



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
ICADE

El hidrógeno como oportunidad de negocio en la industria siderúrgica

Autor: Guillermo Sánchez Carrillo
Director: Carmen Escudero Guirado

MADRID | Marzo de 2025

Resumen

La descarbonización de la industria es un tema en auge en Europa debido a los planes de la Unión Europea para alcanzar las cero emisiones netas.

El objetivo de este trabajo es explicar por qué el hidrógeno es una oportunidad para la descarbonización de la industria y en concreto de la industria siderúrgica. Se van a tratar tanto las oportunidades como las problemáticas asociadas a la adopción de esta molécula en la descarbonización del sector.

Como modelo de estudio se toma la estrategia de negocio de una de las empresas líderes y punteras del sector en el uso de hidrógeno verde en sus procesos productivos. Este caso se entiende como una buena referencia de la que derivar beneficios de la adopción del hidrógeno verde, así como los retos asociados a este cambio. Los aprendizajes del estudio del caso se entienden en gran medida extrapolables a otras empresas líderes del sector siderúrgico.

Palabras clave: hidrogeno, descarbonización, acero verde, industria siderúrgica

Abstract

The decarbonization of industry is a growing topic in Europe due to the European Union's plan to achieve net zero emissions.

The objective of this paper is to explain why hydrogen is an opportunity for the decarbonization of industry, specifically the steel industry. Both the opportunities and the challenges associated with the adoption of this molecule in the decarbonization of the sector will be discussed.

The business strategy of one of the leading companies in the sector in the use of green hydrogen in its production processes is taken as a study model. This case is understood as a good reference from which to derive benefits from the adoption of green hydrogen, as well as the challenges associated with this change. The lessons learned from the case study can be extrapolated to a large extent to other leading companies in the steel sector.

Keywords: hydrogen, decarbonization, green steel, steel industry.

ÍNDICE

1	Introducción	4
1.1	Justificación de la relevancia y objetivos de la investigación	4
1.2	Contexto: descarbonización de la industria.....	4
1.3	Metodología de la investigación	7
2	Marco teórico	8
2.1	Cadena de valor del acero	8
2.1.1	Producción del Acero: Ruta Primaria	8
2.1.2	Producción del Acero: Ruta Secundaria.....	9
2.2	Impacto de la Producción en la Cadena de Valor	10
2.3	Jugadores claves en la industria	¡Error! Marcador no definido.
2.4	La transición verde y el hidrógeno en la industria siderúrgica	14
2.5	El papel del Hidrógeno en el proceso de descarbonización de la siderurgia	15
3	Perspectivas para la Transformación de la Cadena de Valor	18
3.1	Impacto del hidrogeno en la cadena de valor	18
3.2	Nuevas oportunidades para las empresas siderúrgicas	21
3.3	Reacciones del mercado y oportunidades estratégicas de la industria siderúrgica ante la inversión en hidrogeno verde	23
4	Estudio de caso	25
4.1	Empresa seleccionada	25
4.1.1	Estrategia de Acero Verde	26
4.2	Beneficios esperados.....	27
4.3	Desafíos identificados	29
5	Conclusiones	31
5.1	El Hidrógeno, ¿Oportunidad o amenaza?	31
5.2	Recomendaciones para el sector	33
6	Bibliografía	35

1 Introducción

1.1 Justificación de la relevancia y objetivos de la investigación

El objetivo de este trabajo es analizar e investigar el impacto y las posibilidades de cambiar la industria que tiene el hidrógeno, en el objetivo de la descarbonización de la industria siderúrgica alcanzando los objetivos de sostenibilidad, evaluando las oportunidades de negocio que pueden surgir a partir de ello.

Con este objetivo, se pondrá el foco en cómo el hidrógeno puede jugar un papel fundamental, o al menos de gran importancia, no solo en la diferenciación de las empresas en el sector, sino también en si la opción por el hidrógeno puede suponer una fuente de ventaja competitiva para las empresas que avancen en su adopción. En el marco de esta valoración, haremos especial énfasis en el análisis de su viabilidad en el contexto actual de las crecientes presiones regulatorias y ambientales; constatándose cómo la principal presión que están recibiendo las empresas de este sector es el objetivo de alcanzar las cero emisiones netas de CO₂ para el año 2050.

Para explicar y llegar a este objetivo se van a abordar cuestiones como las siguientes:

- las oportunidades tecnológicas del hidrógeno en la producción de acero (el denominado *green steel*)
- la identificación de los desafíos económicos y regulatorios, y
- el estudio de su impacto en la competitividad y en la sostenibilidad de la empresa.

Es importante mencionar que materia de sostenibilidad, el impacto de la industria siderúrgica resulta de vital importancia en la actualidad, puesto que esta industria representa entre el 7% y el 9% de las emisiones globales de CO₂ (Muslemani et al., 2021) y, dado que la producción de acero sigue siendo fundamental para la economía global, siendo importante encontrar formas de reducir su huella de carbono (Henry, 2024).

1.2 Contexto: descarbonización de la industria

Para comprender la relevancia del hidrógeno en este proceso, es esencial analizar primero el contexto de descarbonización en la industria siderúrgica y los factores que impulsan esta transición.

La lucha contra el cambio climático ha llevado a un proceso de transformación en los sectores productivos a nivel mundial. La industria siderúrgica del continente contribuye a un 4% de las emisiones totales de CO₂ en Europa, y un 22% de las emisiones industriales (Roland Berger, 2020), por lo que dicho sector enfrenta una presión creciente para reducir su huella de carbono y alinearse con los compromisos climáticos internacionales, como el acuerdo de París; tratado internacional jurídicamente vinculante adoptado en París el 12 de diciembre de 2016, en la 21^a Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), con el objetivo de abordar el cambio climático y sus impactos negativos. El acuerdo alcanzado exige a todas las partes, 194 países más la UE, que hagan todo lo posible, por medio de las llamadas *contribuciones determinadas a nivel nacional* (las Nationally Determined Contributions (NDCs) por sus siglas en inglés) y que redoblen sus esfuerzos en los próximos años. Esto implica la obligación de las Partes firmantes de informar periódicamente sobre sus emisiones y sobre sus esfuerzos de aplicación (Naciones Unidas, 2015).

Los sectores más intensivos en la emisión de carbono son: el siderúrgico, el cementero, la industria química y el refinado (Villar, 2014). Estos sectores dependen históricamente de procesos energéticos altamente emisores. Sin embargo, las regulaciones ambientales cada vez son más estrictas y mediante mecanismos, como el llamado *Mecanismo de Ajuste en Frontera de Carbono* de la Unión Europea (CBAM)¹, se busca evitar la fuga de carbono que se produce cuando las empresas con sede en la UE trasladan su producción contaminante a otros países con políticas climáticas menos estrictas que en la UE, o cuando los productos de la UE son sustituidos por importaciones más intensivas en carbono. Con estas fórmulas se busca incentivar la adopción de tecnologías bajas en carbono. En paralelo, otras iniciativas como el Green Deal europeo de la UE (Comisión Europea, 2019), o los incentivos fiscales en EEUU, han impulsado la inversión en soluciones sostenibles, abriendo nuevas oportunidades de negocio en sectores clave.

¹ El llamado *Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono* (CBAM) de la UE se trata de un instrumento para la importación de bienes procedentes de fuera de la UE. Se regula en el Reglamento 2023/956 del Parlamento Europeo y del Consejo de 10 de mayo de 2023, y fija un precio justo al carbono emitido durante la producción de bienes intensivos en carbono y fomenta una producción industrial más limpia en países no pertenecientes a la UE (Ministerio para la transición energética y el reto demográfico, 2023). Un análisis sobre su justificación, características y riesgos en Steinberg, F., Feas, E y Lázaro, L. (2023).

No obstante, la descarbonización de la industria presenta importantes barreras. La infraestructura actual sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles, y muchas de las tecnologías necesarias para reducir las emisiones aún no están suficientemente desarrolladas o requieren inversiones significativas. Además, la competitividad de las empresas podría verse afectada en el corto plazo si la transición no se gestiona adecuadamente.

En este contexto, el hidrógeno emerge como una de las alternativas más prometedoras para descarbonizar la industria pesada. Su capacidad para actuar como vector energético limpio y su versatilidad en aplicaciones industriales lo posicionan como un elemento clave en la transición energética. La combinación de políticas de apoyo, avances tecnológicos y reducción de costes de producción de hidrógeno verde podría convertirlo en una solución viable para reemplazar combustibles fósiles y reducir significativamente las emisiones en sectores difíciles de electrificar. Como refuerzo para este planteamiento y ejemplificar las posibilidades que tiene el hidrógeno como alternativa, se presentan los siguientes proyectos europeos que están adoptando el hidrógeno verde:

- **Iberdrola en Puertollano, España:** Iberdrola ha inaugurado una planta de hidrógeno verde en Puertollano, considerada la más grande de Europa. Esta instalación produce hidrógeno 100% renovable a partir de una planta fotovoltaica de 100 MW, con una capacidad de producción de hasta 3.000 toneladas anuales. El hidrógeno generado se utiliza en la fábrica de amoníaco de Fertiberia, reduciendo así el consumo de gas natural y las emisiones de CO₂ (Iberdrola, 2022).
- **Navarra y la Ciudad Agroalimentaria de Tudela:** En Navarra, se ha alcanzado un acuerdo para construir una planta de hidrógeno verde en la Ciudad Agroalimentaria de Tudela (CAT). Las empresas Statkraft y Grupo Enhol arrendarán una parcela de 18.564 m² para construir una planta con capacidad de producción de 742 toneladas de hidrógeno verde al año, utilizando fuentes renovables como energía eólica y solar. Este proyecto es estratégico para la región, fomentando la transición energética sostenible (Gobierno de Navarra, 2025).
- **Aragón como epicentro del hidrógeno:** Aragón se ha convertido en un referente internacional del hidrógeno al organizar la I Semana del Hidrógeno, reuniendo a los principales actores del sector. Durante este evento, se presentaron proyectos y se debatió sobre las capacidades científicas en tecnologías del hidrógeno, consolidando la posición de la región en la transición energética (El periódico de la energía, 2025).

- **Corredor H2Med:** La Unión Europea ha presentado la estrategia del hidrógeno para una Europa Neutra en Clima, con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono incorporando el hidrógeno en sus planes. En este marco, se ha propuesto el Corredor H2Med, promovido por Enagás; se trata de una infraestructura que busca transportar hidrógeno verde desde la Península Ibérica hacia el resto de Europa, reforzando la posición de España y Portugal como productores clave de hidrógeno renovable (Enagás, 2022).

Este trabajo tiene como objetivo el análisis del papel del hidrógeno en la industria siderúrgica y el impacto que este puede tener en la descarbonización del sector, tras ver los desafíos y políticas que se están implementando para alcanzar la neutralidad de carbono reduciendo las emisiones de carbono.

1.3 Metodología de la investigación

Como metodología, se combinan la investigación bibliográfica mediante el acceso a bases de datos como Web of Science y la consulta a través de Google, y Google Scholar, lo que ha permitido contar con estudios recientes, artículos académicos e informes de organizaciones industriales y ambientales de referencia en el tipo de industria que se aborda en este trabajo. Como palabras clave para la búsqueda de documentos se han empleado términos tales como: hydrogen, green steel e industrial decarbonization, entre otras.

Además, se ha podido contar con información primaria mediante entrevistas con profesionales del sector, lo que ha dotado al trabajo de la oportunidad de incluir la aplicación práctica de las cuestiones expuestas en el marco teórico.

De igual modo, este estudio ha procurado la identificación de oportunidades y retos concretos de los diferentes casos. Este enfoque ha logrado obtener una visión completa y, se podría decir, realista, sobre el impacto del hidrógeno en la industria siderúrgica, tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

Se confía, por tanto, en que el lector de este trabajo alcance a tener una comprensión completa del tema que se está abordando.

Se ha contado con la ayuda de profesionales de Enagás, compañía tenedora de la actual infraestructura de Gas Natural en España, así como de la futura red de hidrógeno a nivel nacional; e igualmente se ha contado con la opinión de Gonvarri Industries, grupo industrial dedicado a la primera transformación del acero; en especial en el punto 4 que se aborda en este trabajo “Estudio de Caso”. La empresa seleccionada para el estudio de caso en profundidad ha sido recomendada por estos profesionales como uno de los mayores exponentes en este proceso de descarbonización de la industria siderúrgica.

2 Marco teórico

2.1 Cadena de valor del acero

La cadena de valor del acero abarca un conjunto de procesos industriales que transforman las materias primas en productos terminados. La producción del acero en Europa sigue dos rutas principales: la ruta primaria, basada en la transformación del mineral de hierro, y la ruta secundaria, que utiliza chatarra reciclada. Ambas rutas tienen implicaciones significativas en términos de eficiencia energética y de emisiones de carbono (Roland Berger, 2020).

En este apartado se hace una descripción resumida de los procesos, sin entran en demasía en detalles técnicos ya que en este trabajo no es necesario. El objetivo de esto es poner en contexto y hacer que se entienda el potencial impacto y oportunidades que el hidrógeno puede tener en la descarbonización de la fabricación de acero.

2.1.1 Producción del Acero: Ruta Primaria

La mayor parte del acero europeo se produce a través de la ruta primaria (*Figura 1*) (60% de la producción en Europa), siendo un proceso altamente intensivo en carbono que implica varias etapas (Roland Berger, 2020):

1. Procesamiento del mineral de hierro

El mineral de hierro se convierte en sinter o pellets en plantas especializadas. Este material es luego introducido en un alto horno junto con coque para producir arrabio.

2. Reducción del hierro en el alto horno

En este proceso, el coque actúa como agente reductor, eliminando el oxígeno del mineral de hierro y generando grandes cantidades de CO₂.

3. Conversión del arrabio en acero en un convertidor de oxígeno (BOF - Basic Oxygen Furnace)

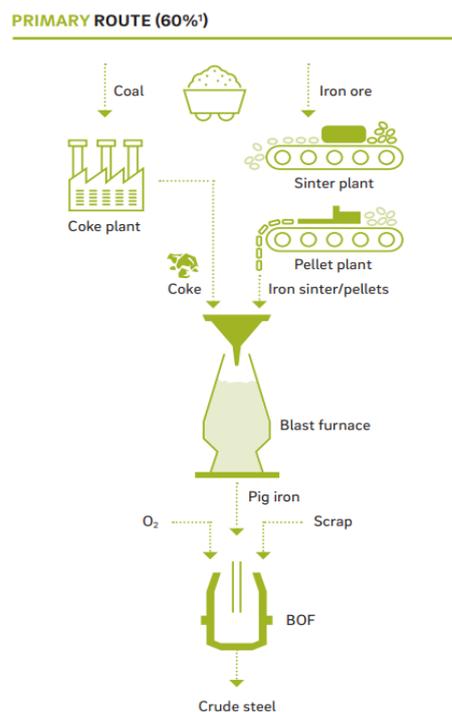
El arrabio líquido se traslada a un convertidor donde se insufla oxígeno puro para reducir su contenido de carbono y obtener acero crudo.

4. Producción de acero laminado

El acero crudo obtenido se somete a procesos de refinamiento y laminación para su transformación en productos comerciales.

Este método es responsable de la mayor parte de las emisiones de CO₂ en la industria del acero debido al uso de coque como agente reductor y fuente de energía (Roland Berger, 2020).

Figura 1. Procesos. Ruta primaria



Fuente. Roland Berger, 2020, p.5

2.1.2 Producción del Acero: Ruta Secundaria

La producción secundaria (40% de la producción en Europa) se basa en la fusión de chatarra en hornos de arco eléctrico (EAF - Electric Arc Furnace). Este proceso presenta una menor huella de carbono y se caracteriza por (Roland Berger, 2020):

1. Fusión de chatarra en horno de arco eléctrico

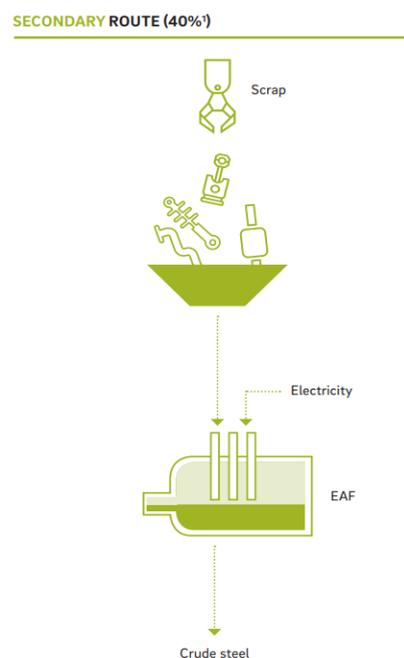
La chatarra metálica se funde mediante el uso de electricidad en un horno EAF, lo que permite la producción de acero con menores emisiones directas de CO₂.

2. Dependencia del suministro eléctrico

La huella de carbono de este proceso depende en gran medida de la fuente de electricidad utilizada. Si la electricidad proviene de fuentes renovables, la producción de acero puede ser prácticamente neutra en carbono.

El método secundario (*Figura 2*) permite una reducción significativa en las emisiones respecto a la ruta primaria, aunque su capacidad de producción está limitada por la disponibilidad de chatarra reciclada (Roland Berger, 2020).

Figura 2. Procesos. Ruta secundaria



Fuente. Roland Berger, 20220, p.5

2.2 Impacto de la Producción en la Cadena de Valor

La cadena de valor del acero está influenciada por factores como la eficiencia energética, la disponibilidad de materias primas y la regulación ambiental. Algunos aspectos clave incluyen:

- Emisiones de CO₂: aproximadamente el 90% de las emisiones de la industria siderúrgica provienen de procesos de reducción de hierro y producción de coque. Las

tecnologías actuales de mitigación, como la inyección de hidrógeno o la optimización de los altos hornos, no logran eliminar completamente el uso de carbono.

- Dependencia de la electricidad: en la ruta secundaria, la reducción de emisiones depende en gran medida de la transición hacia fuentes de electricidad renovable.
- Limitaciones del reciclaje: la producción de acero a partir de chatarra está restringida por la disponibilidad de material reciclado y no puede producir todos los grados de acero necesarios en la industria.

2.3 Jugadores clave en la industria

La industria siderúrgica en Europa es uno de los pilares fundamentales para la economía del continente, dado que provee productos esenciales para sectores como la construcción, la automoción y la ingeniería. En este contexto, existen varias empresas que destacan por su capacidad de producción, innovación tecnológica y su liderazgo en el mercado. Aquí se presentan los principales actores de la industria siderúrgica europea, analizando las razones por las que son considerados los “key players” en el sector.

- ArcelorMittal

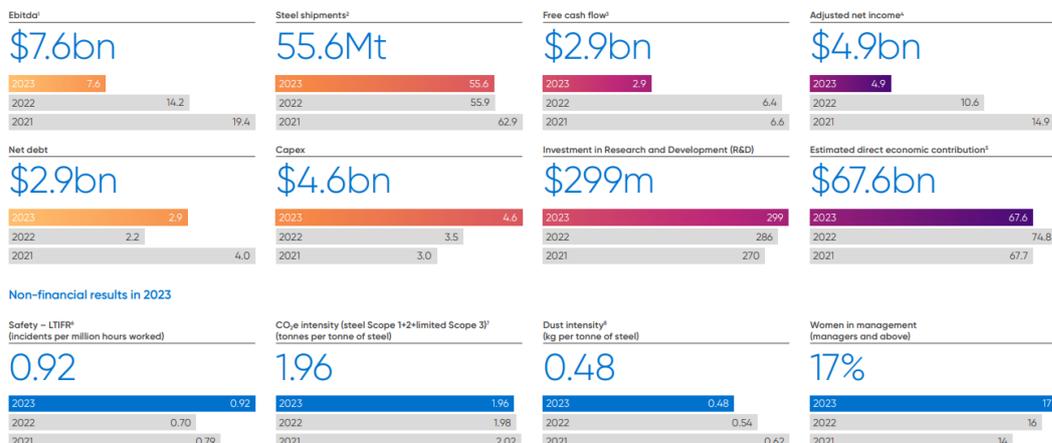
Esta empresa es la líder indiscutible de la industria siderúrgica a nivel mundial, siendo el mayor productor de acero del mundo. Con sede en Luxemburgo, la compañía alcanzó en 2023 una producción de aproximadamente 68,5 millones de toneladas de acero crudo. Su presencia global abarca más de 60 países, y sus productos sirven a sectores clave como la construcción, automoción y electrodomésticos. Además, la empresa ha demostrado un fuerte compromiso con la sostenibilidad, invirtiendo en tecnologías de producción de acero con bajas emisiones de carbono.

Entre sus iniciativas más destacadas se encuentra el uso de hidrógeno verde y hornos eléctricos, reflejando así su compromiso con la descarbonización de la industria. Estas acciones posicionan a ArcelorMittal como un actor clave en la transición hacia una producción más sostenible dentro del sector siderúrgico europeo (ArcelorMittal, 2023).

Figura 3. Cuenta de resultados ArcelorMittal

Overview and highlights
ArcelorMittal at a glance

Performance highlights



Fuente. ArcelorMittal, 2023

- ThyssenKrupp

Otra de las grandes compañías de la industria siderúrgica en Europa, con sede en Alemania. Esta empresa ha mantenido una posición destacada gracias a su capacidad de innovación y su enfoque en la diversificación de sus actividades. ThyssenKrupp produce alrededor de 10,4 millones de toneladas de acero anualmente, y su presencia en diferentes sectores, como la automoción, la ingeniería y los bienes de inversión, le permite contar con una sólida base de clientes. Además, la empresa ha estado a la vanguardia de la innovación, implementando soluciones tecnológicas avanzadas en la producción del acero reforzando su competitividad en un mercado global en constante evolución (ThyssenKrupp, 2023).

Figura 4. Cuenta de resultados ThyssenKrupp

		2023 / 2024	Change in %
Order intake	million €	32,815	-11
Sales	million €	35,041	-7
Adjusted EBIT ¹⁾	million €	567	-19
Net income/(loss)	million €	-1,450	27
Earnings per share	€	-2.42	27
Free cash flow before M&A ²⁾	million €	110	-70
Net financial assets (Sept. 30)	million €	4,411	2
tkVA	million €	-2,476	12
Market capitalization (Sept. 30)	million €	2,166	-52
Dividend per share ³⁾	€	0.15	-

¹⁾ See reconciliation in segment reporting (Note 24)

²⁾ See reconciliation in the analysis of the statement of cash flows

³⁾ Proposal to the Annual General Meeting

Fuente. ThyssenKrupp, 2023

- Celsa Group

Con sede en España, esta empresa se distingue por su enfoque en sostenibilidad, siendo el primer productor europeo de acero circular con bajas emisiones. Celsa se ha consolidado como un líder en la transformación del sector, con una importante presencia en mercados como España, Francia, Polonia y el Reino Unido. La empresa utiliza hornos de arco eléctrico, que permiten reducir significativamente las emisiones de CO2 en comparación con los métodos tradicionales de producción de acero. En 2022, Celsa alcanzó una facturación récord de 6.109 millones de euros, lo que refleja su sólida posición en el mercado europeo y su capacidad de adaptación a las demandas del sector (Celsa Group, 2022).

- SSAB

SSAB, es una empresa sueca especializada en la fabricación de productos de acero de alta resistencia, también se destaca entre los principales actores de la industria siderúrgica europea. Fundada en 1978, SSAB cuenta con plantas industriales en Suecia, Finlandia y EE. UU., y se ha consolidado como líder en el suministro de productos de acero de alta resistencia, como Hardox y Srenx. La compañía ha invertido de manera significativa en soluciones tecnológicas innovadoras y en la sostenibilidad de sus procesos de producción. SSAB ha sido pionero en la implementación de procesos de descarbonización, con el objetivo de reducir sus emisiones de CO2 en el futuro cercano (SSAB, 2023).

Figura 5. Cuenta de resultados SSAB

Key figures	2023	2022
Revenue, SEK million	119,489	128,745
Adjusted EBITDA, SEK million ¹⁾	20,141	32,675
Adjusted operating result, SEK million ¹⁾	16,467	29,283
Operating result, SEK million	16,467	-4,355
Result before tax, SEK million	16,716	-4,641
Result for the year, SEK million	13,038	-10,877
Adjusted earnings per share, SEK ¹⁾	12.67	22.38
Earnings per share, SEK	12.67	-10.57
Operating cash flow, SEK million	21,524	22,693
Net debt (+) / Net cash (-), SEK million	-18,206	-14,287
Dividend per share, SEK – 2023 proposal	5.00	8.70
Carbon dioxide emissions ²⁾ , thousand tonnes	9,915	9,844
Employees ³⁾	14,565	14,568
Lost time injury frequency (LTIF) ⁴⁾	0.87	1.06

1) Excluding items affecting comparability. No items affecting comparability were reported in 2023, while 2022 mainly included impairment of goodwill of SEK 33,291 million.

2) Direct emissions from production (Scope 1).

3) Permanent employees at year end.

4) Number of injuries resulting in an absence of more than one day per million working hours (LTIF), including contractors.

Fuente. SSAB, 2023

2.4 La transición verde y el hidrógeno en la industria siderúrgica

La industria siderúrgica europea tiene la necesidad de adaptarse a las medidas impuestas por la Comisión Europea en noviembre del 2018. Estas medidas tienen como objetivo cumplir los objetivos propuestos en el Acuerdo de París de 2015, como ya se ha mencionado anteriormente.

En este acuerdo se llama a alcanzar la neutralidad climática en Europa en el año 2050, lo que implica cero emisiones netas de gases de efecto invernadero y una reducción del 100% en las emisiones de carbono o la implementación de medidas que compensen estas emisiones (Comisión Europea, 2018).

Como ya se ha señalado anteriormente, la producción de acero es una de las principales fuentes de emisiones de Europa. Actualmente la industria siderúrgica del continente contribuye a un 4% de las emisiones totales de CO₂ en Europa, y un 22% de las emisiones industriales (International Energy Agency, 2020) (Roland Berger, 2020).

La mayoría del acero europeo proviene de un proceso que consiste en procesar el mineral de hierro sinterizado o pellets de hierro, que se funden en un alto horno con coque para producir arrabio. Esto se procesa en un horno básico de oxígeno para crear acero. El acero que se produce mediante este proceso se considera de ruta primaria (*Figura 1*).

El resto del acero europeo procede de la conocida como ruta secundaria (*Figura 2*), que consiste en la producción de acero a partir de chatarra calentándola en un horno de arco eléctrico. La ruta primaria emite principalmente gases de efecto invernadero de forma directa. La ruta secundaria, emite de forma indirecta gases de efecto invernadero que pueden variar dependiendo de la electricidad utilizada en el horno de arco eléctrico. El objetivo de la industria es reducir las emisiones en la ruta primaria. Es importante mencionar que, según un estudio de la OCDE, se estima que la producción mundial de acero bruto incrementará entre un treinta y un cincuenta por ciento para el año 2050 (Roland Berger, 2020).

El impacto ambiental de la producción de acero y la necesidad de reducir las emisiones han llevado a la industria siderúrgica y a sus principales empresas y *stakeholders* a buscar soluciones innovadoras como el hidrógeno, cuyo potencial para transformar este sector y reducir la huella de carbono es clave para la transición hacia una siderurgia más sostenible.

2.5 El papel del hidrógeno en el proceso de descarbonización de la siderurgia

En este contexto, la aportación potencial del hidrógeno como palanca de impulso hacia la sostenibilidad y neutralidad medioambiental de la industria siderúrgica europea cobra especial interés.

Como elemento más abundante en el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia del Universo (Centro Nacional del Hidrógeno, 2024; Herradón, 2011), el hidrógeno tiene un enorme potencial como fuente de energía. Sin embargo, en la Tierra no se encuentra en estado libre, sino en compuestos como el agua y materiales orgánicos, lo que requiere procesos específicos para su obtención y clasificación. Este gas es, incoloro, inodoro y altamente inflamable puesto que posee una densidad energética por unidad de masa superior a la de la mayoría de los combustibles tradicionales, lo que lo convierte en un vector energético (Ares et al, 2019) de gran interés en la transición hacia fuentes de energía más limpias.

Desde una perspectiva de negocio, la economía del hidrógeno está en plena fase de desarrollo, impulsada por los compromisos internacionales de reducción de emisiones de gases de efectos invernadero, previamente mencionados. El mercado global del hidrógeno está experimentando un crecimiento acelerado, con inversiones multimillonarias en infraestructura de producción y distribución. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021), el hidrógeno podría representar hasta el 10% del consumo energético mundial para 2050 si se implementan políticas favorables y avances tecnológicos que permitan su adopción a gran escala.

En este contexto, han surgido diversas oportunidades de negocio en torno al hidrógeno, que abarcan desde la producción y comercialización hasta el desarrollo de tecnologías asociadas, como pilas de combustible, sistemas de almacenamiento y aplicaciones en la industria y el transporte, entre otras. La creación de cadenas de valor sostenibles para el hidrógeno verde, en particular, es vista como un pilar fundamental en la estrategia de descarbonización de numerosos países y empresas, dado que permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la seguridad energética.

Tanto diferentes gobiernos como diversos organismos internacionales han reconocido el potencial del hidrógeno como alternativa sostenible, lo que ha llevado a la implementación de estrategias nacionales de hidrógeno en diversas regiones. Por ejemplo, la Unión Europea publicó la denominada “Estrategia de Hidrógeno de la UE”, en la que propone estrategias y mecanismos para integrar el potencial energético de este combustible en los distintos sectores

de la economía, a través de inversiones, normativas, creación de mercados e investigación e innovación (European Commission, 2020) (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021). De manera similar, países como Japón y Corea del Sur han publicado sus propias estrategias nacionales de hidrógeno, acelerando el interés en la región de Asia-Pacífico (World Energy Council, 2021).

De cara a comprender mejor la aportación del hidrógeno a la producción verde del acero, se entiende conveniente dedicar un espacio a clarificar los distintos tipos de hidrógeno según su método de producción y su impacto ambiental. La clasificación por colores se ha convertido en un estándar para diferenciar los procesos de producción.

- **Hidrógeno gris:** Se produce mediante el reformado con vapor del gas natural o la gasificación del carbón sin captura de carbono. Es el método más utilizado actualmente, representando la mayor parte de la producción global del hidrógeno. Sin embargo, este proceso genera emisiones significativas de CO₂, lo que lo convierte en una fuente altamente contaminante (Ajanovic et al., 2022).
- **Hidrógeno azul:** se obtiene a partir del gas natural, pero incorpora tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de CO₂. Si bien esto permite disminuir la huella de carbono en el proceso, estudios recientes indican que las fugas de metano a lo largo de la cadena de suministro podrían anular parte de sus beneficios ambientales, generando incertidumbre sobre su sostenibilidad real como solución a largo plazo. (Ajanovic et al., 2022).
- **Hidrógeno turquesa:** Se obtiene a través de la pirolisis del metano, un proceso que descompone el gas natural en hidrógeno y carbono sólido en lugar de CO₂. Este subproducto sólido podría aprovecharse en diversas aplicaciones industriales, reduciendo así su impacto ambiental. Sin embargo, la viabilidad comercial de esta tecnología aún está en evaluación, ya que enfrenta desafíos en términos de escalabilidad y eficiencia energética (Ajanovic et al., 2022).
- **Hidrógeno verde:** Se produce mediante la electrolisis del agua utilizando electricidad generada a partir de fuentes renovables, como la solar, eólica o hidroeléctrica. Este proceso no genera emisiones de CO₂, por lo que se considera la opción más sostenible y con mayor potencial para contribuir a la transición energética. No obstante, su producción sigue siendo costosa debido al alto precio de los electrolizadores y la necesidad de desarrollar infraestructura adecuada para su almacenamiento y

distribución. Se espera que, con el avance tecnológico y la reducción de costos en energías renovables, el hidrógeno verde se convierta en la alternativa predominante en el futuro (Ajanovic et al., 2022).

En este sentido, Europa ha tomado un rol pionero en la implementación de proyectos concretos que buscan descarbonizar la industria siderúrgica mediante el uso de hidrógeno verde. A continuación, se detallan algunos de los ejemplos más destacados que ilustran cómo la teoría de los diferentes tipos de hidrógeno se está llevando a cabo en la práctica.

- **H2 Green Steel (Suecia):** Con sede en Bode, esta iniciativa busca producir acero utilizando hidrógeno verde, con una capacidad anual prevista de 5 millones de toneladas para 2030. La planta contará con un electrolizador de 695MW, uno de los más grandes del mundo (De Aragón, 2024).
- **Hydnum Steel (España):** Ubicada en Puertollano, esta planta será la primera siderúrgica en Europa en utilizar hidrógeno verde desde su concepción. Se espera que la planta sea completamente libre de emisiones y sin vertidos al medioambiente, destacando por su sistema pionero de reutilización de aguas residuales.
- **Proyecto Catalina (España):** Este proyecto, impulsado por Copenhagen Infrastructure Partners, se desarrolla en Aragón y tiene como objetivo producir hidrógeno verde con una capacidad inicial de 500 MW, con planes de expansión en fases posteriores. El proyecto representa un paso importante en la transición de la producción de hidrógeno a partir de fuentes fósiles (hidrógeno gris) hacia un modelo completamente renovable, contribuyendo a la descarbonización de la industria (Copenhagen Infrastructure Partners, 2021).
- **Valle Andaluz del Hidrógeno Verde (España):** Liderado por Cepsa, con una inversión de 3.000 millones de euros, este ambicioso proyecto busca reemplazar el hidrógeno gris utilizado en la industria por hidrógeno verde. Se implementarán en dos grandes plantas situadas en Huelva y Cádiz, y se espera que impulse la descarbonización del sector químico y energético de la región, a la vez que contribuya al objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono (Cepsa, 2022).

La transición hacia el hidrógeno verde no solo responde a la necesidad de reducir las emisiones, sino también a la demanda de una mayor eficiencia en la cadena de valor del acero. A continuación, se detallará el proceso completo de producción, donde la introducción de hidrógeno puede representar un cambio fundamental en la forma en que se produce el acero.

3 Perspectivas para la Transformación de la Cadena de Valor

El futuro de la cadena de valor del acero en Europa está marcado por la necesidad de reducir su impacto ambiental y alinearse con los objetivos de neutralidad climática para 2050. Entre las soluciones exploradas se encuentran las siguientes:

- Captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS). Esta tecnología captura CO₂ de los procesos industriales y lo almacenan en formaciones geológicas o lo reutiliza en otros sectores, como la producción de productos químicos. Su objetivo es reducir las emisiones de CO₂ en industrias como la siderurgia (Roland Berger, 2020).
- Reducción directa con hidrógeno (H₂-DRI). Sustituye el coque por hidrógeno para reducir el mineral de hierro. Si se usa hidrógeno verde, este proceso elimina las emisiones de CO₂, convirtiéndose en una opción clave para descarbonizar la industria del acero (Roland Berger, 2020).
- Sistemas de electrólisis y plasma. Estas tecnologías emergentes buscan transformar el mineral de hierro en acero utilizando procesos eléctricos. Prometen hacer la producción de acero más eficiente y con menor impacto ambiental, pero aún están en desarrollo (Roland Berger, 2020).

El éxito de estas tecnologías dependerá de la disponibilidad de energía renovable a gran escala y del apoyo político y financiero para la reconversión de la industria (Roland Berger, 2020).

La implementación de esta tecnología emergente es crucial para lograr la transición hacia una industria más limpia y alineada con los climáticos para el 2050. En el siguiente punto se profundiza en como el hidrógeno puede transformar la cadena de valor del acero, reduciendo la huella de carbono tanto en la producción primaria como en la secundaria.

3.1 Impacto del hidrógeno en la cadena de valor

La transición hacia una industria siderúrgica sostenible requiere la implementación de tecnologías innovadoras que reduzcan drásticamente las emisiones de CO₂ a lo largo de la cadena de valor del acero. La industria siderúrgica del continente contribuye en un alto porcentaje de emisiones de CO₂, como ya se ha mencionado anteriormente.

Aunque la producción secundaria de acero mediante hornos de acero eléctrico (EAF) representa una alternativa menos contaminante, el 70% del acero mundial sigue produciéndose

a través de la ruta primaria (BF-BOF), con una intensidad de carbono de 2,2 t CO₂/t acero, en contraste con las 0,3 t CO₂/t acero del proceso EAF (Deloitte, 2022).

Para lograr la neutralidad climática en 2050, la industria debe adoptar tecnologías disruptivas en tres áreas clave:

- a. reducción de emisiones en la producción primaria y secundaria,
- b. transición energética y electrificación
- c. innovaciones tecnológicas emergentes.

A continuación, se detalla la reducción de emisiones tanto en la producción primaria como en la secundaria, ya que el resto de las áreas se tratarán más adelante en el trabajo con otro enfoque.

Reducción de emisiones en la ruta primaria y secundaria

Las estrategias para reducir las emisiones en la producción de acero varían según el método de producción utilizado.

1. Optimización de la ruta primaria (BF-BOF)

La producción de acero a través de altos hornos (BF) y convertidores de oxígeno (BOF) sigue siendo el método dominante a nivel mundial. Sin embargo, su alto impacto ambiental ha impulsado la adopción de tecnologías de mitigación:

- Captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS): permite capturar el CO₂ generado en el proceso BF-BOF y almacenarlo en formaciones geológicas o reutilizarlo en otros procesos industriales. Si bien puede reducir entre un 50-90% de las emisiones de CO₂, su alto costo y la falta de infraestructura para el almacenamiento masivo representan desafíos significativos (Deloitte, 2022).
- Inyección de biomasa e hidrógeno en altos hornos: sustituir parcialmente el coque por biomasa o hidrógeno puede reducir la dependencia de combustible fósiles. Sin embargo, esta estrategia no elimina por completo las emisiones de carbono y requiere ajustes en los procesos industriales (Deloitte, 2022).

2. Transformación de la ruta secundaria (EAF)

La producción secundaria de acero a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico ya presenta una menor huella de carbono, pero enfrenta barreras estructurales:

- La disponibilidad de chatarra de alta calidad: no toda la chatarra reciclada puede utilizarse para producir acero con las propiedades necesarias para aplicaciones industriales avanzadas, como la automoción y la construcción. (Deloitte, 2022).
- La dependencia de la matriz energética: si bien el proceso EAF emite menos CO₂, su impacto ambiental depende de la fuente de electricidad utilizada. En países donde la generación de electricidad sigue dependiendo de combustible fósiles, la ventaja ambiental de los hornos de arco eléctrico se reduce considerablemente (Deloitte, 2022).

El suministro de energía renovable asequible y accesible es un factor crítico para la descarbonización de la industria siderúrgica. La transición hacia una producción de acero sostenible requiere asegurar una matriz energética libre de carbono y mejorar la eficiencia energética en las plantas de producción, pero tanto la ruta primaria como la secundaria son fuentes de emisión, esto obliga a buscar otras alternativas, como el hidrógeno.

3. Infraestructura para hidrógeno verde

El hidrógeno verde es fundamental para la descarbonización del sector, pero su disponibilidad sigue siendo limitada debido a su alto coste y la falta de infraestructuras para su producción y distribución. Los principales retos incluyen:

- Coste del hidrógeno verde: Actualmente, el hidrógeno producido con electricidad renovable sigue siendo más caro que los combustibles fósiles, lo que dificulta su adopción masiva en la industria siderúrgica (Deloitte, 2022).
- Infraestructura de transporte y almacenamiento. La producción de hidrógeno verde a gran escala requerirá del desarrollo de redes de transporte y almacenamiento seguras y eficientes, lo que supone una inversión significativa (Deloitte, 2022).

Sin embargo, aunque el hidrógeno verde presenta un cambio hacia la descarbonización, la industria siderúrgica debe superar desafíos significativos, como los costes y la infraestructura de transporte y almacenamiento. A pesar de estos retos, la adopción de tecnologías más limpias, como la reducción directa del hidrógeno, abre nuevas oportunidades para las empresas siderúrgicas, las cuales pueden transformar la forma en la que se produce el acero, eliminando las emisiones de CO₂, contribuyendo así a una transición hacia una industria más sostenible.

3.2 Nuevas oportunidades para las empresas siderúrgicas

La industria siderúrgica enfrenta el reto de reducir drásticamente su impacto ambiental, y la adopción del hidrógeno verde como agente reductor en la producción de acero representa una oportunidad clave en este proceso de transformación. A diferencia de los métodos convencionales, la reducción directa del mineral de hierro mediante hidrógeno (H₂-DRI) y su posterior procesamiento en hornos eléctricos de arco (EAF) permite eliminar las emisiones de carbono derivadas del uso de coque en los altos hornos, logrando así una producción prácticamente libre de CO₂.

- Competitividad y viabilidad económica

El desarrollo del acero basado en hidrógeno verde presenta oportunidades estratégicas para las empresas siderúrgicas, especialmente en regiones con abundantes recursos renovables. Si los precios del carbón metalúrgico siguen elevados y se logran avances en la reducción de costos de los electrolizadores y energías renovables, este tipo de producción podría volverse competitivo en ubicaciones favorables a partir de 2030 y mejorar su viabilidad económica para 2050 (Devlin et al., 2023). En particular, la optimización de la cadena de valor con fuentes energéticas limpias podría hacer que la ruta H₂-DRI-EAF sea una alternativa rentable frente a la tradicional BF-BOF.

- Relocalización de emisiones y sostenibilidad

La producción de acero basada en hidrógeno podría provocar una reconfiguración geográfica de la industria siderúrgica. En lugar de depender de las actuales instalaciones de altos hornos, las plantas de producción podrían trasladarse a regiones con una combinación favorable de recursos renovables (solar y eólico) y yacimientos de mineral de hierro de alta calidad. Países como Australia, Sudáfrica y Chile han sido identificando como zonas estratégicas donde la producción de acero basado en hidrógeno podría ser particularmente competitiva debido a su acceso a materias primas y energía renovable abundante (Devlin et al., 2023).

- Reducción de emisiones y sostenibilidad

La adopción del hidrógeno en la producción de acero permitiría reducir las emisiones de CO₂ en un 95% en comparación con el método BF-BOF. Actualmente, la producción tradicional de acero genera aproximadamente 2,2 t CO₂/ t acero, mientras que el uso de hidrógeno podría reducir esta cifra a valores cercanos a 0,1-0,3 t CO₂/t acero (Devlin et al., 2023). Esto

posicionaría el acero verde como una opción clave en la estrategia global de descarbonización industrial.

Las regulaciones climáticas están impulsando cambios en la industria, obligando a los productores de acero a reducir sus emisiones o enfrentar penalizaciones económicas. Iniciativas como el Mecanismo de Ajuste en Frontera de Carbono (CBAM) de la Unión Europea buscan evitar la “fuga de carbono” al aplicar impuestos a productos importados con altas emisiones (Eurofer, 2019). Este tipo de medidas podría aumentar la competitividad del acero verde al establecer un campo de juego más equitativo para los productores que invierten en tecnologías de baja emisión.

No obstante, la adopción del hidrógeno en la siderurgia no está exenta de desafíos. Factores como el alto coste inicial de inversión, la disponibilidad de infraestructuras adecuadas y la estabilidad en el suministro de hidrógeno verde jugarán un papel crucial en la viabilidad a largo plazo de esta tecnología.

- Desafíos y estrategias de implementación

A pesar de sus beneficios, la implementación del hidrógeno verde en la siderurgia enfrenta varios desafíos que las empresas deben abordar:

1. Disponibilidad de mineral de hierro de alta calidad: La reducción directa con hidrógeno requiere un contenido mínimo de 67% Fe, lo que podría generar restricciones en la oferta de materia prima y aumentar la necesidad de tecnologías avanzadas de beneficios del mineral.
2. Infraestructura energética y de almacenamiento: La producción a gran escala de acero con hidrógeno verde depende de una red de transporte y almacenamiento segura y eficiente, así como de una generación masiva de energía renovable para alimentar los electrolizadores.
3. Altos costes iniciales: A pesar de la tendencia a la baja en el costo del hidrógeno verde, su producción sigue siendo más cara que los combustibles fósiles, lo que dificulta su adopción masiva. Se requieren inversiones en tecnología y políticas de incentivo para facilitar su despliegue en la industria siderúrgica (Devlin et al., 2023).

- Creación de un Mercado para el “Acero Verde”

Actualmente, varios sectores industriales están mostrando un creciente interés en este tipo de material. Como ya se ha mencionado previamente, la industria automotriz y de la construcción son algunos de los principales consumidores de acero, y ambos están en proceso de transición hacia prácticas más sostenibles debido a las presiones regulatorias y cambios en la demanda del consumidor (HYBRIT, 2017).

Para que el acero verde tenga un mercado sólido, es necesario desarrollar mecanismos de certificación confiables que eviten el *greenwashing*. Además, la creación de incentivos para su adopción podría acelerar la transición, permitiendo a las empresas acceder a nuevas oportunidades de negocio en un entorno cada vez más enfocado en la sostenibilidad (Feinstein, 2013).

3.3 Reacciones del mercado y oportunidades estratégicas de la industria siderúrgica ante la inversión en hidrógeno verde

El impacto del hidrógeno verde en la industria siderúrgica no solo se limita a la reducción de emisiones, sino que también influye en la percepción de los mercados financieros y en las decisiones estratégicas de inversión. De acuerdo con el estudio de Kinnuen (2023), la inclusión de inversiones en hidrógeno verde dentro del sector siderúrgico ha generado respuestas mixtas en los mercados y entre los analistas financieros. Aunque no se han encontrado efectos estadísticamente significativos en los precios de las acciones tras anuncios de inversión en hidrógeno verde, se han identificado tendencias que sugieren oportunidades estratégicas para las empresas del sector.

- Impacto en los mercados financieros y reacciones de los analistas

Los resultados del estudio de eventos aplicados a las inversiones en hidrógeno verde en la industria siderúrgica europea muestran que los anuncios de inversión en esta tecnología no han generado un impacto inmediato en los precios de las acciones. Sin embargo, los mercados han reaccionado positivamente a los anuncios de cooperación entre empresas en comparación con anuncios de inversión individual. Esto sugiere que los inversores valoran la diversificación de riesgos y la posibilidad de compartir costes en la implementación del hidrógeno verde dentro de la industria del acero (Kinnuen, 2023).

Un factor clave en estas reacciones es la percepción de riesgo por parte de los inversores. La inversión en hidrógeno verde representa un compromiso financiero de largo plazo que requiere una infraestructura costosa y que aún se encuentra en etapas tempranas de maduración tecnológica. A diferencia de sectores como la refinación de petróleo, donde el hidrógeno ha sido utilizado históricamente, en la industria siderúrgica su implementación es relativamente nueva y requiere transformaciones estructurales significativas. Este factor puede explicar por qué los mercados han sido más escépticos ante anuncios de inversión en hidrógeno por parte de empresa siderúrgicas en comparación con aquellas pertenecientes a la industria energética.

Por otro lado, el estudio también reveló que los analistas financieros han tendido a mantener una postura neutral o ligeramente negativa ante inversiones en hidrógeno verde dentro del sector siderúrgico, en contraste con una recepción más positiva en la industria de refinación de petróleo. Esta diferencia puede explicarse por la percepción de que el acero enfrenta mayores barreras tecnológicas y de costos en la implementación de esta nueva tecnología, mientras que en el sector petrolero el hidrógeno verde representa una evolución más natural dentro de sus procesos productivos (Kinnuen, 2023). La falta de cambios significativos en las recomendaciones de los analistas tras anuncios de inversión en hidrógeno verde sugiere que estos consideran que la rentabilidad de estas iniciativas aun es incierta, lo que puede afectar el atractivo de este tipo de inversiones para los inversionistas institucionales.

A pesar de la ausencia de un impacto financiero inmediato en la valorización de las empresas siderúrgicas, existen oportunidades estratégicas a largo plazo que podrían generar ventajas competitivas significativas:

1. Mejor posicionamiento en un mercado en transición

La tendencia global hacia la descarbonización hace que la adopción del hidrógeno verde sea un factor diferenciador en términos de sostenibilidad y regulación ambiental. Empresas siderúrgicas que inviertan en esta transición podrían beneficiarse de incentivos gubernamentales y mejorar su acceso a mercados con regulaciones estrictas en emisiones de carbono (Pei & Petäjaniemi, 2020).

2. Ventajas competitivas frente a clientes y socios comerciales

Compañías del sector automotriz, construcción y manufactura, que buscan reducir la huella de carbono en sus cadenas de suministro, podrían privilegiar la compra de acero producido con tecnologías limpias, lo que convertiría a los fabricantes que adopten el hidrógeno verde en socios estratégicos clave (Pérez, 2021; BMW Group, 2022).

4 Estudio de caso

4.1 Empresa seleccionada

La elección de SSAB como estudio de caso es especialmente relevante, ya que la empresa no solo se ha consolidado como líder en la calidad de su acero dentro de la industria, sino que también ha demostrado un compromiso claro con la sostenibilidad y la innovación. Su estrategia para reducir las emisiones de CO₂ mediante el uso del hidrógeno, su capacidad para transformar el sistema de producción en los países nórdicos, y su reciente lanzamiento de productos como el acero SSAB Zero, posicionan a la compañía como un referente en la implementación de soluciones sostenibles dentro de una industria históricamente contaminante. Además, se ha contado con la ayuda de profesionales de la empresa *Gonvarri Industries* que han recomendado esta empresa, ya que ejemplifica a la perfección lo que se quiere conseguir en esta industria de cara a la descarbonización.

SSAB (Svenskt Stal AB) es una empresa multinacional sueca especializada en la producción de aceros de alta resistencia y soluciones sostenibles para diversas industrias. Fundada en 1987, SSAB ha evolucionado hasta convertirse en un actor clave en el sector siderúrgico, con una fuerte presencia global y un enfoque en la innovación y la sostenibilidad. Tiene su sede en Estocolmo, Suecia (SSAB, 2024).

SSAB ofrece una gama muy amplia de productos de acero reconocidos por su calidad y durabilidad. De entre sus marcas, las que más destacan son las siguientes:

- Hardox: Acero resistente al desgaste utilizado en aplicaciones que requieren alta durabilidad, como en la fabricación de equipos de construcción y minería (SSAB, 2024a)
- Strenx: acero estructural de alta resistencia diseñado para mejorar el rendimiento y la seguridad de las estructuras, permitiendo diseños más ligeros y resistentes (SSAB, 2024b).
- Docol: acero avanzado de alta resistencia (AHSS) desarrollado para la industria automotriz, ofreciendo soluciones para mejorar la seguridad y reducir el peso de los vehículos (SSAB, 2024c)
- GreenCoat: productos de acero con recubrimiento orgánico respetuosos con el medioambiente, utilizados principalmente en aplicaciones de construcción (SSAB, 2024d).

En cuanto a su presencia global, SSAB opera en más de 50 países y cuenta con centros de producción en Suecia, Finlandia y Estados Unidos. Sus principales plantas se encuentran en Lulea, Borlänge y Oxelösund (Suecia); Rahe y Hameenlinna (Finlandia); y Mobile, Alabama y Montpelier, Iowa (Estados Unidos). Esta presencia global le permite atender a una amplia variedad de industrias, incluyendo la automotriz, la construcción y la fabricación de maquinaria pesada (SSAB, 2024e).

4.1.1 Estrategia de Acero Verde

La empresa sueca SSAB ha emergido como líder en la transición hacia una producción de acero sostenible, implementando estrategias innovadoras basadas en el uso de hidrógeno para reducir significativamente sus emisiones de CO₂. Este trabajo analiza la estrategia de SSAB en la utilización del hidrógeno para la descarbonización y justifica la relevancia de estudiar esta empresa en el contexto de un Trabajo de Fin de Grado.

A continuación, se describen las iniciativas planteadas por SSAB para desplegar su estrategia de descarbonización

1. HYBRIT: innovación en la Producción de Acero sin Fósiles

En 2016, SSAB, en colaboración con LKAB y Vattenfall, lanzó la iniciativa HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology), con el objetivo de revolucionar la producción de acero mediante la sustitución del carbón por hidrógeno en el proceso de reducción del mineral del hierro. Esta tecnología innovadora permite producir acero sin emisiones de CO₂, utilizando hidrógeno verde obtenido a partir de fuentes de energía renovables (SSAB, 2021).

En junio de 2021, HYBRIT logró producir el primer hierro esponja reducido con hidrógeno en su planta piloto en Lulea, Suecia. Este avance permitió a SSAB fabricar el primer acero libre de combustibles fósiles, que fue entregado a clientes seleccionados, marcando un hito significativo en la industria siderúrgica (SSAB, 2021).

2. Transformación del Sistema de Producción Nórdico

SSAB ha delineado un plan para transformar su sistema de producción en los países nórdicos, con el objetivo de acelerar la transición hacia una producción de acero libre de combustibles fósiles. Este plan incluye la conversión de las plantas de Lulea (Suecia) y Raahe (Finlandia) en

mini acerías eficientes que operaran con hornos de acero eléctrico alimentados por electricidad libre de fósiles. Se espera que esta transformación reduzca las emisiones de CO₂ en más de 8 millones de toneladas anuales, lo que representa aproximadamente el 10% de las emisiones totales de Suecia y el 7% de las de Finlandia (SSAB, 2022).

3. SSAB Zero

En 2023, SSAB introdujo al mercado SSAB Zero, un acero producido a partir de acero reciclado y fabricado con energía libre de combustibles fósiles. Este producto no recurre a la compensación de emisiones de carbono ni a la asignación de balance de masa de reducciones de emisión, ofreciendo a los clientes una opción de acero con cero emisiones de carbono fósil (SSAB, 2023).

4. Colaboraciones Estratégicas y Reconocimientos

SSAB ha establecido alianzas estratégicas con empresas líderes en diversos sectores para promover el uso de acero libre de fósiles. Por ejemplo, en 2022, entregó acero sin combustibles fósiles a Mercedes-Benz para su uso en piezas prototipo de vehículos, demostrando la aplicabilidad del acero sostenible en la industria automotriz (SSAB, 2022). Además, la Comisión Europea aprobó en octubre de 2024 una ayuda estatal de 128 millones de euros para apoyar a SSAB en su proceso de descarbonización, reconociendo la importancia de sus iniciativas para alcanzar los objetivos del Pacto Verde Europeo (Reuters, 2024).

Para conocer el porqué de estas iniciativas llevadas a cabo por la empresa se van a presentar los beneficios que se esperan al implementar la molécula de hidrógeno en las estrategias corporativas, no solo de esta empresa, sino también de las demás.

4.2 Beneficios esperados

Uno de los beneficios más evidentes y a la vez más relevantes es la reducción significativa de las emisiones de CO₂, un objetivo central para cumplir con los compromisos climáticos internacionales y los estándares de sostenibilidad exigidos por los marcos regulatorios europeos. El hidrógeno verde (producido partir de fuentes renovables mediante electrolisis) actúa como agente reductor en el proceso de obtención del acero, sustituyendo al carbono, que históricamente ha sido el responsable de una gran parte de las emisiones en esta industria (BBVA, 2022).

Además, la adopción de tecnologías basadas en hidrógeno supone una mejora sustancial en la eficiencia energética de los procesos, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y optimizar el uso de electricidad procedente de fuentes renovables. Este cambio no solo permite reducir costes a largo plazo, sino también estabilizar los mismos frentes a la volatilidad del mercado energético global (BBVA, 2022).

Por otro lado, muchas empresas siderúrgicas identifican en esta transición una oportunidad para acceder a nuevos mercados y consolidar su posición competitiva en sectores donde la trazabilidad ambiental y la huella de carbono son factores determinantes en las decisiones de compra. La creciente demanda por parte de clientes industriales (como el sector automovilístico, la construcción o incluso la tecnología) de materiales sostenibles refuerza esta tendencia y sitúa el acero verde como un producto de alto valor añadido (BBVA, 2023).

En Europa, proyectos como el Hydnum Steel en Puertollano están utilizando hidrógeno verde para reducir las emisiones de CO₂ en un 98%, lo que ejemplifica como la adopción del hidrógeno puede generar un cambio radical en la industria (Cadena SER, 2024).

Si le damos un punto de vista más estratégico, la inversión en hidrógeno verde permite a las empresas anticiparse e influir en escenarios futuros normativos y reducir riesgos relacionados con políticas de carbono cada vez más restrictivas. Asimismo, contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y a mejorar la imagen corporativa, lo que se traduce en ventajas reputacionales y un mayor atractivo para inversores institucionales comprometidos con la sostenibilidad (BBVA, 2022).

La capacidad de del hidrógeno para flexibilizar la producción, almacenamiento, transporte y utilización de energía refuerza su papel en la transición energética (GoodNewEnergy, 2024).

En definitiva, el interés de las empresas siderúrgicas en el hidrógeno verde no solo responde a un imperativo ambiental, sino también a una lógica y liderazgo tecnológico. Aquellas que apuestan de forma temprana por este tipo de soluciones se posicionan como pioneras en un mercado global cada vez más exigente, acelerando su transformación hacia un modelo más resiliente, limpio y competitivo (BBVA, 2023).

4.3 Desafíos identificados

Como en todo mercado emergente, también hay dificultades a las que las empresas han de enfrentarse. Este apartado proporciona una perspectiva de algunos de los desafíos que se han identificado de cara al desarrollo de las empresas en este nuevo mercado del hidrógeno verde.

- Costes elevados e incertidumbre respecto a la competitividad del Acero Verde

Uno de los mayores obstáculos para la adopción del acero verde es su coste de producción, que actualmente es entre un 20% y 30% más alto que el del acero tradicional (Muslemani et al., 2021). Esta diferencia se debe principalmente a los elevados costes asociados con las nuevas tecnologías y el uso intensivo de energías renovables en el proceso de producción. Según la Asociación Europea del Acero, se espera que los costes totales de producción aumenten entre un 35% y un 100% por tonelada para 2050 debido a estos factores (Fortune Business Insights, 2025). Sin incentivos adecuados, su adopción podría ser limitada a nichos de mercado dispuestos a pagar un sobreprecio. Además, el mercado del acero verde está en una fase incipiente, con una valoración estimada de 4.160 millones de dólares a finales de 2024 y una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 48,82% proyectada hasta 2033 (Emergen Research, 2024).

- Infraestructura y disponibilidad de Hidrógeno Verde

La producción de acero con hidrógeno requiere una infraestructura de suministro de hidrógeno verde a gran escala. (World Steel Association, 2020). Uno de los desafíos más significativos es el alto coste de construcción de la infraestructura para la producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno verde. La electrolisis, que es el proceso principal para la producción de hidrógeno verde, requiere grandes cantidades de electricidad renovable, lo que implica la construcción de instalaciones de producción de hidrógeno a gran escala. Además, la infraestructura necesaria para transportar y almacenar hidrógeno a alta presión o en estado líquido requiere inversiones sustanciales en redes de tuberías y estaciones de abastecimiento, lo que puede representar costes adicionales muy elevados para los productores de acero (Butler, 2024).

- Certificación y estándares de acero verde

No existe una definición universal sobre que constituye “acero verde”, lo que podría afectar la comparabilidad de los productos (Feinstein, 2013). La creación de certificaciones claras sería

una gran ayuda para la legitimación para la industria y mejorar la transparencia en el mercado, evitando así prácticas habituales como el *greenwashing*.

- Desafíos ambientales

A pesar del potencial del hidrógeno para reducir las emisiones de carbono en la producción de acero, su implementación a gran escala conlleva desafíos ambientales que deben considerarse. La producción, almacenamiento y transporte de hidrogeno, así como su integración en la siderurgia, pueden generar impactos indirectos en el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Los dos principales desafíos ambientales son los siguientes, por lo que se explicarán en detalle para recalcar su relevancia:

1. Huella de carbono en la producción de hidrógeno

Uno de los principales desafíos ambientales radica en la propia producción de hidrogeno. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno producido a nivel mundial es “gris”, es decir, se obtiene a partir del reformado de gas natural, lo que sigue generando emisiones significativas de CO₂ (Muslemani et al., 2021). Para que el hidrógeno contribuya realmente a la descarbonización del acero, debe producirse mediante electrolisis utilizando energía renovable, lo que se conoce como hidrógeno verde. Sin embargo, la disponibilidad de electricidad renovable es limitada y su uso en la producción de hidrógeno compite con otros sectores que también requieren descarbonización (World Steel Association, 2020).

Además, la eficiencia de conversión de energía en el proceso de electrolisis sigue siendo un desafío, ya que se requieren grandes cantidades de electricidad para producir hidrógeno verde.

2. Impacto en el uso del agua

La producción de hidrógeno mediante electrólisis consume grandes volúmenes de agua. Dado que la siderurgia es un sector que ya tienen un alto consumo hídrico, la incorporación de tecnologías de hidrógeno podría exacerbar la presión sobre los recursos de este tipo (European Commission, 2020). Este problema se podría resolver con el uso de fuentes de agua reciclada o desalinizada, pero estas soluciones también requieren energía adicional y pueden aumentar los costes operativos (Muslemani et al., 2021).

5 Conclusiones

En este último apartado se ponen en valor los aprendizajes obtenidos en la elaboración del trabajo y en la labor de investigación hecha para el mismo. Con él, se trata de responder a las cuestiones iniciales planteadas en el trabajo junto con el aprendizaje obtenido.

5.1 El Hidrógeno, ¿Oportunidad o amenaza?

En este punto se va a detallar el análisis tanto de las oportunidades como de las amenazas detectadas en la investigación para la realización de este trabajo.

Como amenaza podemos identificar, las siguientes:

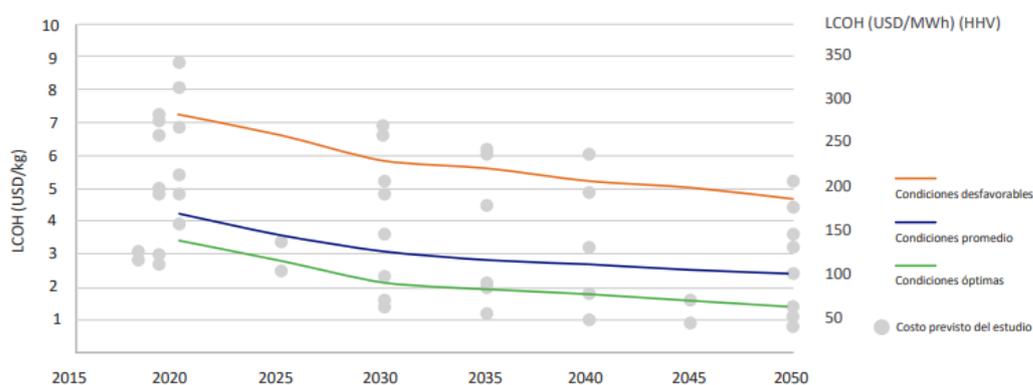
- Costes de Inversión (CAPEX) y Operativos (OPEX)

El hidrógeno tiene una gran ventaja en términos de sostenibilidad, pero su producción es aún costosa en comparación con las fuentes de energía tradicionales. En términos de CAPEX, la infraestructura necesaria para producir hidrógeno verde, que requiere electrólisis a partir de fuentes renovables, es considerablemente más cara que la infraestructura de ellos métodos tradicionales basados en combustibles fósiles. Según la Agencia Internacional de la Energía (2021), los costes de producción del hidrógeno verde oscilan entre 2,7 y 8,8 dólares por kilogramo, siendo mucho más altos que los de hidrógeno producido a partir de gas natural o carbón, que son de aproximadamente 1,0 a 2,5 dólares por kilogramo. Esta diferencia en los costes puede retrasar la adopción del hidrógeno en comparación con fuentes de energía convencionales y representar un obstáculo económico para las empresas y gobiernos.

Además, los OPEX asociados al hidrógeno verde, son también elevados, principalmente debido a la dependencia de fuentes renovables.

Aunque los costes operativos se prevé que disminuyan con el tiempo con la mejora de las tecnologías y la economía de escala, en el corto y medio plazo los costes seguirán siendo un desafío para su adopción a gran escala (*Figura 6*) (World Energy Council, 2021).

Figura 6. Dinámica de los costes del hidrógeno renovable para 2050



Fuente: Consejo Mundial de la Energía

- Incertidumbre en el mercado

A nivel empresarial, las inversiones en infraestructura de hidrógeno requieren un compromiso a largo plazo, mientras que las expectativas de retorno de inversión (ROI) aún no están claras. Además, los precios y la competencia de otras fuentes de energía como la electrificación y la biomasa podrían disminuir la viabilidad económica del hidrógeno, suponiendo una amenaza en términos no solo de aceptación sino también de rentabilidad (El País, 2024).

Como oportunidad, se identifican las siguientes:

- Constituye una alternativa energética y materia prima

El hidrógeno puede ser una fuente primaria en la producción de materias primas como el acero, al permitir una descarbonización de los procesos industriales que tradicionalmente son altamente contaminantes en emisiones de CO₂. Por ejemplo, en la producción de acero el hidrógeno se puede utilizar como agente reductor, sustituyendo al carbono tradicionalmente utilizado en el proceso de fabricación. Esto no solo reduce las emisiones, sino que también diversifica las fuentes de materia prima y aporta un valor significativo al proceso de producción (UNEP FI, 2021).

- Abre el acceso a financiación y subvenciones

Diversas instituciones ofrecen subvenciones y financiamiento para proyectos relacionados con el hidrógeno. En España, el programa H2 Pioneros está financiando proyectos innovadores de

hidrógeno verde con una convocatoria de hasta 150 millones de euros para proyectos con viabilidad comercial.

Asimismo, la Junta de Andalucía ha anunciado la asignación de 400 millones de euros para proyectos que fomenten la sostenibilidad industrial. Estas ayudas lo que permiten a las empresas e industrias emergentes en el sector del hidrógeno es que puedan acceder a financiación en el corto plazo para desarrollar sus proyectos, acelerando su adopción antes de que las subvenciones desaparezcan en el medio plazo (IDAe, 2024).

5.2 Recomendaciones para el sector

En este apartado final se presentan las conclusiones para el sector basadas en el estudio de caso y en lo aprendido en la elaboración del trabajo.

1ª. La primera de las recomendaciones está relacionada con las administraciones públicas y las posibles colaboraciones público-privadas. El mercado del hidrógeno verde, y en especial el mercado en la industria siderúrgica, está en fases iniciales, ya que con los costes de producción tan elevados las empresas no se arriesgan a entrar en el mercado. Aquí es donde las administraciones públicas pueden jugar un papel clave, proporcionando subsidios e incentivos fiscales y garantizar que los proyectos contribuyan a los objetivos climáticos tanto nacionales como europeos. El sector privado puede aportar la innovación, eficiencia y el conocimiento para que ambas partes trabajen mano a mano beneficiándose de este tipo de acuerdos.

2ª. Al apartado anterior, se puede unir como recomendación, la importancia en la investigación en tecnología. Los métodos actuales para la obtención del hidrógeno verde suponen un gran coste de producción, por lo que sería interesante, además de una oportunidad para las empresas, investigar en alternativas más “asequibles”. Como ejemplo podemos mencionar los hornos, como la iniciativa HYBRIT de la empresa SSAB en la que se implementa el hidrógeno para la producción de acero sin emisiones de CO₂ o los electrolizadores, que mediante una corriente eléctrica se descompone la molécula de agua separando el hidrógeno y el oxígeno. Es fundamental que se apueste por la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y una oportunidad también para los gobiernos de brindar su ayuda en este aspecto.

3ª. Otra de las recomendaciones, y es una de las más importantes, es intentar que toda la cadena de valor se comprometa con el acero verde. Lo que se quiere decir con esto es que desde el productor del acero hasta el consumidor final se pongan de acuerdo en que todos los integrantes de la cadena estén dispuestos a la compra o utilización de este acero en sus productos. Esto es esencial puesto que, si el productor paga un sobre coste por que el acero sea verde y alguna de las partes no está dispuesta, el productor podría enfrentar problemas económicos. Por lo tanto, es fundamental fomentar un compromiso común en toda la cadena de valor que garantice que el acero verde sea visto como una opción no solo viable, sino también competitiva para los actores de la misma.

4ª. Por último, se ha de apostar por inversiones a largo plazo y buscar un *Return of Investment* (ROI) a futuro. Las hojas de ruta de las Unión Europea, son con visión a 2050 para alcanzar la neutralidad de emisiones. Esto se traduce en que las inversiones no deben tener un enfoque temporal de corto o medio plazo puesto que los resultados económicos y financieros pueden no acompañar al inicio. Pero viendo las posibilidades que hay en torno a este nuevo mercado de la descarbonización y las oportunidades que el hidrógeno ha concedido a la industria conviene y es recomendable confiar en el proceso y ser paciente con los retornos de las inversiones.

Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

Por la presente, yo, Guillermo Sánchez Carrillo estudiante de Administración y Dirección de Empresas de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "El hidrógeno como oportunidad de negocio en la industria siderúrgica" declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación [el alumno debe mantener solo aquellas en las que se ha usado ChatGPT o similares y borrar el resto. Si no se ha usado ninguna, borrar todas y escribir "no he usado ninguna"]:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. **Referencias:** Usado juntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
3. **Metodólogo:** Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
4. **Estudios multidisciplinares:** Para comprender perspectivas de otras comunidades sobre temas de naturaleza multidisciplinar.
5. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
6. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
7. **Generador de problemas de ejemplo:** Para ilustrar conceptos y técnicas.
8. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
9. **Traductor:** Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 26-03-2025

Firma:



6 Bibliografía

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2021). *The Promise of Carbon-Neutral Steel*. Recuperado de <https://www.iea.org/articles/the-promise-of-carbon-neutral-steel>

ArcelorMittal. (2023). *Annual report 2023*. Recuperado de <https://corporate.arcelormittal.com>

ArcelorMittal. (2023). *ArcelorMittal integrated annual review 2023*. <https://corporate.arcelormittal.com/media/vrqvovnik/arcelor-mittal-integrated-annual-review-2023.pdf>

Ares, J.R., Leardini, F., Sánchez, C., Fernández, J.F y Ferre, I.J.(2019). El hidrógeno como vector energético: mucho hecho pero casi todo por hacer. *Rev. Encuentros Multidisciplinares*. nº 62 mayo-agosto.

Arvidsson, R., Janssen, M., & Svanström, M. (2018). *What is green steel? Investigating the environmental performance of Swedish steel production*. Lund University. Recuperado de https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/66962032/What_is_green_steel_P532.pdf

BBVA. (2022, diciembre 21). *Hidrógeno verde: un aliado sostenible para descarbonizar la industria del acero*. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/hidrogeno-verde-un-aliado-sostenible-para-descarbonizar-la-industria-del-acero/>

BBVA. (2023, febrero 8). *Acero verde: el material que el mundo necesita para seguir creciendo*. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/acero-verde-el-material-que-el-mundo-necesita-para-seguir-creciendo/>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021). *Estrategias para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde*. Recuperado de https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F29082%2F1%2FBCN_Exp_eiencias_comparadas_en_Estrategias_de_desarrollo_del_Hidrogeno_verde_.pdf

BMW Group. (2022). *BMW Group aumenta significativamente el uso de acero con bajo contenido de carbono para la producción en serie de sus plantas europeas*. Recuperado de <https://www.press.bmwgroup.com>

Butler, B. (2024). *Hidrógeno verde: desafío y oportunidad sustentable*. Recuperado de <https://es.linkedin.com/pulse/hidrogeno-verde-desafio-y-oportunidad-sustentable-bernardo-butler-v4bic>

Cadena SER. (2024, octubre 22). *Hydnum Steel se presenta en el Congreso con el apoyo de la Junta de Comunidades*. Recuperado de <https://cadenaser.com/castillalamancha/2024/10/22/hydnum-steel-se-presenta-en-el-congreso-con-el-apoyo-de-la-junta-de-comunidades-ser-ciudad-real/>

- Celsa Group. (2022). *Informe anual 2022*. Recuperado de <https://www.celsa.com>
- Centro Nacional del Hidrógeno, 2024. *El Hidrógeno*, <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- Cepsa. (2022). *Valle Andaluz del Hidrógeno Verde: Hacia una industria libre de carbono*. Recuperado de <https://www.atlanthy.com>
- Cision. (2023, abril 25). *SSAB's Annual and Sustainability Report 2022*. <https://mb.cision.com/Public/980/3947345/8aab378c035efea5.pdf>
- Comisión Europea. (2018). *A clean planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>
- Comisión Europea (2019). *Que es el Pacto Verde Europeo*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/859153/What_is_the_European_Green_Deal_es.pdf
- De Aragón, E (2024). La Comisión Europea aprueba ayuda a Suecia para la planta H2GS. *Hidrógeno Verde*. (2024). Recuperado el 4 de marzo de 2025, de <https://hidrogeno-verde.es/comision-aprueba-ayuda-suecia-planta-h2gs>
- Devlin, A., Kossen, J., Goldie-Jones, H., & Yang, A. (2023). Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. *Nature Communications*, 14(2578). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38123-2>
- El periódico de la energía (10 de marzo 2025). *Aragón se convertirá en el epicentro internacional del hidrógeno..* <https://elperiodicodelaenergia.com/aragon-se-convertira-en-el-epicentro-internacional-del-hidrogeno-del-10-al-14-de-marzo/>
- Enagás (2022). *H2med, primer gran corredor de hidrógeno europeo*. <https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-hidrogeno/h2med/>
- Eurofer. (2019). *Low Carbon Roadmap – Pathways to a CO₂-Neutral European Steel Industry*. <https://www.eurofer.eu/>
- European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* (COM(2020) 301 final). https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/2020_hydrogen_strategy.pdf
- European Commission. (2020). *EU Green Deal: Carbon Border Adjustment Mechanism*. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12228-EU-Green-Deal-carbon-border-adjustment-mechanism_en
- Feinstein, N. (2013). Learning from past mistakes: Future regulation to prevent greenwashing. *BC Environmental Affairs Law Review*, 40, 229-258.

Fortune Business Insights. (2025). *Tamaño, participación y crecimiento del mercado del acero verde*. Recuperado de <https://www.fortunebusinessinsights.com/es/green-steel-market-108711>

Gobierno de Navarra. (2025). *Navarra logra un acuerdo para la construcción de la planta de hidrógeno verde en la Ciudad Agroalimentaria de Tudela*. Recuperado de <https://www.navarra.es/es/-/nota-prensa/navarra-logra-un-acuerdo-para-la-construccion-de-la-planta-de-hidrogeno-verde-en-la-ciudad-agroalimentaria-de-tudela-1>

GoodNewEnergy. (2024). *El potencial del hidrógeno verde en la descarbonización*. Recuperado de <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/potencial-hidrogeno-verde-descarbonizacion/>

Henry, J. (2024, mayo 16). *Decarbonizing iron and steelmaking with green hydrogen*. Hitachi Energy. <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/blogs/2024/05/decarbonizing-iron-and-steelmaking-with-green-hydrogen>

Herradón, B. (2011). *El hidrógeno: ¿futura fuente de energía?*. Química 11, Instituto de Química Orgánica General. CSIC. http://www.quimica2011.es/sites/default/files/el_hidrogeno.pdf

Hutson, M. (2021). *The Promise of Carbon-Neutral Steel*. Science. Recuperado de <https://www.science.org>

HYBRIT. (2017). *Summary of Findings from HYBRIT Pre-feasibility Study 2016-2017*. <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/>

Iberdrola. (2022). *Planta de hidrógeno verde de Puertollano: Un proyecto pionero en Europa*. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>

International Energy Agency (IEA). (2020). *Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking*. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *AFID solutions to decarbonise the steel industry*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Alliance/Files/Publications/AFID_Solutions_decarbonise_steel_industry_2024.pdf?rev=2264e26004674f8d854f0799410353b8

McKinsey & Company. (n.d.). *Decarbonization challenge for steel*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>

Ministerio para la transición energética y el reto demográfico, 2023. *Mecanismo de ajuste en frontera por carbono*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cbam.html>

Muslemani, H., et al. (2021). Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621023453>

Naciones Unidas, 2015. Acuerdo de París. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

Pei, M., & Petäjäniemi, M. (2020). Toward a Fossil Free Future with HYBRIT. *Metals*, 10(7), 972. <https://doi.org/10.3390/met10070972>

Pérez, E. (2021). *Volvo muestra el primer coche con "acero verde" del mundo*. Xataka. Recuperado de <https://www.xataka.com>

Reuters. (2024). *La UE aprueba 139 millones de dólares de ayuda sueca para ayudar a la siderúrgica SSAB a descarbonizarse*. Recuperado de <https://www.reuters.com/sustainability/eu-approves-139-mln-swedish-aid-help-steelmaker-ssab-decarbonise-2024-10-21/>

Reuters. (2024). *Las grandes siderúrgicas no logran hacer la transición a las energías renovables, según una encuesta*. Recuperado de <https://www.reuters.com/business/big-steelmakers-failing-make-switch-renewables-survey-shows-2024-11-29/>

Roland Berger. (2020). *The future of steelmaking: How the European steel industry can achieve carbon neutrality*. https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_future_of_steel_making.pdf

SSAB. (2021). *SSAB ofrece el primer acero libre de combustibles fósiles del mundo*. Recuperado de <https://www.ssab.com/es-mx/noticias/2021/08/ssab-ofrece-el-primer-acero-libre-de-combustibles-f%C3%B3siles-del-mundo>

SSAB. (2022). *SSAB planea un nuevo sistema de producción nórdico y adelantar la transición verde*. Recuperado de <https://www.ssab.com/es-mx/noticias/2022/01/ssab-plans-a-new-nordic-production-system-and-to-bring-forward-the-green-transition>

SSAB. (2023). *SSAB lanza el nuevo acero de cero emisiones SSAB Zero™*. Recuperado de <https://www.ssab.com/es-mx/noticias/2023/03/ssab-lanza-el-nuevo-acero-de-cero-emisiones-ssab-zero>

SSAB. (2023). *Annual report 2023*. Recuperado de <https://www.ssab.com>

SSAB. (2024a). *Hardox: Acero resistente al desgaste*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/hardox/programa-de-producto/450>

SSAB. (2024b). *Strenx: Acero estructural de alta resistencia*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/strenx/strenx-for-lifting/forestry-cranes>

SSAB. (2024c). *Docol: Aceros avanzados para automoción*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/aceros-ahss-personalizados-para-de-automocion>

SSAB. (2024d). *GreenCoat: Aceros recubiertos ecológicos*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <https://www.ssab.com>

SSAB. (2024e). *SSAB: Presencia global*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de <https://www.ssab.com>

Steinberg, F, Feas, E y Lázaro, L. (2023). El “arancel al carbono (CBAM)”: ¿proteccionismo verde o liderazgo global contra el cambio climático?, *ARI. Real Instituto Elcano*. 15/2023, 13 de marzo de 2023

ThyssenKrupp. (2023). *Annual report 2023*. Recuperado de <https://www.thyssenkrupp.com/en>

Thyssenkrupp AG. (2024). *Annual report 2023-2024*. https://d2zo35mdb530wx.cloudfront.net/_binary/thyssenkruppAGReport/354e8b26-9f91-40f1-80cf-91207a65c9d0/Annual-report_2023-2024.pdf

Transition Accelerator. (2021). *Hydrogen and the decarbonization of steel production in Canada*. Transition Accelerator. <https://transitionaccelerator.ca/reports/hydrogen-and-the-decarbonization-of-steel-production-in-canada/>

Villar, J. A. (2014). *Aprovechamiento del calor residual en industrias de proceso continuo y su aplicación en productos intermedios de acería*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/27615>

World Energy Council. (2021). *Hidrógeno en el horizonte: ¿Preparados, listos, ya? Estrategias nacionales sobre hidrógeno*. Recuperado de https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021_SPANISH.pdf?v=1646390953

Yilmaz, S., & Kayfeci, M. (2022). Decarbonization of the steel industry: A techno-economic and environmental analysis of hydrogen-based direct reduction. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131556>