativas en nuevos sectores verdes, pero requiere una inversión masiva en tecnología y capacitación de los trabajadores en activos en el sector y de las generaciones que se incorporan al mercado laboral. El uso de hidrógeno verde y electricidad renovable implicaría una transformación profunda en la industria, generando empleos en sectores como la producción y gestión del hidrógeno verde, así como en la instalación, mantenimiento y gestión de infraestructuras de energía renovable. Además, la implementación de estas tecnologías avanzadas crearía empleos en investigación y desarrollo, ingeniería avanzada y optimización de procesos productivos para mejorar la eficiencia y reducir costos.

Los trabajadores actuales necesitarán adquirir nuevas habilidades técnicas relacionadas con la gestión de energía, la producción de hidrógeno y la operación de plantas de DRI con hidrógeno verde. La producción de hidrógeno verde crearía nuevas oportunidades en la cadena de suministro, generando empleos en áreas como la construcción de infraestructuras de hidrógeno, el transporte, almacenamiento y la manufactura de componentes de electrolizadores. Las regiones con un fuerte enfoque en energías renovables o proyectos de hidrógeno verde en desarrollo podrían experimentar un aumento significativo en el empleo, mientras que las regiones dependientes de tecnologías convencionales podrían enfrentar desafíos económicos si no logran adaptarse rápidamente.

Ante esto, debe considerarse que el proceso de descarbonización no puede analizarse únicamente en términos netos de empleo. Si bien la sustitución del gas natural por hidrógeno verde no supone una eliminación de procesos productivos como tal, sí implica una reorganización de la mano de obra existente. Esta transición requiere una inversión considerable en la capacitación de los trabajadores, ya que el manejo y la producción de hidrógeno, así como la adaptación de los sistemas de producción a este nuevo combustible, introducen nuevos desafíos técnicos y de seguridad. Los trabajadores deberán adquirir conocimientos sobre la gestión de energía renovable y sobre los sistemas de producción de hidrógeno, lo que representa un cambio profundo en las competencias necesarias en las plantas productivas.

Como se verá posteriormente, la automatización y digitalización asociadas a la introducción del hidrógeno verde y las tecnologías de EAF-DRI implican un cambio en la naturaleza del trabajo en las fábricas. Estos nuevos sistemas requieren menos mano de obra directa y más técnicos especializados en supervisión y mantenimiento de sistemas automatizados. Este cambio estructural, aunque puede ser positivo en términos de eficiencia y sostenibilidad, y en términos cuantitativos netos, deja a muchos trabajadores en una posición vulnerable, ya que aquellos que no logren adquirir las nuevas habilidades necesarias podrían quedar desplazados en el proceso.

Es crucial destacar que las personas que pierdan sus empleos no serán las mismas que se benefician de los nuevos puestos. Las habilidades requeridas para estos nuevos empleos suelen ser técnicas y altamente especializadas, lo que plantea una barrera considerable para los trabajadores que han dedicado su carrera a procesos industriales convencionales. Esta desconexión entre los empleos que se pierden y los que se crean implica que, aunque haya un aumento neto en el número de empleos, el impacto real en las personas existe, lo que evidencia la necesidad de políticas de reciclaje profesional y de formación en nuevas habilidades y competencias que sea efectivo y, paralelamente, apoyo estructural para los trabajadores que podrían quedar rezagados en el proceso de transformación hacia una industria más limpia y digitalizada.

**La conclusión de estos tres escenarios** planteados pasa por comprender que la transición hacia una siderurgia más sostenible y descarbonizada tiene implicaciones diversas sobre el empleo en el sector, dependiendo de las tecnologías adoptadas.

El paso de los altos hornos a los hornos de arco eléctrico representa un cambio que conlleva inevitablemente una reducción del empleo: en primer lugar, por la menor capacidad productiva de los EAF en comparación con los altos hornos y, en segundo lugar, por la eliminación de procesos intermedios como la coquización y la sinterización, lo que disminuye la necesidad de mano de obra.

En cuanto a los hornos de arco eléctrico que ya están operativos, los cambios necesarios para reducir emisiones, como la sustitución del gas natural por hidrógeno o biometano y la electrificación de los procesos, no implican una eliminación de empleos al no alterarse la estructura básica de los procesos productivos. Sin embargo, sí requieren una actualización en las competencias de los trabajadores como, por ejemplo, el manejo de nuevas tipologías de gases.

Lo que sí ocurre en muchos casos es que estas mejoras tecnológicas se aprovechan para implementar cambios más amplios en la digitalización y automatización de los procesos productivos. La transición hacia un modelo de producción más eficiente y automatizado implica que los trabajadores deberán adaptarse a nuevas formas de operar, con herramientas digitales más avanzadas y un mayor grado de automatización en la supervisión y control de los sistemas de producción. Este cambio en la manera de trabajar requiere de acciones formativas específicas para que los empleados puedan adaptarse a la nueva realidad productiva que, si bien no elimina sus funciones, sí transforma la forma en que interactúan con las máquinas y los procesos. La digitalización no solo mejora la eficiencia, sino que también introduce nuevas dinámicas laborales que los trabajadores deberán aprender a dominar.

Además, la incorporación de estrategias de descarbonización y medidas medioambientales no solo afecta a las plantas de producción, sino también a la estructura organizativa de las empresas. Uno de los impactos más evidentes es la creación de nuevos puestos de trabajo en áreas administrativas y de gestión, especialmente vinculados a la sostenibilidad y al cumplimiento de normativas medioambientales. Estas áreas, centradas en la planificación estratégica, la monitorización de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la gestión de la transición hacia fuentes de energía renovable, generan nuevas oportunidades laborales, aunque principalmente en oficinas y departamentos de gestión. Estos nuevos puestos de trabajo contrastan con lo que ocurre en las fábricas, donde la clave está en la formación y actualización de los trabajadores en lugar de en la creación de nuevos empleos.

Por otro lado, puede darse la desaparición de parte del proceso productivo en función de las decisiones que se tomen en cada planta o grupo siderúrgico en relación con la gestión de las materias primas (como el DRI o el hidrógeno verde, e incluso las energías renovables). En lugar de producirlas o generarlas internamente, estas podrían adquirirse a terceros, lo que implicaría la pérdida de la gestión de estas etapas en la cadena de valor. Si bien esto podría aumentar el empleo en otros sectores emergentes, como el de las energías renovables o la logística de materias primas, el análisis de impacto debe centrarse en el sector siderúrgico en sí, donde estas decisiones podrían reducir significativamente el número de empleos ligados a la producción directa de materias primas y otros procesos industriales.

Uno de los aspectos fundamentales de este análisis es comprender que no se puede evaluar el impacto del proceso de descarbonización exclusivamente en términos de empleo neto. Aunque en cifras globales el empleo podría aumentar debido a la creación de nuevos puestos en sectores emergentes este enfoque no refleja la realidad de las personas que perderán sus trabajos en los procesos industriales tradicionales. Resulta crucial no solo enfocarse en la creación de nuevos empleos, sino también en implementar soluciones efectivas para apoyar a aquellos que podrían quedar desplazados por estos cambios.





# PARTE 3.

## IMPACTOS SOBRE EL EMPLEO

### 5. Impactos sobre los perfiles profesionales del sector de la siderurgia

Se planteaba en el apartado anterior que el empleo en la siderurgia se vería afectado, tanto en términos cuantitativos como cualitativos, en función de los escenarios elegidos para la transición a la descarbonización del sector. En particular, será así en relación con las necesidades de cualificación y formación de los trabajadores para adquirir las competencias necesarias para poder implantar tecnologías más limpias y adaptarse a las necesidades de digitalización y automatización de la industria. Es muy probable que determinados perfiles o familias profesionales que actualmente existen en este sector desaparezcan porque ya no sean necesarios en el futuro escenario tecnológico. Este riesgo es evidente en el sector de la siderurgia integral, donde la transformación del modelo productivo va a ser más profunda.

A continuación, se profundiza en los posibles impactos de este proceso sobre los diferentes perfiles profesionales del sector, concretando aquellos que se pueden ver más afectados, así como los nuevos perfiles demandados por las nuevas necesidades del sector.

Antes de ello, cabe mencionar algunos rasgos asociados al empleo en el sector que pueden incidir, en cierta medida, en este proceso de adaptación:

- En primer lugar, parece existir en la industria siderúrgica un problema generalizado con el traspaso generacional de conocimiento. Como en muchos otros campos, este traspaso en el seno de las empresas entre personas con amplia experiencia y de mayor edad a personas jóvenes es fundamental para reforzar y apuntalar el proceso formativo de estos últimos. Tal y como se desprende de la opinión de varios informantes clave, esta transferencia se está perdiendo por la marcha del personal más experimentado que está siendo sustituido por personal joven que aún no habría completado su necesaria preparación previa y tutelado por aquellos que tienen un profundo conocimiento de los procesos. Esta situación deriva en ocasiones por la propia competencia entre empresas para retener o contratar a determinadas personas con amplia experiencia en el puesto ante la ausencia de perfiles con los que cubrir tales necesidades.
- Asimismo, y como sucede también en otros ámbitos de la actividad industrial y productiva, hay cierto desinterés entre la juventud hacia el sector, que parece ser visto como poco atractivo ante los cambios en sus preferencias laborales (más flexibilidad, habilidades digitales, menos intensivo). Este hecho también ha sido puesto de manifiesto por informantes clave vinculados al área de la formación profesional, señalando que hay dificultades para encontrar alumnado interesado en campos relacionados con la siderurgia, lo que implica en ocasiones que no se puedan cubrir los cupos de determinados ciclos formativos. Este hecho dificulta al ámbito educativo el abordar y oficializar algunas de las necesidades formativas actuales y previstas dentro de la industria siderúrgica.
- También es importante subrayar que, a pesar de los esfuerzos para incrementar la presencia de la mujer en el sector, actualmente ésta sigue siendo mínima. En opinión de fuentes sindicales implicadas en la aplicación de políticas y planes de igualdad en la industria siderúrgica, de momento no se están consiguiendo grandes avances en este sentido. Hablamos, por tanto, de un sector en el que el 90-95% del empleo es desempeñado por hombres, con una infrarrepresentación femenina y con una cierta segregación ocupacional en función del sexo.



## 5.1. Nuevos perfiles demandados por el sector siderúrgico

Los nuevos perfiles profesionales demandados por la industria siderúrgica se enmarcan, por un lado, en las necesidades de la llamada Industria 4.0, la cual está caracterizada, entre otros elementos, por la digitalización de los procesos, el intercambio de información a tiempo real y la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA); por otro lado, estos nuevos perfiles están asociados a la descarbonización de las etapas del proceso productivo

En el marco de la digitalización, cabe en primer lugar señalar los perfiles profesionales asociados al Big data y al análisis de datos, con habilidades para programar y aplicar sistemas inteligentes que optimizan la gestión de la información y la explotación de datos masivos, garantizando el acceso a los datos de forma segura. Algunos de los perfiles solicitados en este campo corresponden a analistas de datos, expertos en análisis preventivo y predictivos, científicos de datos, y expertos en algoritmos, matemáticas y estadística.

Otro ámbito de nuevos perfiles y empleos será el asociado a la tecnología de procesos, con demandas de operadores de planta, ingenieros de tecnología, operadores de controles de procesos, ingenieros de monitorización y modelización.

La automatización y robótica industrial está ya requiriendo perfiles profesionales capacitados para el desarrollo y gestión de proyectos de montaje y mantenimiento de instalaciones automatizadas de medida, regulación y control de procesos, así como supervisión, ejecución, mantenimiento y puesta en marcha de dichos sistemas.

Asociado al empleo de las TIC y a la creciente necesidad en temas de programación, ciberseguridad y seguridad digital, se pueden señalar algunas áreas de capacitación y conocimiento objeto de demanda de nuevos perfiles profesionales:

- Diseño en fabricación mecánica.



- Programación y producción en la fabricación: planificar, programar y controlar la fabricación por mecanizado y montaje de bienes de equipo.
- Ciberseguridad en entornos de las tecnologías de operación: definir e implementar estrategias de seguridad en las organizaciones e infraestructuras industriales realizando diagnósticos de ciberseguridad, identificando vulnerabilidades e implementando medidas necesarias.
- Digitalización del mantenimiento industrial, implantar y gestionar proyectos de digitalización del mantenimiento en entornos industriales, aplicando las tecnologías de última generación.

Junto a la digitalización, el otro gran factor impulsor para la recapacitación profesional y los nuevos perfiles profesionales es el relacionado con la descarbonización de la fabricación de acero, que incluye, en primer lugar, la implantación de procesos de producción apoyados en vectores de energía eléctrica e hidrógeno verde.

En este sentido, los perfiles de expertos en tecnologías del hidrógeno renovable y sus aplicaciones o en energías renovables son ya objeto de la formación profesional, universitaria y másteres impartidos para cubrir las necesidades formativas del sector siderúrgico.

Hay otra serie de aspectos derivados de la creciente presión por una mayor sostenibilidad en el sector siderúrgico, no sólo en términos de descarbonización, sino derivados de la exigencia de una mayor eficiencia en el uso de la energía y de los recursos o de la aplicación de políticas de circularidad y divulgación de información, que está generando la demanda de perfiles concretos asociados a la gestión ambiental, las auditorías energéticas, el ecodiseño, la gestión de la logística, la clasificación y gestión de residuos, la comunicación ambiental, la gestión y tratamiento de información ambiental, etc.

Por su parte, la creciente tendencia del sector hacia la diferenciación del producto y nuevas calidades lleva asociada también la necesidad de profesionales con conocimiento sobre fabricación aditiva y productos sintéticos, o requisitos para un mayor control de la composición química del acero.

Igualmente, la logística y el transporte son actividades señaladas como demandantes de empleo para ajustarse a las nuevas necesidades del sector, en cuestiones tales como el acopio de materias primas y subproductos o distribución de la fabricación.

## 5.2. Profesiones siderúrgicas con mayores posibilidades de afectación

La incorporación de la doble transición —ecológica y digital— probablemente afecte al desempeño laboral de todas las personas trabajadoras del sector siderúrgico, si bien lo hará en diferente grado. Existirán ocupaciones en las que esta afectación se limite a la necesidad de ampliar destrezas en el manejo de modificaciones a sus herramientas de trabajo habituales, mientras que en otras los trabajadores necesitarán recibir cualificaciones que les hagan competentes en tecnologías nuevas e incluso que les permitan la adaptación a nuevos perfiles profesionales debido a la desaparición de sus actuales puestos de trabajo.

Los puestos de trabajo sobre los que previsiblemente vaya a tener un mayor impacto esta doble transformación tecnológica serían los que reúnan una o varias de las siguientes características:

1. Los correspondientes a la siderurgia integral, especialmente aquellos más relacionados con los elementos del proceso más específicos de esta vía de producción de acero objeto de descarbonización.
2. Los que requieran de un menor nivel de capacitación, más centrados en tareas manuales y repetitivas y demandantes de esfuerzo físico.
3. Los relacionados con ocupaciones desarrolladas a pie de proceso.



### 5.3. Ocupaciones de la siderurgia integral potencialmente más afectadas

La descarbonización de la siderurgia resulta incompatible con la existencia de este tipo de instalación, de modo que los perfiles profesionales que la operan deberán adaptarse a las necesidades de la tecnología de sustitución.

Las plantas de siderurgia integral son grandes factorías constituidas por diferentes unidades en las que se verifican los procesos necesarios para la fabricación de acero. Para su funcionamiento se apoyan en una serie de instalaciones complementarias sin cuyo concurso no sería posible el correcto desarrollo del proceso siderúrgico<sup>21</sup>.

Las principales instalaciones que conforman el núcleo de una factoría de este tipo son:

- El parque de minerales
- Las plantas de sinterización
- Las baterías de Cok
- Los hornos altos
- La acería
- Los trenes de laminación

Las instalaciones complementarias pueden consistir en embalses, que almacenan y proporcionan agua al conjunto de la factoría, las áreas para el depósito y/o tratamiento de residuos, y el parque de carbones.

La transición de una planta siderúrgica integral a una factoría de arco eléctrico que emplee como principales insumos energéticos y de proceso, la electricidad de origen renovable, el hidrógeno verde y el DRI conducirá a transformar, reducir e incluso suprimir la actividad de algunos de sus componentes y, en consecuencia, los puestos de trabajo correspondientes a las labores que en ellos se desarrollan. Dentro del núcleo de la factoría, las instalaciones probablemente más afectadas serían el parque de minerales, las plantas de sinterización, las baterías de Cok y los Hornos Altos, y en cuanto a instalaciones complementarias, el parque de carbones.

El parque de minerales tiene como funciones recibir, almacenar, homogeneizar y suministrar materias primas (mineral de hierro, fundentes, carbón, etc.) a las distintas partes de la planta. Suelen disponer de una red de cintas transportadoras, tolvas, rotapalas y reclaimers con los que ejecutar estas funciones. Los puestos de trabajo que se sitúan en ellos incluyen maquinistas, rotopalistas, técnicos de preparación, mecánicos y electricistas de mantenimiento, e inspectores de producción y mantenimiento. La descarbonización de la factoría no eliminaría este elemento, pero posiblemente reduciría su carga de trabajo.

Las plantas de sinterización se ocupan de aglomerar los finos minerales para que la carga del horno alto tenga la permeabilidad necesaria. Esto finos consisten en mineral de hierro, recuperaciones (materiales rechazados en otras plantas consecuencia de sus procesos productivos, como polvo de botellón, cascarilla de laminación, barreduras, lodos de depuradora...), fundentes (caliza, olivino, cal viva, dolomía...), combustible (cok o antracita) y agua. Los finos minerales son sometidos a tratamientos térmico y mecánico para obtener el sinter acabado. Las plantas de sinterización están dotadas de tolvas dosificadoras, parrillas, soplantes, hornos, rompedores, enfriadores, cribas y sistemas de depuración de dioxinas y partículas. Estos equipos son manejados por técnicos y operarios de producción y mantenimiento especializados. La desaparición del horno alto implicará la eliminación de la planta de sinter o bien su radical transformación para ser empleada en el pretratamiento de las materias primas que demande la nueva tecnología de producción de acero. Las tareas desempeñadas por sus profesionales especializados podrían encontrar alguna equivalencia en el desarrollo de las primeras etapas de fabricación de acero verde.

21. Arcelor Mittal, Planes de autoprotección de la Planta de Siderurgia Integral de Gijón y Avilés.

Las baterías de Cok son un conjunto de hornos donde se lleva a cabo la destilación a alta temperatura del carbón para la obtención de un combustible exento de compuestos volátiles, el Cok, que alimenta el alto horno. Se acompaña de una planta de subproductos en la que se trata el gas generado en el proceso obteniéndose alquitrán, azufre líquido, y gas de cok que puede reincorporarse al horno. Se trata de una instalación compleja con numerosos elementos que incluyen hornos, torres de apagado, molinos, cribas, sistemas de lavado y depuración, y redes de agua y de diferentes tipos de gases. El personal que se ocupa de su manejo y mantenimiento está formado por maestros de operaciones y operarios de baterías, subproductos y calentamiento, maestros panelistas, mecánicos, electricistas, electromecánicos, y técnicos y operarios de sistemas de depuración. De todas estas ocupaciones, las más específicas del proceso de coquificación desaparecerán con la implementación de tecnologías descarbonizadas.

Los hornos altos forman parte de las instalaciones de cabecera o primeras etapas de la obtención del acero. En ellos se lleva a cabo la reducción y fusión del mineral de hierro para obtener un material intermedio, el arrabio, que suele ser conducido aún en caliente, mediante vagones torpedo, hasta las acerías, en las que se somete a tratamientos de desulfuración y ajuste de contenidos en carbono para la obtención de diferentes productos de acero (chapa, alambrón, carril, hojalata...). Su funcionamiento necesita de una serie de elementos auxiliares como son tolvas, estufas de calentamiento de aire, molinos de carbón, plantas de inyección de carbón, sistemas de limpieza del gas generado en el alto horno (torre Bischoff, Botlellón), circuitos y bombas de refrigeración, sistema de inyección de gas de Cok, sistemas de depuración y redes de distribución de diferentes tipos de gases (oxígeno, gas natural, hidrógeno, aire, propano...) y líquidos (agua, gasoil para motores de equipos auxiliares...). Para que el proceso funcione se requiere de técnicos especializados con diferentes niveles de responsabilidad, operarios de producción, técnicos y operarios de mantenimiento mecánico y eléctrico, y técnicos y operarios de sistemas de depuración. La sustitución del horno alto por el horno de arco eléctrico supondrá la supresión de los perfiles más especializados y con menor capacidad de adaptación o encaje a la nueva realidad tecnológica.

Los parques de carbones tienen como función abastecer de carbón a las plantas de siderurgia integral. En ellos se lleva a cabo la recepción y el almacenamiento del carbón desde sus lugares de origen, su dosificación y molienda, la mezcla y homogenización, y el envío a planta. Estas labores se llevan a cabo mediante rotapalas, cintas transportadoras, estaciones de dosificación, molinos, apiladoras, lechos de homogenización, reclaimers e instalaciones ferroviarias. Los trabajadores que ejecutan y controlan el proceso son técnicos y operarios de producción, y personal de mantenimiento, mecánicos y electricistas. Es posible que estas profesiones, cuyo ejercicio, aunque ligado al carbón, no está condicionado por éste en cuanto a destrezas y conocimientos técnicos, puedan obtener correspondencia en las etapas de recepción y pretratamiento de materias primas del proceso de fabricación de acero verde.

#### 5.4. Ocupaciones con menos nivel de cualificación

Los profesionales que prestan sus servicios en las empresas siderúrgicas se encuentran clasificados, conforme señalan los convenios colectivos del sector, en divisiones funcionales y grupos profesionales. Los criterios de clasificación se basan en la consideración conjunta de diferentes elementos interrelacionados como son el tipo de tareas a desempeñar dentro de la organización, las responsabilidades que conllevan, el nivel de cualificación requerido y la experiencia. Funcionalmente se establecen tres divisiones:

- Técnicos, personal con alto grado de cualificación y/o experiencia que desempeñan tareas de elevada cualificación y complejidad.
- Empleados, trabajadores cuya formación les habilita en la realización de tareas administrativas, comerciales, organizativas, de informática, de laboratorio y, en general, de oficina, y que posibilitan la gestión socioeconómica y de producción de la empresa.
- Operarios, personal cuyos conocimientos les permite realizar operaciones relacionadas con la producción, directamente interviniendo en el proceso productivo, o indirectamente en tareas complementarias y auxiliares como el mantenimiento o el transporte.

El convenio colectivo estatal contempla siete grupos profesionales, de mayor a menor nivel de independencia, responsabilidad y cualificación.

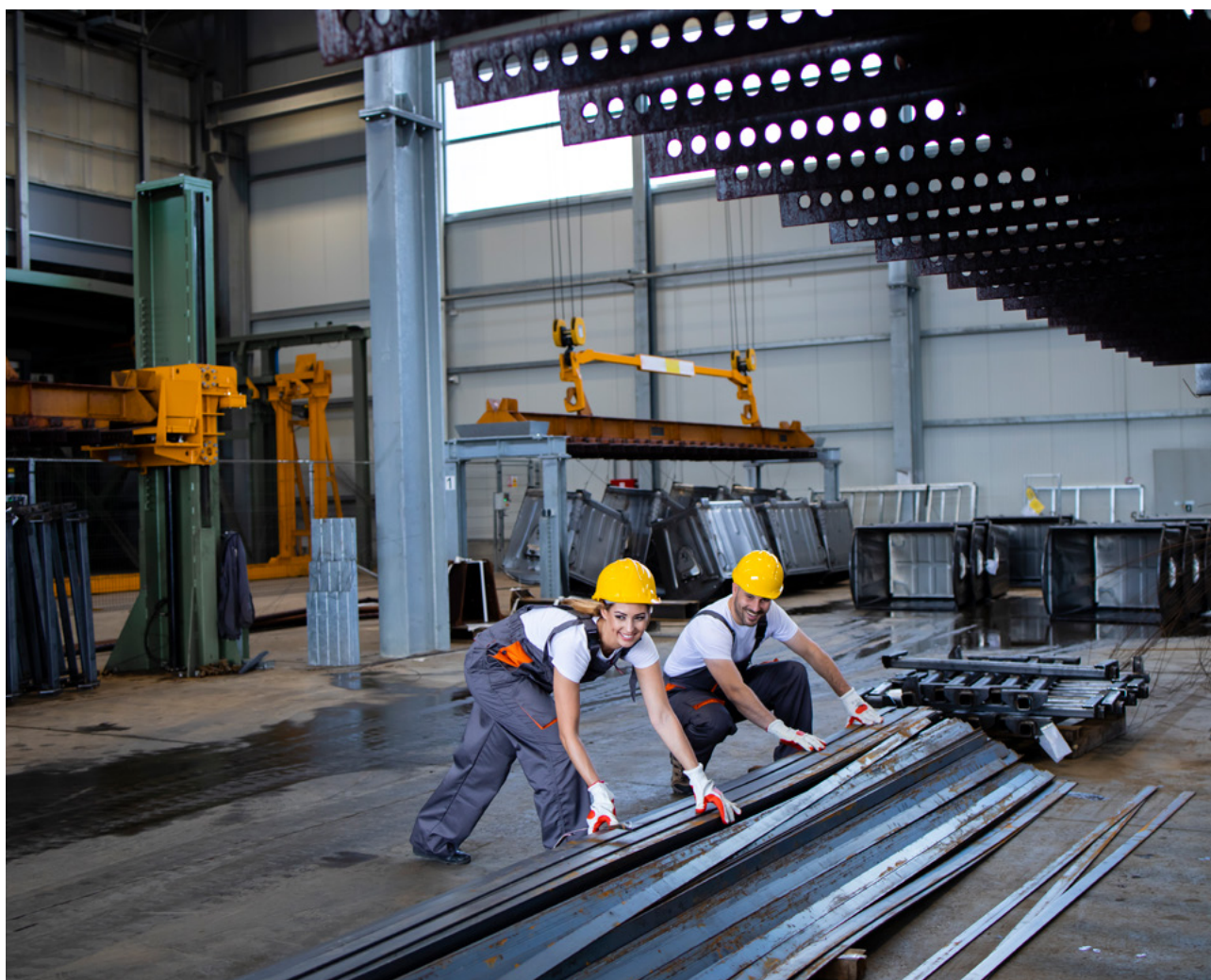
De ellos, los grupos que requieren una menor formación son:

- **Grupo profesional 6:** formación equivalente a Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO) y conocimientos obtenidos durante el ejercicio de su profesión.
- **Grupo profesional 7:** ESO o certificado de escolaridad o equivalente.

Ambos están compuestos, desde el punto de vista funcional, exclusivamente por empleados y personal de operaciones. Estas colocaciones serían las potencialmente más afectadas por la implementación de los cambios tecnológicos, tanto digitales como de sustitución del proceso de descarbonización en la fabricación del acero, debido a que sus tareas habituales podrían ser cubiertas, en muchas ocasiones, mediante nuevas tecnologías.

### 5.5. Ocupaciones desarrolladas a pie de proceso

Los perfiles profesionales en los que la mayor parte o la totalidad de las tareas que componen su desempeño tienen lugar a pie de máquina muy posiblemente se vean sustituidos por robots y automatismos que permitan una ejecución de tareas más eficiente bajo condiciones ambientales de riesgo propias del proceso siderúrgico, con independencia del nivel de formación del operario. Entre estas ocupaciones se encontrarían, por ejemplo, los puestos de inspección y control de materiales in situ que pueden ser sustituidos mediante cámaras y sensores.



## 6. Impactos sobre el empleo en la cadena de valor

De las muchas actividades que son necesarias para llevar a cabo la producción y la comercialización del acero, hay tres que destacan por su importancia para el tránsito hacia una industria siderúrgica descarbonizada, y en las que esa transición podría influir sobre la cantidad y tipología de su empleo. Se trata de: la recuperación y aprovechamiento de la chatarra férrica, la producción de Hidrógeno Verde y la fabricación de DRI con Hidrógeno Verde.

### 6.1. La chatarra férrica

La recuperación de chatarra de hierro y acero ha experimentado en las últimas décadas una importante transformación, evolucionando de una actividad de carácter comercial protagonizada, sobre todo, por pequeños recuperadores, limitada a la recogida y la somera clasificación de materiales, a otra más industrializada y tecnificada que ha permitido incrementar la eficiencia y la eficacia en la separación y categorización de los residuos.

Dentro de esta área de actividad confluyen profesiones todavía hoy necesarias, como sopletistas, soldadores y expertos en oxicorte, con perfiles más tecnológicos orientados hacia la automatización y digitalización de los procesos, y con especialistas en la aplicación y seguimiento de una normativa ambiental de complejidad creciente. La actualización tecnológica se está viendo acompañada de una redefinición del negocio, que se enfoca a prestar un servicio integral de recogida y gestión del residuo orientado a grandes clientes, aunque ello suponga la subcontratación de aquellos flujos de residuos que quedan fuera del núcleo principal de interés de las compañías de recuperación de metales, incrementando con ello las actividades empresariales dedicadas a logística y gestión.

Según fuentes del sector, las plantas en las que se verifican las operaciones de recuperación de metales cuentan con un alto grado de madurez tecnológica, lo que les confiere una gran eficiencia, siendo capaces de procesar volúmenes de chatarra superiores a los que actualmente gestionan. Desde la perspectiva del volumen de mano de obra necesario para operar estas instalaciones, un hipotético aumento en el flujo de chatarra férrica no se traduciría en un incremento proporcional de la cantidad de personal empleado. Además, la creciente automatización de los procesos y unas políticas ambientales cada vez más ambiciosas, posiblemente conduzcan a que las nuevas contrataciones que pudieran producirse se vinculasen a perfiles profesionales ligados a nuevas competencias tecnológicas, digitales y de gestión medioambiental.

En conclusión, no es esperable que, en el corto o medio plazo, el sector de la recuperación y clasificación de metales férricos pueda experimentar un crecimiento cuantitativo ni en términos de producción ni de nuevos puestos de trabajo. Sus parámetros de sostenibilidad económica se encontrarían bastante ajustados dentro de unos márgenes estrechos, dependientes de la disponibilidad del residuo metálico bruto dentro del país y de las fluctuaciones del precio de la chatarra en el mercado internacional.

### 6.2. Producción de hidrógeno verde

La fabricación de hidrógeno a partir de electricidad de origen renovable tiene especial trascendencia para la descarbonización de la siderurgia por el doble papel que en ella juega este gas: como insumo y como vector energético. La producción de hidrógeno verde lleva asociada una cadena de valor que comprende desde la investigación y la fabricación de electrolizadores hasta su distribución y uso en diferentes aplicaciones industriales, con necesidades de mano de obra especializada que podrían generar miles de puestos de trabajo a medida que esta tecnología alcanza su madurez definitiva y se convierte en una alternativa económicamente competitiva.



El desarrollo de un ecosistema industrial en torno al hidrógeno verde tiene un elevado potencial de creación de empleo, pudiendo, además actuar como receptor de trabajadores procedentes de actividades productivas que experimenten mermas en sus plantillas como consecuencia de los procesos de transición energética. Según un estudio sobre el mercado laboral ligado al hidrógeno verde realizado por la consultora ManpowerGroup y la compañía Cepsa, la implementación de esta tecnología supondrá la creación de hasta 181.000 empleos hasta 2040.

La puesta en marcha de este tipo de ecosistemas se está llevando a cabo a través de proyectos empresariales colectivos e individuales. Entre los primeros se encuentra la creación de HUBs o Valles del Hidrógeno: áreas territoriales en las que diferentes actores aúnan esfuerzos, intereses, capacidades y tecnologías para investigar, producir, transportar, almacenar y consumir hidrógeno verde. Estos emprendimientos representan una oportunidad de generación de empleo y de desarrollo local. Algunos de estos HUBs actualmente en marcha, y con diferente nivel de desarrollo, son:

- El **Corredor de Hidrógeno del Ebro**, que permitirá potenciar la coordinación interterritorial entre cuatro iniciativas regionales en torno al hidrógeno surgidas en País Vasco, Navarra, Aragón y Cataluña. Podría significar la creación de 1.340 empleos directos y 6.700 indirectos.
- El **Corredor Vasco del Hidrógeno**, que estima la creación de 2.101 empleos directos, 3.918 indirectos y 1.734 inducidos.
- El **Valle Andaluz del Hidrógeno**, que llevaría asociada la generación de hasta 10.000 puestos de trabajo, 1.000 de ellos directos.

Los proyectos empresariales de carácter individual relacionados con el Hidrógeno verde son de muy diferente tipo, enfocándose tanto a distintos eslabones de su cadena de valor como a sus aplicaciones industriales. Alguno de los que se pueden reseñar en el contexto de este informe son:

- **Asturias H<sub>2</sub> Valley, y Green H<sub>2</sub> Los Barrios (Cádiz)**. Se trata de iniciativas de la empresa EDP destinadas a la transformación de sus centrales termoeléctricas de carbón para la producción de Hidrógeno Verde. El primero de los proyectos crearía 400 empleos durante la fase de construcción y 55 durante la fase de operación. El segundo prevé crear 300 puestos de trabajo durante la etapa de construcción y 100 empleos, directos e indirectos, una vez esté en marcha la planta.
- **Proyecto de Hydnum Steel en Puertollano (Ciudad Real)**, primer proyecto de planta de producción de acero verde de la península ibérica. Su construcción se prevé para 2025 esperándose iniciar la fabricación en 2026. La factoría funcionará exclusivamente con energías limpias e incorporará la fabricación de DRI con Hidrógeno Verde. Inicialmente creará 509 empleos directos, 2.528 indirectos y 1.167 inducidos; cifras que en futuras ampliaciones se extenderían a 1.100 empleos directos, 5.484 indirectos y 2.531 inducidos.
- **Fábrica de electrolizadores de Accelera by Cummins en Guadalajara**. Esta factoría, inaugurada en octubre de 2024, puede contribuir a impulsar la producción de Hidrógeno Verde a gran escala. La factoría ha creado 150 puestos de trabajo directos, el 30% ocupados por mujeres.

Se estima que el impacto positivo sobre el empleo en Europa de la fabricación de Hidrógeno Verde se extenderá más allá del sector estrictamente industrial, alcanzando a otros ámbitos productivos. El informe de ManpowerGroup-Cepsa apunta que el 88% de estos nuevos empleos (1,7 millones) se localizarán, además de en la industria, en servicios y comercio, construcción y educación; correspondiendo el 12% restante al sector energético<sup>22</sup>.

---

22. <https://www.manpowergroup.es/estudios/las-moleculas-verdes-la-inminente-revolucion-del-mercado-del-empleo-en-europa-realizado-por-manpowergroup-y-cepsa>

### 6.3. Fabricación de DRI con Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>DRI)

El hierro reducido de forma directa o DRI, constituye un insumo principal de la siderurgia. Su obtención empleando como agente reductor Hidrógeno Verde es un elemento clave para alcanzar la descarbonización de esta industria.

Actualmente no existe ninguna planta de fabricación de H<sub>2</sub>DRI por lo que no se dispone de información sobre los tipos y cantidad de empleos que requiere esta técnica. La cualificación necesaria para operar estas plantas probablemente no difiera mucho de la requerida por las instalaciones de DRI convencionales, salvo determinados aspectos específicos propios de la integración del Hidrógeno Verde en el proceso.

Las dos iniciativas más recientes que contemplan la incorporación de H<sub>2</sub>DRI corresponden al proyecto de Arcelor Mittal España S.A. para la descarbonización de su factoría de siderurgia integral en Asturias, y al proyecto de Hydnum Steel de un nuevo complejo siderúrgico en Puertollano (Ciudad Real) para la obtención de un acero cero emisiones.

El proyecto de Hidrógeno circular DRI de Arcelor Mittal se encuentra paralizado por parte de la compañía, tanto en el Principado de Asturias como el resto de sus instalaciones europeas. Según los cálculos del laboratorio de análisis económico regional REGIOlab de la Universidad de Oviedo, esta decisión podría suponer una caída del PIB regional del 1,6% y una pérdida de, al menos, unos 4.000 empleos, 2.000 dentro del sector siderúrgico y el resto correspondiente a empleos indirectos e inducidos.

El desarrollo de la planta de Hydnum Steel en Puertollano planea realizarse en dos etapas consecutivas. Durante la primera se construirá la acería y el tren de laminación, elementos auxiliares, parques eólicos y fotovoltaicos y un electrolizador de pequeña potencia para consumo de la acería. Como fuentes de hierro se emplearán DRI y chatarra adquiridos a terceros. Durante la segunda fase se construiría la planta de DRI y un gran electrolizador para proveerla de hidrógeno, lo que generaría 86 empleos directos. En conjunto se generarían 4.204 empleos, 509 directos, 2.528 indirectos y 1.167 inducidos. El 20% de esos empleos corresponderían a titulados superiores, especialmente en ingeniería, un 70% a personal con Formación Profesional en distintas ramas, y un 10% a personal sin cualificación específica que sería formado por la misma empresa.







# PARTE 4. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA UNA INDUSTRIA SIDERÚRGICA SOSTENIBLE Y DESCARBONIZADA

**La situación actual de la siderurgia en España exige una respuesta estratégica y decidida** que garantice su viabilidad a largo plazo, al mismo tiempo que refuerce su competitividad y sostenibilidad en el contexto de la transición energética global. Ante los desafíos que plantean la descarbonización y la competencia internacional, resulta imperativo adoptar un enfoque basado en el hidrógeno verde como elemento clave para transformar la industria siderúrgica, posicionando a España como referente en este ámbito. Este compromiso, que debe iniciarse de manera inmediata y sin dilaciones, debe ir más allá de esperar iniciativas europeas, adaptándose a las características específicas del país, aprovechando sus ventajas competitivas y recursos disponibles. La urgencia de actuar radica en el poco tiempo restante para cumplir los objetivos climáticos y la necesidad de establecer las bases de una industria sólida y sostenible que garantice el futuro del sector.

El riesgo de deslocalización de la industria siderúrgica, uno de los sectores más afectados por las políticas climáticas y la globalización, ya es una realidad que está impactando negativamente en el sector, exigiendo una acción urgente y decidida. Implementar un modelo que combine hidrógeno verde, electricidad renovable y el aprovechamiento de la red consolidada de hornos de arco eléctrico del país permitirá no solo prevenir este fenómeno, sino también consolidar a España como un centro estratégico para la producción de acero sostenible.

**El hidrógeno verde se perfila como un elemento esencial para la transformación de la siderurgia española** y, en particular, para avanzar hacia un modelo de producción sostenible y competitivo. Su producción, basada en la electrólisis del agua utilizando energía renovable, convierte a España en un país con un potencial único gracias a su capacidad instalada en fuentes como la solar y la eólica. La amplia disponibilidad de estas energías permite no solo garantizar la producción de hidrógeno verde a gran escala, sino también hacerlo de manera competitiva frente a otros países europeos.

El desarrollo de esta estrategia requiere una planificación exhaustiva que contemple, en primer lugar, la inversión en infraestructuras adecuadas para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno. Es fundamental modernizar las actuales redes de gas natural para adaptarlas a este nuevo recurso, al tiempo que se desarrollan nuevos hidroductos que conecten los centros de generación renovable con los polos industriales siderúrgicos. Además, proyectos estratégicos como H<sub>2</sub>Med, que busca interconectar las redes de hidrógeno de la península ibérica con Europa, deben recibir un apoyo decidido para posicionar a España no solo como productor, sino también como exportador clave en el mercado europeo del hidrógeno.

En paralelo, es imprescindible establecer un marco regulatorio claro y estable que fomente la inversión privada en la cadena de valor del hidrógeno verde. Esto incluye desde incentivos fiscales hasta la creación de mercados de hidrógeno que promuevan su integración en sectores industriales estratégicos,



como el siderúrgico. Asimismo, la cooperación entre los sectores público y privado será crucial para el desarrollo de tecnologías innovadoras que reduzcan los costos de producción y aumenten la eficiencia del proceso de electrólisis.

Resulta asimismo esencial el **apoyo e impulso a las políticas, públicas y privadas, en I+D+i** para responder a las importantes necesidades tecnológicas y de producto del sector (integración del H<sub>2</sub>V, fabricación del DRI, nuevas calidades de acero, etc.).

Adicionalmente, y de manera imprescindible, **la estrategia debe incluir un enfoque específico en la formación y especialización de la fuerza laboral** para que pueda adaptarse a las demandas tecnológicas y operativas del uso del hidrógeno en la siderurgia. Solo mediante una acción coordinada y urgente en estas áreas será posible transformar la industria siderúrgica española en un referente global de sostenibilidad y competitividad, mientras se sientan las bases para una economía robusta y alineada con los objetivos climáticos internacionales.

Por ello, un elemento central de esta transformación debe ser el diseño de políticas de empleo que integren la realidad demográfica de la industria siderúrgica en España, donde la edad media de las personas trabajadoras es elevada y el relevo generacional plantea un desafío inminente. Esta circunstancia, lejos de ser un obstáculo, puede convertirse en una oportunidad estratégica si se implementan programas de reentrenamiento ambiciosos que permitan adaptar las competencias laborales a las necesidades de un sector en transición. Además, se debe seguir impulsando la integración de la mujer en el sector, actualmente infrarrepresentada relegada a áreas y actividades muy específicas.

Esta recualificación debe abordar de forma específica la capacitación en el manejo de tecnologías relacionadas con la producción y el uso del hidrógeno verde, así como con la operación de infraestructuras renovables y los nuevos sistemas de producción siderúrgica, como los hornos de arco eléctrico y los procesos de reducción directa del hierro (DRI). Este enfoque no solo permitirá preservar el empleo en un sector tradicionalmente intensivo en mano de obra, sino que también contribuirá a preparar a las nuevas generaciones para liderar la industria en un entorno marcado por la digitalización y la sostenibilidad.

Además, es fundamental que estos programas estén diseñados teniendo en cuenta la diversidad de perfiles laborales en la siderurgia. La formación debe ser accesible para todas las categorías profesionales, desde los operarios hasta los mandos intermedios y los técnicos especializados. Para ello, será necesario establecer colaboraciones entre los centros de formación profesional, las universidades, los sindicatos y las empresas, garantizando una oferta formativa alineada con las demandas del mercado y adaptada a las características de las personas trabajadoras.

La elevada edad media de la plantilla exige, asimismo, un enfoque que facilite la transición hacia el retiro de las personas trabajadoras de mayor edad, al mismo tiempo que promueve la incorporación de jóvenes talentos al sector. Esto puede lograrse mediante planes específicos de jubilación flexible que permitan el traspaso de conocimiento intergeneracional, así como mediante incentivos para la contratación de personal joven y cualificado en áreas clave para la transformación tecnológica y energética.

Un aspecto crucial es que este proceso de recualificación y modernización del empleo debe inscribirse en el marco de una transición justa, que no solo busque minimizar los impactos negativos del cambio, sino también maximizar las oportunidades para las comunidades y territorios más dependientes de la siderurgia. Esto implica invertir en programas de desarrollo regional que generen alternativas económicas para las zonas más afectadas, al tiempo que se refuerzan los servicios públicos esenciales para garantizar el bienestar de las personas trabajadoras y sus familias.

La integración de estas medidas en una estrategia nacional de hidrógeno verde y siderurgia sostenible permitiría no solo asegurar la viabilidad y la competitividad del sector, sino también construir un modelo industrial socialmente inclusivo y ambientalmente responsable, posicionando a España como un referente global en la transición hacia una economía descarbonizada.

**La adopción del escenario basado en el uso de hidrógeno verde es una apuesta ambiciosa, pero realista.** España cuenta con un contexto particularmente favorable para su implementación, no solo por su capacidad instalada en energías renovables, sino también por disponer de una red de hornos de arco eléctrico (EAF) significativamente superior a la de otros países europeos. Esta infraestructura, que ya supone una ventaja competitiva en términos de descarbonización y eficiencia energética, sitúa al país en una posición única para liderar la transformación siderúrgica hacia procesos más sostenibles. Además, la experiencia acumulada en reciclaje de acero refuerza esta ventaja, ofreciendo una base industrial sólida que puede adaptarse con relativa rapidez a los nuevos retos tecnológicos que exige la transición.

**Esta combinación de factores convierte a España en un candidato idóneo para establecer un modelo propio que atienda sus necesidades específicas y aproveche al máximo sus fortalezas.** Si bien es deseable avanzar de manera coordinada dentro del marco europeo, es imprescindible que España no dependa exclusivamente de las dinámicas continentales, especialmente si éstas no desarrollan una estrategia pertinente y acorde con las características y ventajas competitivas del país. En este sentido, adoptar una perspectiva nacional permitirá consolidar un liderazgo en la producción de acero bajo en carbono, atrayendo inversiones estratégicas, creando empleo de calidad y garantizando una ventaja competitiva sostenible frente a otros mercados internacionales.

**La acción inmediata es imprescindible.** Estando ya en el año 2025, queda poco margen para alcanzar los objetivos fijados para 2030. Por ello, es fundamental desplegar una estrategia nacional que abarque desde inversiones en infraestructuras, incentivos fiscales y apoyo a la innovación tecnológica, hasta el diseño de políticas públicas que faciliten esta transición. Este enfoque debe estar respaldado por una colaboración estrecha entre el Gobierno, las Administraciones Públicas, el sector privado y los agentes sociales, asegurando una planificación eficiente y una ejecución efectiva.

En conclusión, España se encuentra en una encrucijada decisiva para el futuro de su industria siderúrgica. La oportunidad de liderar una transformación hacia un modelo sostenible basado en el hidrógeno verde, combinado con su capacidad instalada en energías renovables, su red de hornos de arco eléctrico y su experiencia en reciclaje de acero, coloca al país en una posición única. Sin embargo, aprovechar este potencial requiere actuar de inmediato. No es posible esperar a que la Unión Europea articule soluciones comunes; España debe diseñar e implementar una estrategia nacional que responda a sus características y fortalezas específicas.

Este camino exige una acción coordinada que contemple la inversión en infraestructuras, el desarrollo de un marco regulatorio claro y el impulso de la colaboración público-privada. Al mismo tiempo, **es fundamental poner a las personas en el centro de este cambio, promoviendo una transición justa que recualifique a las actuales plantillas siderúrgicas, facilite la entrada de jóvenes al sector y garantice oportunidades económicas para los territorios más dependientes de esta industria.** La edad media elevada de las personas trabajadoras no debe percibirse como una debilidad, sino como una oportunidad para gestionar un cambio intergeneracional que asegure la transferencia de conocimientos y fortalezca la resiliencia del sector.

La apuesta por el hidrógeno verde no solo es una respuesta a los desafíos climáticos, sino una estrategia para revitalizar la industria, atraer inversiones, generar empleo de calidad y consolidar una ventaja competitiva sostenible. En este contexto, **España tiene la responsabilidad de demostrar que es posible construir un modelo industrial socialmente inclusivo, ambientalmente responsable y económicamente competitivo.** Liderar esta transición no solo garantizará el futuro del sector siderúrgico, sino que posicionará al país como un referente global en la lucha contra el cambio climático y la construcción de una economía baja en carbono. El momento de actuar es ahora, y España tiene todos los recursos necesarios para hacerlo con éxito.

