

La eliminación del carbono en la producción de acero

Ante los desafíos que enfrentará el mundo en los próximos 30 años, es necesario reflexionar sobre las implicaciones que debe representar el cambio de paradigma en la industria para la producción de acero verde en los diferentes escenarios socioeconómicos. Al plantear la discusión de un movimiento que ya ha comenzado en países, como Estados Unidos, China, Alemania, Francia, Japón y Suecia, el Prof. Dr. Augusto Oliveira, Director Ejecutivo de NODE Ingeniería de Productos y Procesos, presenta la importancia y relevancia de los cambios profundos y los retos que enfrentará el sector para su adaptación hasta el 2050. El experto muestra, a través de diferentes iniciativas, como el acero verde y la eliminación del carbono fósil como agente reductor también pueden ser responsables del cambio en los procesos actuales de reducción del óxido de hierro.

En “El Acero Verde: El paradigma de la descarbonización profunda del acero”, el profesor aborda las dificultades e impactos en términos de producción, comercialización y competitividad, entre otros aspectos, además de enriquecer la discusión con la descripción del proceso de reducción de óxidos en hornos verticales por medio del hidrógeno. El artículo es de lectura obligatoria para comprender por qué la ruta del hidrógeno está recibiendo atención, así como el papel de la electrificación de la sociedad y de las transformaciones en cuanto al potencial de reducción de emisiones de CO₂.

El Acero Verde: El paradigma de la descarbonización profunda del acero

Por el Prof. Dr. Augusto Oliveira

Director Ejecutivo de NODE Ingeniería de Productos y Procesos

Debido al acuerdo de París (2015) y la nueva realidad impuesta por la pandemia global (2020) que demostró para los más escépticos que vivimos en una aldea interconectada no solo por el libre comercio, sino también por comunicaciones y transportes cada vez más eficientes, la sociedad se ve obligada a incrementar, cada vez más, sus virtudes para proteger el planeta y sus habitantes, sin obstaculizar, ni siquiera frenar, el avance de las economías emergentes. En el caso del calentamiento global, los objetivos establecidos por el acuerdo de París definen que la industria siderúrgica europea debe reducir sus emisiones a cero en 2050 [1].

Estos objetivos son ambiciosos para este siglo y podrían significar un cambio profundo en el paradigma mundial de la producción de hierro y acero. El acero es uno de los materiales más importantes y relevantes para toda la sociedad moderna, sin embargo, incluso con toda esta relevancia, es responsable del 7% del CO₂ global. Estamos viviendo y aprendiendo con el escenario actual el concepto de estabilidad. En verdad, la sociedad se enfrenta al hecho de que vivimos en un universo notablemente transitorio y, eso sí, debemos ser diligentes en la búsqueda de nuevas formas de redescubrir cómo producimos y vivimos. En el sector siderúrgico, una industria básica y notablemente compuesta por grandes jugadores, mencionando que cualquier optimización requiere un uso intensivo de capital, estamos viviendo su búsqueda por la reducción de emisiones de CO₂, ya sea aplicando el concepto de descarbonización profunda, con el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la

electricidad o el hidrógeno, o incluso optimizando el límite de la técnica actual del parque, como es el caso de los grandes Altos Hornos [1].

Este artículo es una invitación para usted, lector consciente y responsable de sus derechos y deberes, a ser también un agente de transformación en lo que respecta a la ambición de incrementar la protección ambiental, reduciendo la generación de CO₂ y, también con el aumento de la productividad y competitividad. Esta ambición, en un principio, parece estar lejos de lograrse, o incluso, que no hay solución a este problema de múltiples variables. Aunque este sea su pensamiento inicial, este artículo le hará reflexionar sobre el escenario actual de la producción de **Acero Verde** y sus implicaciones para los próximos 30 años (escenario 2050).

Destaco aquí, una vez más, con la certeza de su entendimiento, que este movimiento de **Acero Verde** ya ha comenzado en varios países, entre los que destacan Suecia, Alemania, Francia, China, Estados Unidos y Japón, detallar todos los casos e iniciativas en este breve artículo sería una tarea tortuosa y va más allá de nuestra ambición. Al contrario, presentaremos, de forma breve y amena, la iniciativa sueca con el proyecto **HYBRIT**, la metalurgia de la reducción con el uso de hidrógeno y el escenario actual de China. Veremos que el advenimiento de **Acero Verde** y la eliminación del carbono de origen fósil como agente reductor también puede ser responsable del cambio de paradigma en los procesos actuales de reducción de óxido de hierro.

Sabemos que este artículo está limitado en su alcance y ámbito de aplicación. No obstante, nuestro objetivo se habrá cumplido si se trata de un medio para concienciar a todos los profesionales del sector siderúrgico de la importancia y relevancia de las profundas transformaciones y retos que afrontará el sector para su adaptación al 2050. Finalmente, vale la pena mencionar, para el lector más voraz, que la literatura es muy rica en el tema. Sin embargo, es evidente que el tema **Acero Verde** se trata en varios ámbitos y bajo numerosos puntos importantes para la sociedad presente y futura.

Este hecho se justifica porque es un nuevo paradigma y, esto, provoca que se observen impactos en los más diversos sectores. En este artículo, basado en discusiones del proyecto **HYBRIT**, se abordarán brevemente las dificultades e impactos en materia de producción, comercialización, competitividad, etc. La discusión técnica, a su vez, se enriquece con la descripción de la metalurgia para reducir los óxidos de hierro en hornos verticales con el uso de hidrógeno obtenido por proceso de electrólisis. La discusión técnica cubre la comparación con el proceso actual que utiliza gas de síntesis (syngas / CO). Con esta metodología pretendemos representar una figura general en la situación política actual de la temática y, además, no menos importante, técnica.

EL PROYECTO HYBRIT - ¿QUÉ YA NOS ESTÁ ENSEÑANDO?

Primero debemos entender que es **HYBRIT** y su origen. **HYBRIT** significa *Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology* que se podría traducir técnicamente como *Tecnología de fabricación de hierro disruptiva basada en hidrógeno*. El término fue acuñado por tres empresas suecas en 2016, a saber: **LKAB** (El mineral de hierro), **SSAB** (fabricante de acero) y **Vattenfall** (concesionaria de energía), para apoyar el desarrollo de una nueva ruta de producción de hierro sin el uso de combustibles fósiles. Esta ruta también definió el uso de

equipos con tecnología consolidada en el sector siderúrgico, como los hornos verticales de reducción directa y los hornos de arco eléctrico (ruta **HDR-EAF**). De particular relevancia e importancia, este concepto define que el hidrógeno debe producirse por electrólisis y el uso de electricidad de fuentes limpias y renovables, como las turbinas eólicas.

El trabajo realizado por las empresas suecas es importante y relevante no solo por el aspecto técnico de reunir las tecnologías actuales bajo un nuevo paradigma, sino que aporta información de notable relevancia para la discusión de estrategias industriales en los escenarios empresarial, público y político sobre la profunda descarbonización de la siderurgia. Finalmente, agrega que la nueva ruta también es prometedora desde el punto de vista de la competitividad de costos (en comparación con la ruta **BF-BOF-CCS**), aunque depende en gran medida de los costos de generación de electricidad y de las políticas sobre los valores de los créditos de carbono.

La ruta **HDR-EAF** fue definida por el proyecto **HYBRIT** debido a la alta flexibilidad con respecto a la posibilidad de almacenamiento simultáneo de H₂ e incluso briquetas de hierro. Esto permite igualar la producción de acero con la generación de energía eléctrica y el equilibrio de la red tanto para el proceso de electrólisis como para el proceso EAF o producción de acero [1].

Proponentes de proyectos **HYBRIT** son categóricos al decir que el riesgo de implementar la ruta **HDR-EAF** no es técnico, incluso si impacta directamente en el suministro de gases a otros procesos de la acería integrada, como los hornos de recalentamiento para líneas de laminación en caliente y recocido. Sin mencionar, aún, la necesidad de agregar una fuente de carbono al acero, que en este caso sería importante vía biomasa o gas de síntesis con CO/CO₂ también obtenido por electrólisis. Por el contrario, señalan la necesidad de políticas públicas para financiar la transición a la descarbonización, sin mencionar siquiera la evolución de los mercados en materia de precios del carbono y la energía [1].

El proceso de transición se regirá por marcos de políticas relacionados con el clima y la energía, la innovación y la industria, además del comercio internacional. Respecto al valor inicial del **Acero Verde**, inicialmente será más caro entre un 20-30% en comparación con la ruta BF-BOF. Por lo tanto, la transición debe ser mucho mayor que técnica. La condición técnica es, en este caso, *conditio sine qua non*. Con todo el tema técnico igualado, la transición aún enfrentará la lucha comercial, donde veremos quién estará dispuesto a pagar la prima más alta por el **Acero verde**.

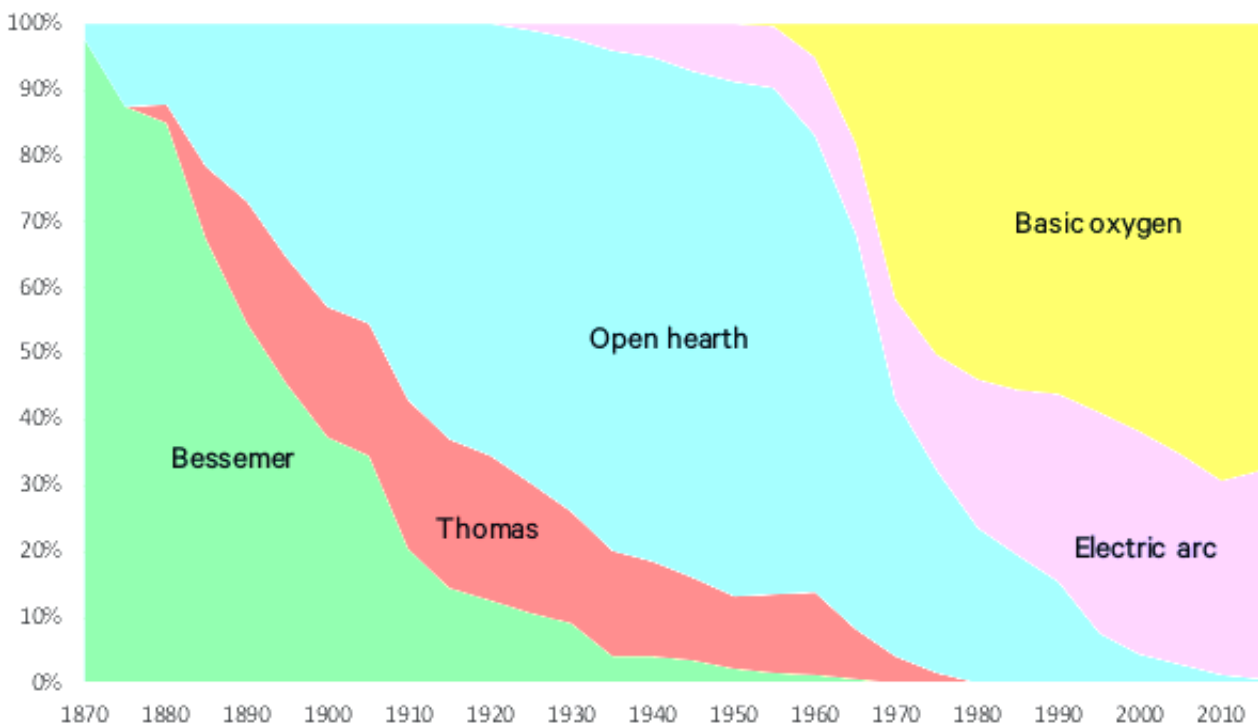
Según el proyecto **HYBRIT** esto podría ser real si las empresas incluyen la marca del producto en sus planes de desarrollo de productos. **Acero Verde** y sus beneficios para las próximas generaciones. Obviamente, los países de Europa también tienen la ambición de liderazgo ambiental global y liderazgo tecnológico con respecto a la producción y comercialización de **Acero Verde**. En definitiva, trajo al mundo su ventaja competitiva y la comercialización de esta tecnología al resto de continentes [1].

Cabe señalar que la transición a la disponibilidad de **Acero Verde** tiene una base sólida en la evidencia sobre el proceso de electrificación de la sociedad moderna. Cabe destacar la reducción acelerada del costo asociado de las energías renovables como: solar fotovoltaica (PV), aerogeneradores y baterías de iones de litio. Así, existe un optimismo con respecto a

la generación de electricidad renovable, por ejemplo, con la adopción de vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento [1].

El análisis de los cambios en el sector del acero muestra que sus modificaciones fueron lentos y alentados por el desarrollo de nuevas tecnologías patentadas. Por ejemplo, el paradigma de la producción de acero ha sido profundamente alterado por el advenimiento del proceso LD (BOF - *Basic Oxygen Furnace*) y el horno de arco eléctrico en los años sesenta y setenta. La **Figura 1** muestra esta transición tecnológica.

Figure 1. Percentages of global steelmaking processes 1870-2015.



Adapted with permission from Jernkontoret (2016) based on data from the World Steel Association.

Figura 1 - Participación mundial de la tecnología de producción de acero desde 1870 hasta 2015 [1].

Incluso con el avance de la metalurgia del acero, también se observa que se ha avanzado poco hacia el desarrollo del área de la metalurgia de reducción de hierro. Este hecho se ve corroborado por la dependencia de los procesos BOF/EAF de los Altos Hornos, que actualmente representan el 95% de la producción mundial de acero virgen o primario. El volumen restante (5%) se obtiene mediante reducción directa y es un proceso flexible para la asignación de capital y escalabilidad, sin embargo, a menudo asociado a la disponibilidad local de gas natural. De esta forma, la transición a **Acero Verde** a escala global requerirá no solo la implementación del nuevo paradigma de ruta **HDR-EAF**, sino también medidas incrementales en BF's de todo el mundo para que sus niveles de emisión se mitiguen mediante **CCS/CCU** (es decir, *Carbon Capture and Storage* y *Carbon Capture and Use*) [1]. En caso del **Acero Verde** la transición debe estar respaldada por políticas públicas de reducción de emisiones y, aun así, con empresas que utilizan cada vez más el **marketing verde** por su promoción de valor y venta de productos y procesos. Sin embargo, actualmente, parece que el **marketing verde** ya lo han adoptado las empresas que utilizan

acero y, al contrario, no así tan ampliamente por las plantas que lo producen. De esta forma, la evaluación integrada bajo el aspecto de sostenibilidad será cada vez más importante y evaluada por los consumidores finales.

Una vez que el acero entra en la base de composición de precios de varios productos, su aumento de precio (**Acero Verde**) podría justificarse de forma integrada en el producto final. En cuanto a las políticas públicas, sabiendo que el acero es un producto de comercio internacional, deben considerar el concepto de **Fuga de carbono** para no reducir la competitividad de los productores de **Acero Verde**. Por ejemplo, la imposición de multas a las acerías que no mitigan su CO₂ podría resultar en la transferencia de instalaciones a otros países/jurisdicciones. Así, asegurar el acuerdo de París (como compromiso legal) debería ser un factor que se analice profundamente para la competitividad futura. Esta discusión es amplia, compleja, pero sin embargo importante, donde sus detalles se aprecian mejor en [1]. La producción actual de acero se lleva a cabo extrayendo el mineral de hierro y luego reduciéndolo con un agente reductor a base de carbono para eliminar el oxígeno. Este proceso se puede llevar a cabo mediante el proceso BF o reducción directa/EAF. La **Figura 2** describe ambas rutas [1].

Figure 2. From iron ore to finished steel – the most common routes

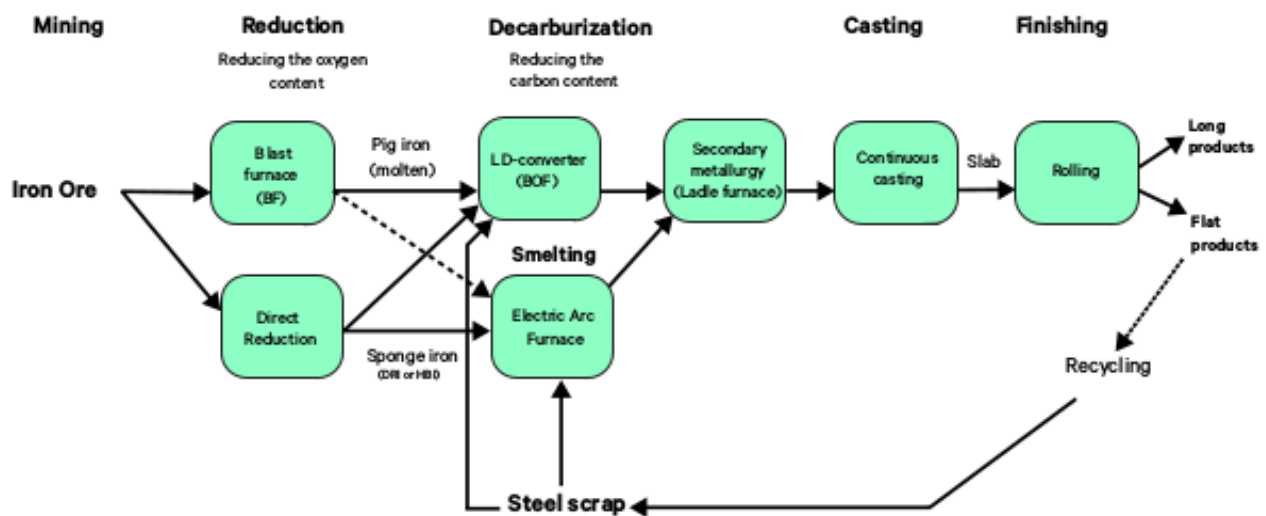


Figura 2 - Rutas actuales para la producción de acero [1].

Brevemente, el hierro se obtiene durante la fase de metalurgia de reducción. En ruta **BF** se produce arrabio o *Pig Iron*. En ruta **DRI/EAF** el hierro esponja se produce en estado sólido, donde se funde con la ayuda de **EAF**. Obviamente, la metalurgia del acero (refinado de hierro líquido) se realiza mediante varios equipos (incluso metalurgia secundaria) y es adecuada para la ruta específica. Finalmente, el acero líquido se cuela continuamente y se somete a procesos de laminación para la producción de productos planos o largos. En este punto, vale la pena señalar que el mercado de consumo final, hoy, ve poco sobre los procesos que constituyen el *Upstream*. Salvo solo unas pocas aplicaciones que definen el tipo de desoxidación en la ruta **BF-BOF**, los consumidores compran acero con base en normas técnicas que generalmente definen la composición química y las propiedades mecánicas, sin siquiera mencionar las características geométricas y de forma.

Pueden existir requisitos adicionales, pero no es común definir la ruta que dio origen al acero. Esto puede obstaculizar la competencia y la transición a **Acero Verde**. Una vez que se cumplen los requisitos reglamentarios finales, los requisitos ambientales que respaldaron esa fabricación se pierden en la aplicación final. Quizás este sea un cambio sistémico importante para permitir y fomentar la adopción de **Acero verde**. Sin embargo, esto no depende exclusivamente de las acerías. De manera integrada, el establecimiento, por ejemplo, de Declaraciones Ambientales de Producto o (EPDs - *Environmental Product Declarations*) [1].

La ruta **HDR-EAF** propuesta en el proyecto **HYBRIT** se basa en el uso de H_2 como agente reductor de óxido de hierro, utilizando fuentes renovables para la generación de electricidad. Así, el gas emitido es agua en lugar de CO_2 . El proceso **HDR** produce, como se detallará, el hierro esponja sólido donde luego debe fundirse en el **EAF**. La diferencia fundamental con los hornos de reducción directa actuales es el intercambio de gas reductor, es decir, gas natural por hidrógeno. Al principio, este cambio puede parecer listo y rápido, pero la integración del proceso **HDR** con la generación de H_2 / la red eléctrica depende de la integración de sistemas, sin mencionar la restricción al uso de fuentes renovables.

La ruta también debería prever la introducción de carbono requerida por las diversas especificaciones de acero. Así, en particular, toda la gama de productos finales debe recalificarse o incluso volverse a desarrollar para adaptarse a la nueva ruta de producción de hierro. Este es un trabajo desafiante que el proyecto **HYBRIT** está llevando a cabo en su fase piloto de implementación. En cuanto a la fuente de carbono exógeno, aún no está definida, pero sin duda contará con el uso de biomasa para mantener la neutralidad de las emisiones de CO_2 [2].

Como desafío, todavía tenemos una demanda creciente de electricidad. Se utiliza energía eléctrica para generar H_2 y se genera el oxígeno del coproducto. Según el proyecto **HYBRIT**, el consumo es de 3,48 megavatios hora (MWh) de electricidad por tonelada de acero líquido y el consumo de mineral de hierro es de 1,5 t [1]. Este valor se puede comparar con la ruta **BF** que es 4,16 MWh de coque para reducir la misma cantidad de mineral. Por lo tanto, si toda la energía eléctrica utilizada en la red es limpia, el acero se puede producir prácticamente sin CO_2 [2].

Cuando el concepto **HYBRIT** se compara con las plantas integradas y con la ruta **BF-BOF** se puede decir que esto implicaría cambios profundos en la metalurgia de reducción y ajuste en la metalurgia del acero. En cuanto a la metalurgia de reducción, ya no serían necesarios los equipos de la planta de Alto Horno y Coque. Además de la posible reducción de CO_2 , lo cual es beneficioso, aún tendríamos la no generación de gases de altos hornos y coquerías, que son importantes en el balance energético de la planta integrada. En este caso, el balance se podría realizar quemando biomasa [1,2].

La **figura 3** presenta el flujo de proceso propuesto para la planta integrado en el concepto **HYBRIT**.

Figure 3. Suggested flowsheet for hydrogen direct reduction process. (Vogl et al 2018)

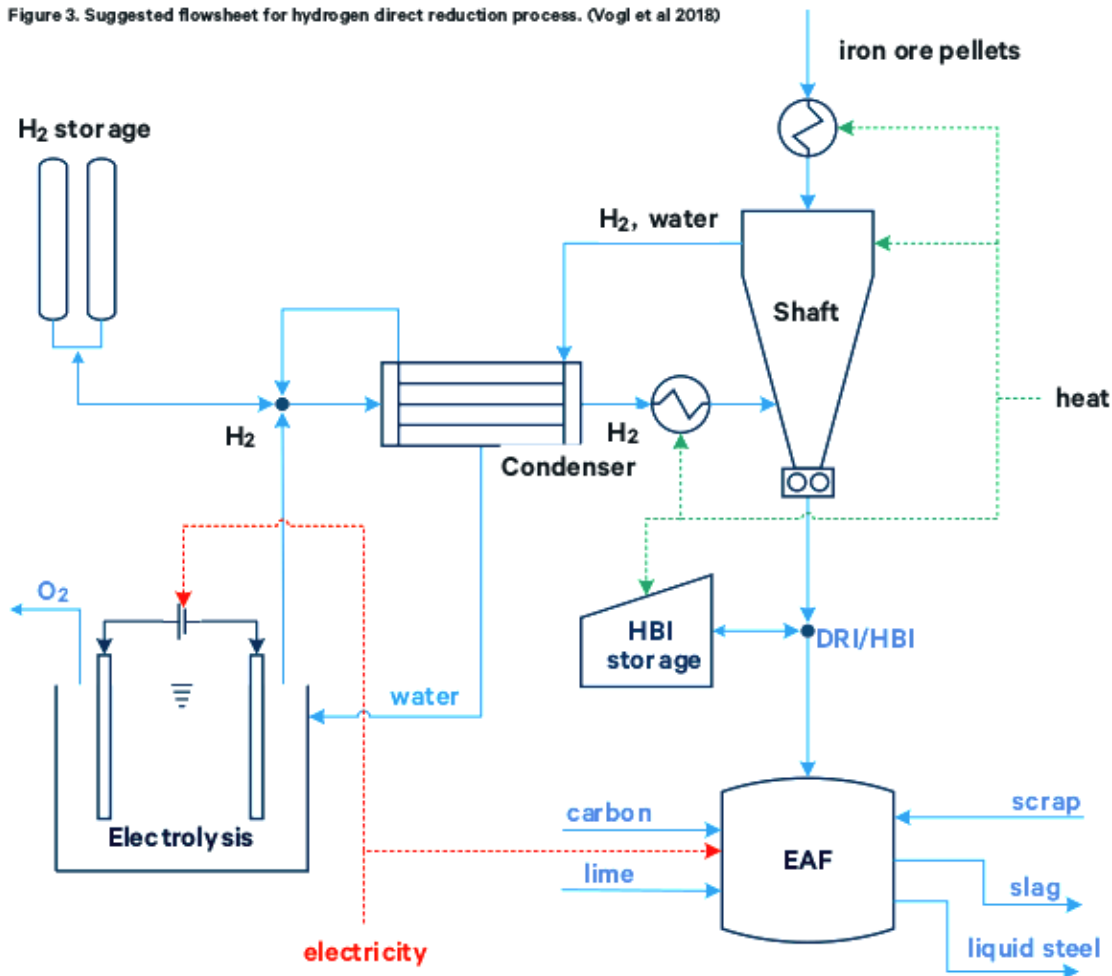


Figura 3 - Flow propuesto para la producción de hierro primario bajo el concepto HYBRIT [1,2].

Bajo la configuración propuesta en **Figura 3** los desarrolladores de **HYBRIT** estiman que el precio de **Acero Verde** será mayor (estimación 2018) entre un 20-30% de lo producido en la ruta **BF-BOF**, sin mencionar siquiera su alta dependencia del precio de la electricidad. Además, informan que un valor de tarifa de CO₂ entre 40-60 € / t podría permitir el desarrollo comercial de la nueva ruta **HDR-EAF**.

Debido al complejo escenario, los desarrolladores del proyecto **HYBRIT** estructuraron las cuestiones que rodean la implementación del concepto en 3 frentes: **(i) tecno-económico, (ii) mercado/cambios y (iii) pre-acondicionamiento político**. Toda esta discusión se puede estudiar y evaluar mejor a tiempo en las referencias [1, 2].

La situación en julio de 2020 del proyecto **HYBRIT** se puede evaluar en [2]. La **Figura 4** muestra las fases de diseño, y la fase de diseño y construcción de la planta piloto ya está en marcha. Paralelamente, se están realizando estudios para definir el tamaño de la planta de demostración (fase prevista para 2025). La referencia [2] describe en detalle todas las premisas y supuestos que justifican la toma de decisiones para la siguiente fase de demostración.

El concepto básico de la fabricación de hierro con hidrógeno es reemplazar el agente reductor de carbono, donde se intercambia la emisión de **CO₂** por vapor de agua. Las ecuaciones de reducción para el carbono y el hidrógeno se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1 - Valores de las entalpías de reducción de los distintos óxidos de hierro. El signo menos (-) indica una reacción exotérmica [3].

Table 4. Heat values of the reduction reactions. A minus sign indicates an exothermic reaction.

Reaction	$\Delta_r H_{800^\circ C} \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$
$3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 = 2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-6020
$3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	-40,040
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3 \text{ FeO} + \text{H}_2\text{O}$	46,640
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3 \text{ FeO} + \text{CO}_2$	18,000
$\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	16,410
$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	-17,610

La pregunta que surge entonces de este reemplazo directo es si sería viable para el alto horno. Para la inyección de carbón realizada por el sistema de carbón pulverizado la respuesta es **sí**. Sin embargo, la sustitución del coque no es viable debido al funcionamiento del sistema a contracorriente que utiliza el Alto Horno, que necesita una carga sólida para su correcto flujo de sólidos y gaseosos [3].

Para el alto horno, el beneficio integrado de usar H_2 puede llegar al 20%. Por otro lado, en el proceso de reducción directa, la sustitución de carbono puede llegar al 100% (al ejemplo del proyecto **HYBRIT**). En este punto cabe destacar que también se encuentran en marcha proyectos de reducción directa de mineral de hierro por electrólisis, donde uno de ellos es liderado por la empresa **Boston Metal** empleando tecnología MOE (*Metal Oxide Electrolysis*) [4]. Esperamos, muy pronto, describir en detalle la metalurgia de reducción involucrada en el proceso del MOE de una manera didáctica e integral.

La ruta **HDR-EAF** se puede comparar con las rutas actuales BF-BOF y DRI-EAF (gas natural) al evaluar la demanda de energía y las emisiones de CO_2 . La **Tabla 2** muestra esta comparativa y confirma el cambio de nivel tecnológico para la reducción realizada con H_2 .

Tabla 2 - Requerimiento de energía y emisión de CO_2 para varias rutas de producción de hierro y acero. Las referencias se describen en [3].

Table 1. Energy and CO_2 emissions of various steelmaking routes.

Route	Energy Needed		CO_2 Emissions	
Standard BF-BOF route	18.8 GJ/t _{HRC} (mostly coal)	[14]	1850 kg _{CO₂eq} /t _{HRC}	[14]
Direct reduction + EAF	15.6 GJ/t _{HRC} (gas and electricity)	[14]	970 kg _{CO₂eq} /t _{HRC}	[14]
	15.4 GJ/t _{HRC}	[15]	196 kg _{CO₂eq} /t _{HRC}	[15]
Hydrogen-based route	14.7 GJ/t _{LS} (mostly electricity)	[1]	25 kg _{CO₂eq} /t _{LS}	[1]
	13.3 GJ/t _{LS}	[8]	53 kg _{CO₂eq} /t _{LS}	[8]

Abbreviations: BF: blast furnace; BOF: basic oxygen furnace; HRC: hot rolled coil; EAF: electric arc furnace; LS: liquid steel.

El consumo energético de las rutas que utilizan gas es menor, ya sea con CO o con H₂. Sin embargo, hay un cambio profundo en el CO₂. Procesos que utilizan H₂ permiten reducir la emisión de CO₂ en un 90% (entre 25 y 196 kg de CO₂ por tonelada de bobina laminada en caliente producida/acero líquido).

Las diferencias entre las fuentes se deben a los sistemas y supuestos considerados, sin embargo, no impiden la determinación del marco general de reducción significativa de emisiones de CO₂. La gran pregunta técnica que surge entonces es: El proceso **H-DRI** ¿podrá metalizar el mineral de hierro de la misma forma que los procesos actuales utilizando hornos verticales? Obviamente, ¿sin tener en cuenta el menor contenido de carbono en el producto final? La respuesta es la implementación real de la planta piloto (*p.ej*, **HYBRIT**) o por modelización matemática del reactor de reducción directa.

Hay varios artículos que modelan el reactor vertical, sin embargo, ninguno con la operación usando H₂ puro. Este modelado es detallado por [3] y presentado aquí de forma didáctica. El modelo es bidimensional y los resultados presentados están en régimen estacionario. La **Tabla 3** muestra los parámetros usados para la simulación del reactor usando H₂ puro.

Tabla 3 - Condiciones operativas implementadas en el modelo de reducción de hidrógeno [3].

Table 2. Main operating conditions for the reference simulation.

Shaft	Height = 6 m	Radius = 3.3 m	
Pellets	CVRD-DR	Diameter = 14 mm	Porosity = 0.33
Inlet solid	Fe ₂ O ₃	Flowrate = 52 kg s ⁻¹	Temperature = 25 °C
Inlet gas	98%H ₂ , 2%H ₂ O	Lateral flowrate = 3634 mol s ⁻¹ Bottom flowrate = 100 mol s ⁻¹	Temperature = 800 °C

Los resultados de este modelo se presentan en la **Figura 5**.

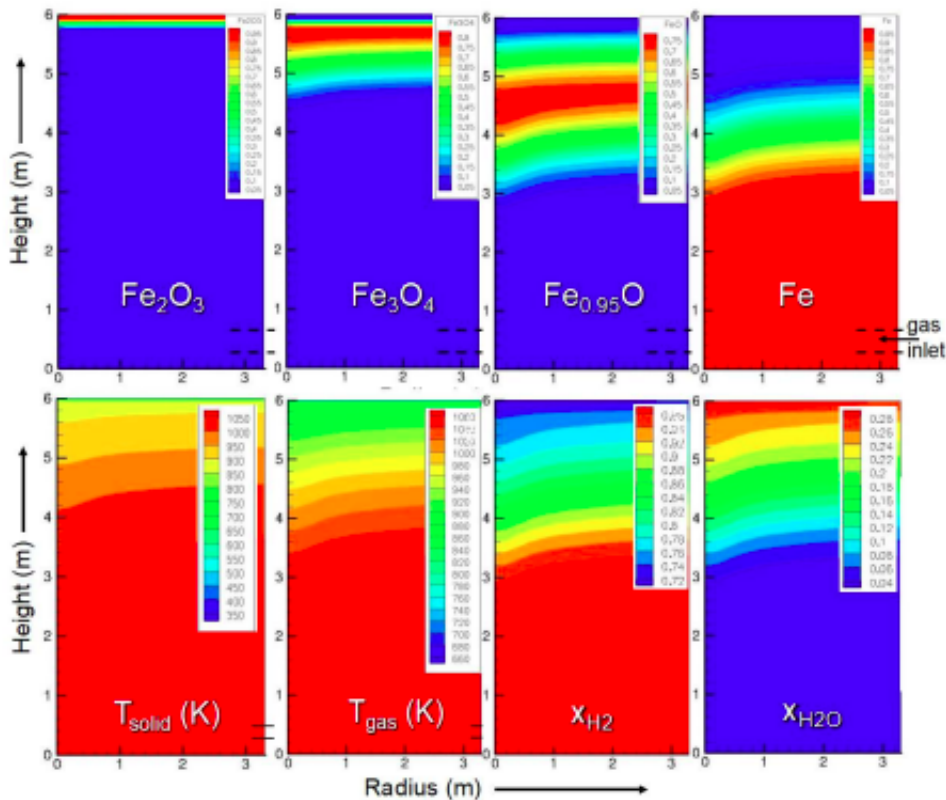


Figure 3. Main results of the shaft model. The calculations were performed under the conditions given in Table 1. Top row: solid mass fractions; bottom row: solid and gas temperatures, gas molar fractions in H₂ and H₂O. The symmetry axis is on the left-hand side of each map, and the wall is on the right-hand side. The main gas inlet is at the wall near the bottom of the reactor.

Figura 5 - Resultados de la reducción por hidrógeno puro. La fila superior muestra las fracciones de masa de los componentes de Fe₂O₃, Fe₃O₄, Fe_{0,95}O y Fe. La línea inferior muestra la temperatura del sólido y el gas, además de las fracciones molares de H₂ y H₂O.

Cuando se evalúan las fracciones de sólidos, se observa que la hematita (Fe₂O₃) se convierte rápidamente en magnetita (Fe₃O₄). La reducción luego procede más lentamente a Wustita (Fe_{0,95}O). Los comportamientos específicos del hidrógeno se producen debido a la existencia de reacciones endotérmicas. Un análisis más detallado debe tener esto en cuenta al realizar un análisis de correlación directa con el proceso vía CO. Aun así, se puede observar que las condiciones termodinámicas y cinéticas del reactor fueron suficientes para producir hierro metálico con una fracción del 100% en la base del reactor (3-4 metros de la altura del reactor) [3].

Los autores [3] también evaluaron el efecto de la temperatura del gas de admisión sobre la fracción de masa de Fe. Para la temperatura de 700°C hay un alto gradiente radial con solo un 70% de formación de hierro. Para temperaturas más altas la reacción es más rápida y se obtienen fracciones de 100% de hierro en menos de 2 m de altura del reactor, lo que confirma la capacidad de metalización del reactor. La **Figura 6** muestra el efecto de la temperatura de entrada del gas sobre la fracción másica de hierro.

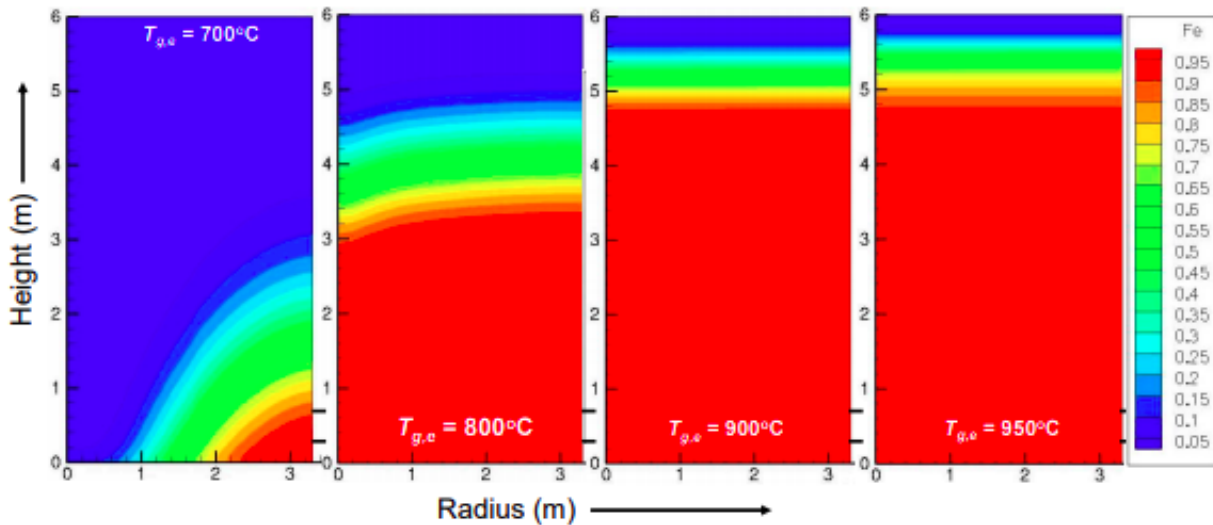


Figure 4. Calculated influence of the inlet gas temperature on the iron mass fraction.

Figura 6 - Influencia de la temperatura del gas de admisión sobre la fracción másica de hierro [3].

De acuerdo con la vasta literatura para la reducción de óxidos de hierro, se confirma la reducción en la secuencia Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO y Fe . Asimismo, las fases formadas pueden ser densas o porosas, influyendo en las transformaciones de fase en función de la mayor o menor capacidad de difusión de los reactivos (ya sea la fase gaseosa o la difusión en estado sólido) a través de la capa de hierro. En el modelo en cuestión [3], el modelado de la cinética de reacción se realizó con la ayuda de técnicas gravimétricas (con variación de parámetros como tamaño de partícula, régimen cinético, contenido de H_2 y otras variables) y el establecimiento de un modelo cinético general, que fue debidamente insertado en el modelo de Volúmenes Finitos. Los detalles del modelado cinético y todas sus implicaciones se pueden encontrar en [3]. El resultado de este modelado cinético se presenta en la **Figura 7**, lo que confirma que la reacción de reducción de Hematita a Magnetita es más rápida, mientras que la reducción de Wustita a hierro es más lenta [3].

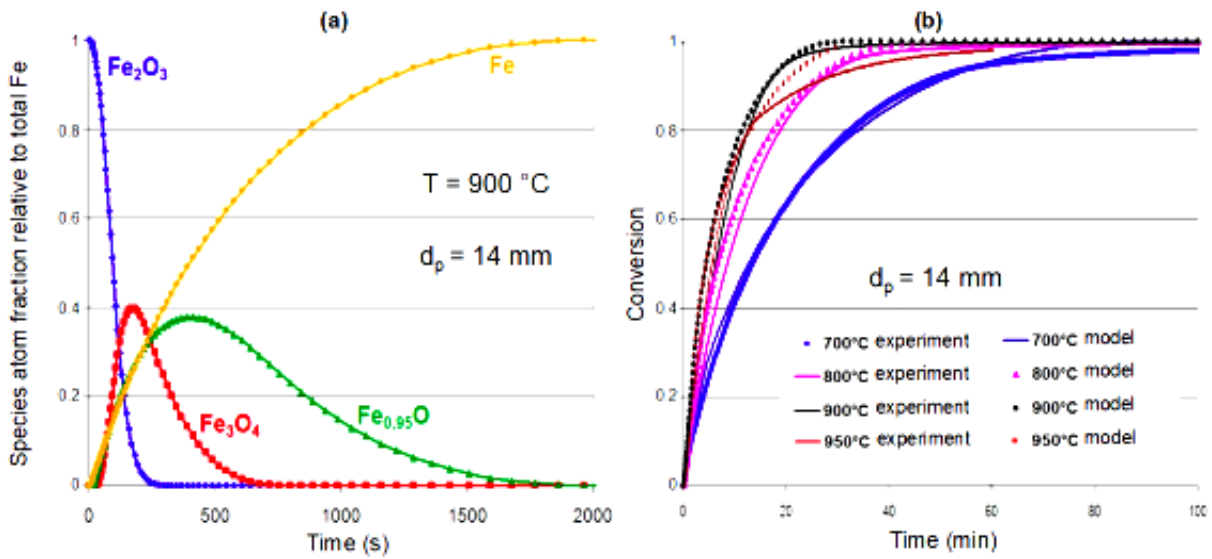


Figure 8. Results of the single pellet model; (a): calculated solid fractions as a function of time; (b): comparison with experimental data at various temperatures for a CVRD-DR pellet reduced by 2 L/min of H₂-He (60–40 vol. %) in a thermobalance.

Figura 7 - Resultados del modelo de un solo pellet. En (a) las fracciones de sólidos se observan en función del tiempo. En (b) se presenta la comparación de datos experimentales para las diversas temperaturas de conversión de hierro. Pellet reducido en termobalance con flujo de gas 60H₂-40He y 2 L/min [3].

La comparación con datos experimentales es buena para temperaturas de hasta 900°C y menor para 950°C. De esta manera, la transición de CO a H₂ requiere análisis termodinámico, cinético, de transferencia de calor y de flujo de gas. La simulación del proceso MIDREX se realizó con diferentes proporciones de H₂ y CO. La **Figura 8** muestra que cuanto mayor es la concentración de H₂ el grado de metalización es menor, contrario al modelo cinético de reducción de hidrógeno presentado anteriormente.

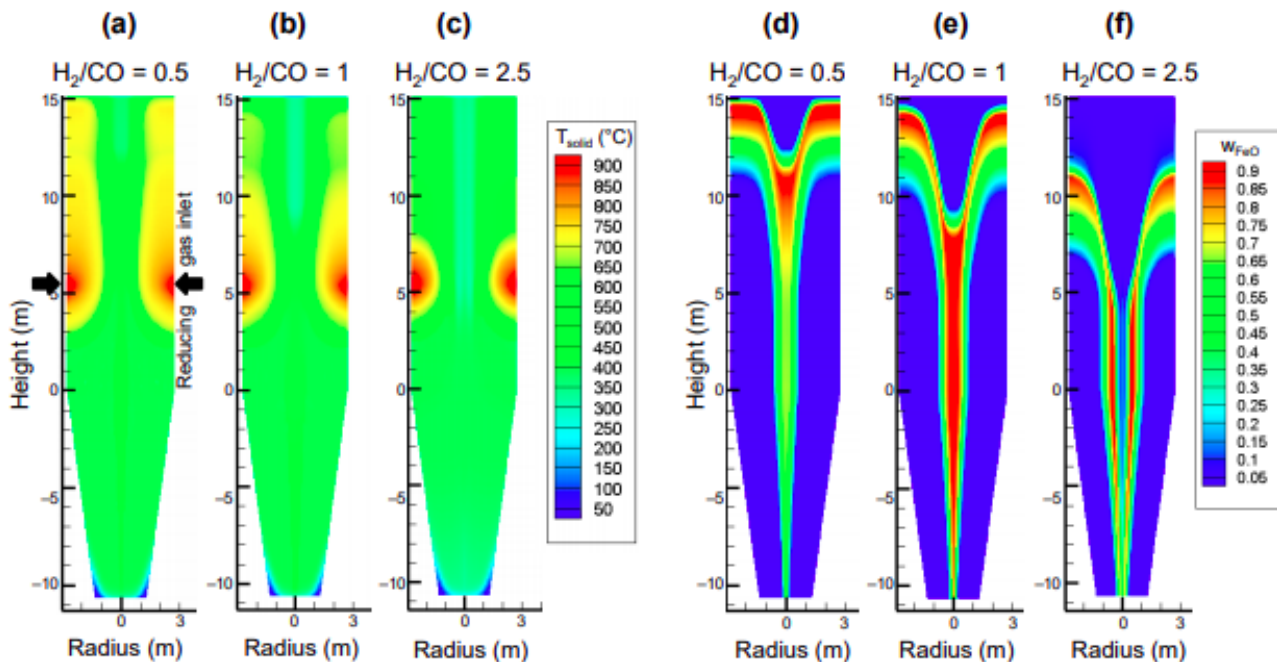


Figure 12. Calculated solid temperature (a–c) and iron mass fraction (d–f) throughout a shaft furnace fed with different inlet reducing gas compositions: $H_2/CO = 0.5$ (a,d), $H_2/CO = 1$ (b,e), $H_2/CO = 2.5$ (c,f), the other species being CH_4 (9%), H_2O (4%) and CO_2 (2%).

Figura 8 - Modelado del proceso Midrex con diferentes proporciones de H_2 . El perfil de temperatura se muestra de a a c. El perfil de la fracción de masa de hierro se presenta desde d hasta f. Otros componentes considerados fueron CH_4 (9%), H_2O (4%) y CO_2 (2%).

La primera explicación de esta contradicción es la termodinámica, donde el diagrama de **Chaudron** (no se muestra aquí) muestra que la fuerza impulsora de CO es mayor y permite la reducción **FeO** a **Fe** a baja temperatura. En el caso del hidrógeno, la fuerza motriz de reducción aumenta con la temperatura (comportamiento inverso). El calor de reducción también es un factor relevante para explicar este comportamiento (**Tabla 1**). La reducción de **Hematita** en **Magnetita** es notablemente menos exotérmica cuando H_2 se usa. Donde la reacción de **Magnetita** para la **Wustita** es más endotérmica cuando se usa H_2 . Principalmente, la reacción **FeO** a **Fe** es endotérmico para H_2 y exotérmico para CO. Por tanto, globalmente, se puede decir que la reacción total es endotérmica con H_2 y exotérmica con CO y esto hace que la temperatura se altere significativamente dependiendo de la composición química del gas entrante.

Evidentemente, alterando profundamente la presencia estable de la fase de Fe. Así, las temperaturas para el CO son sensiblemente más altas y las reacciones son completas (Fe metálico) en menos de 5 metros. De esta forma, se observa que la temperatura de entrada del gas reductor en el reactor debe controlarse para que se alcance correctamente el grado de metalización deseado. La **Figura 9** muestra el efecto de la temperatura del gas reductor sobre el grado de metalización [3].

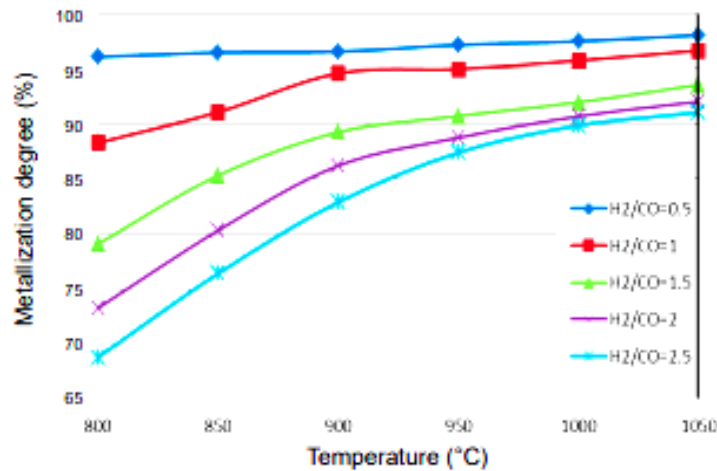


Figure 10. Metallization degree of the DRI at the exit of a MIDREX shaft furnace as a function of temperature and H₂/CO ratio.

Figura 9 - Grado de metalización a la salida del proceso MIDREX en función de la temperatura y la relación H₂/CO [3].

Sin embargo, cabe señalar que el uso de H₂ puro demostró que las temperaturas son uniformes en la dirección radial y permiten un 100% de metalización debido a la rápida cinética involucrada. Por lo tanto, el enfoque anterior es importante para mezclas de CO enriquecidas con H₂.

INICIATIVAS DE CHINA - EL GIGANTE TAMBIÉN ES VERDE [5]

Frank Zhong [5] describió las iniciativas de China con respecto al impulso global para la reducción por hidrógeno. Las acerías chinas han comenzado proyectos prometedores a partir de 2019 sobre el uso de hidrógeno en la fabricación de hierro en lugar de carbón. A finales de 2019, la segunda acería más grande de China (**HBIS Group**) anunció la construcción de una planta de 1,2 Mt/año para la producción de hierro a base de hidrógeno. Junto con el italiano **TENOVA**, los edificios estaban previstos para comenzar en 2020. Por lo tanto, este proyecto se proclamará como el mayor despliegue industrial con el uso de hidrógeno puro.

El grupo **Baowu** (a partir de 2019) creó una asociación con el **Centro Nacional de Energía Nuclear de China** y la **Universidad de Tsinghua** para desarrollar el uso de la energía nuclear y la generación de hidrógeno en sus procesos de reducción de hierro.

En septiembre de 2019 la mediana empresa **Jiuquan Steel** creó un instituto de investigación para estudiar la tecnología de fabricación de hierro a base de hidrógeno.

También se destaca la iniciativa del grupo **Jianlong**, en septiembre de 2019, que inició las obras de construcción de un reactor de 0,30 Mt/año para fusión directa con una mezcla de carbón e hidrógeno. Aunque no produce hidrógeno limpio (la fuente será gas de horno de coque), el proyecto estaba programado para octubre de 2020.

La empresa **Rizhao Steel** en mayo de 2020 también anunció la implantación de una unidad de reducción directa de 0,5 Mt/año utilizando hidrógeno. Sin embargo, también se utiliza una fuente de hidrógeno no renovable.

Sin embargo, incluso con estas iniciativas, la capacidad de producción de H₂ en China no es suficiente para apoyar a la industria del acero, sin mencionar la disponibilidad y el costo. En el escenario chino, el coste de producción de la ruta del hidrógeno sería cinco veces superior al de la ruta del alto horno [5]. Por lo tanto, la igualación de la generación y distribución de hidrógeno estará sujeta a las políticas estatales chinas. Desde 2011, las industrias chinas han estado involucradas en un programa piloto de comercio de emisiones de carbono. En 2017, el gobierno central chino lanzó su programa de comercio de carbono donde el primer sector fue la energía.

Finalmente, **Zhong** dice que surgirá la industria china del acero con bajo contenido de carbono. Sin embargo, no sabe cómo predecir cuándo, incluso con la política de comercio de carbono que pronto también estará disponible para el sector del acero.

REFLEXIONES FINALES

1 - La ruta del hidrógeno está recibiendo atención debido a la electrificación de la sociedad y un cambio de paradigma en cuanto al potencial de reducción de emisiones de CO₂.

2 - El hidrógeno es técnicamente viable para la fabricación de hierro, reemplazando el gas natural y el carbón/coque. El uso de H₂ puro mostró una cinética más rápida en comparación con las mezclas de CO y H₂. Esto puede permitir que se reduzca el tamaño de los reactores de reducción directa actuales.

3 - La electrificación se puede utilizar en la metalurgia del hierro. Obviamente la producción de H₂ podrá ser por energías renovables y libre de combustibles fósiles (*p.ej.* eólica, solar, nuclear, etc.).

4 - La ruta **HDR-EAF** en comparación con la ruta BF-BOF, puede mostrar una reducción del 90-99% en los niveles de CO₂.

5 - La ruta **DRI-EAF** parece estar más madura para recibir el proceso de industrialización y convertirse **HDR-EAF**, ya que supondría adecuar los hornos de reducción directa actuales. Además, el circuito de gas es más sencillo porque no requiere reforma de metano.

6 - La ausencia de carbono en el HDR en comparación con el DRI (2-4%) necesita más atención, ya que puede retrasar el desarrollo del **Acero Verde** dependiendo de la necesidad adicional de biomasa u otra fuente de carbono (como la co- electrólisis no cubierta en este trabajo).

7 - Aún con estas excelentes expectativas, el proyecto debe ponerse en práctica para asegurar su industrialización y posterior comercialización. Donde detalles del *diseño* geométrico del reactor y los factores metalúrgicos solo se pueden acceder con la práctica experimental industrial.

REFERENCIAS

1 – Åhman, M., Olsson, O., Vogl, V., Nyqvist, B., Maltais, A., Nilsson, L., Hallding, K., Skånberg, K., Nilsson, M. **Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy**. - A joint LU-SEI working paper for the HYBRIT Project. EESS report no 109. SEI working paper WP 2018-07. September 2018.

2 - Olsson, O., Nykvist, B. **Bigger is sometimes better: demonstrating hydrogen steelmaking at scale**. SEI working paper. July 2020.

3 – Patisson, F., Mirgaux, O.. **Hydrogen Ironmaking: How It Works**. Metals 2020, 10, 922; doi:10.3390/met10070922.

4 - Sitio web: www.bostonmetal.com. Consultado el 28/9/20.

5 - Sitio web: <https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2020/hydrogen-technology-momentum-Chinese-steel-industry.html> por Frank Zhong. Chief Representative, Beijing Office / Advisor on Economics, Raw Materials and Markets. Consultado el 23/09/20.

ABREVIATURAS IMPORTANTES (EN - ES)

BF -Blast furnace - Alto horno

BOF - Basic oxygen furnace - Convertidor LD

CCS - Carbon capture and storage – Captura y almacenamiento de gas de carbono

CCU - Carbon capture and utilization – Captura y uso de gas de carbono

DRI - Direct reduced iron – Hierro de reducción directa

EAF - Electric arc furnace – Horno de Arco Eléctrico

GHG - Greenhouse gas - Gases de Efecto Invernadero

H-DR - Hydrogen direct reduction – Reducción directa a través de hidrógeno

PDP - Pilot and demonstration plant – Planta piloto y de demostración

TRL - Technology readiness level – Nivel de preparación tecnológica