



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

# Reducción de mineral de hierro a partir de hidrógeno verde

Catalina Sobrido Magne  
Victoria Frioni Aguiñagalde  
Antonio Daniel Vergnes Stoletniy  
Ian Tomás de Amores Hernández  
Romina Ruiz de León

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Químico.

## Tutores

Soledad Gutiérrez  
Santiago Ferro

## Consultores

Gustavo Sánchez  
Santiago Seiler

Montevideo, Uruguay  
Abril de 2024

## Resumen ejecutivo

El hierro, constituye un producto fundamental para la sociedad, con una demanda creciente en el tiempo y un amplio espectro de aplicaciones, la producción de este alcanza valores de hasta 1,8 billones de toneladas anuales. La fabricación de acero por los métodos tradicionales comprende el uso de coque de petróleo para reducir el hierro del estado oxidado al metálico. Este uso de reductores a base de carbono genera 1,7 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero producida. Producto de esto y los grandes volúmenes trabajados, la industria siderúrgica es responsable de un 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial.

Actualmente se está comenzando a explotar minas en Zapucay-Rivera, produciendo una de las materias primas principales que se necesita para producir el hierro elemental. Se consumirán 300.000 toneladas anuales de magnetita siendo esta la capacidad de la empresa minera encargada de la explotación. La vida útil estimada del yacimiento es de quince años.

Una alternativa a los procesos tradicionales de obtención de hierro es su reducción con H<sub>2</sub> resultando esta una alternativa notoriamente más limpia donde la única emisión gaseosa es vapor de agua.

En este proyecto planteó la implementación de una planta de producción de hierro a partir de magnetita y usando hidrógeno verde como agente reductor. Se busca aprovechar un recurso mineral del Uruguay y la matriz energética renovable del país para obtener un producto de mayor valor agregado. Considerando las características del producto obtenido al utilizar hidrógeno como reductor, se realizó un estudio de mercado. Como resultado se determinó que la forma óptima de comercializar el hierro es como briquetas de hierro sin alear. Se encuentra un mercado posible para el hierro en esta forma en países europeos, donde el volumen de producción planteado en este proyecto no supera el 10% del volumen de mercado. El precio de venta típico de este producto alcanza los 440 US\$/ton, aunque es razonable considerar un sobreprecio por la baja huella de carbono de nuestro producto, el cual, este sobreprecio se estimó en 10%.

La planta estará ubicada estratégicamente en un predio 8km al sur de Minas de Corrales, cercana a la minera y al Rio Tacuarembó. Dentro de este predio se producirá hidrógeno verde a partir de la electrolisis del agua contando con una capacidad instalada de electrolización de 90 MW. El hidrógeno producido ingresará al reactor principal después de un calentamiento. Este entrará en contacto con el mineral de hierro, previamente peletizado, para darse la reducción a lo largo del mismo. La reacción de reducción con H<sub>2</sub> es endotérmica. El calor necesario será dado por el hidrógeno que entrará a 900 °C. El flujo de hierro que sale del reactor pasará por una etapa de compresión en caliente para estabilizarlo, obteniendo 223.000 ton/año de producto final. Se mantendrá durante toda la extensión de proyecto el mismo nivel de producción.

Al necesitarse un exceso de hidrógeno para favorecer la cinética de la reacción principal, se tendrá una salida gaseosa del reactor compuesta por vapor de agua e hidrógeno sin reaccionar. Para el óptimo aprovechamiento del agua y la energía se tendrá un sistema de cuatro intercambiadores de calor, donde se recupera por un lado el hidrógeno sin reaccionar (que es recirculado) y, por otro lado, se recupera el agua producida en la reacción de reducción. Esta producción de agua durante la reacción es aprovechada para la generación de hidrógeno, esto lleva a tener un consumo hídrico de 8 m<sup>3</sup>/h, notoriamente menor que otros proyectos relacionados al hidrógeno.

Como parte de la evaluación económica del proyecto se concluyó que la inversión necesaria alcanza los 328 MMUS\$. Dentro de la inversión se destaca sobre todo la inversión en equipos para la producción de hidrógeno. Como fruto de la evaluación de costos se determinó que el producir una tonelada de hierro tiene un costo de 603 US\$. Se evaluó el proyecto en un período de 10 años con un precio inicial de venta determinado después de un estudio de mercado como 484 US\$/ton, este

valor se obtuvo a partir del costo estándar de producto adicionándole un sobreprecio por ser producido a partir de tecnologías limpias y de bajas emisiones contaminantes. Si bien el proyecto con el precio evaluado no resulta rentable obteniendo un VAN de MMUS\$ -230, es razonable considerar que por las cualidades amigables con el medio ambiente se puede obtener subsidios que favorezcan la rentabilidad. A su vez luego de hacer un análisis de sensibilidad se obtuvo un nuevo precio de 650 US\$/ton donde el proyecto se hace rentable, por lo tanto, se necesitaría obtener un subsidio de al menos 166 US\$/ton para viabilizar el proyecto. Partiendo de este nuevo precio, dada la inversión a partir de un pedido de préstamo a una entidad financiera se obtiene un valor de VAN de MMUS\$ 26, una Tasa Interna de Retorno de 10,8 % y un Periodo de Repago de 9 años.

Además, cabe destacar que un eventual surgimiento de regulaciones ambientales más estrictas, podrían posicionar al proceso planteado en este proyecto como una mejor alternativa para la producción de hierro.

Al analizar si la inversión es favorable utilizando Capital Propio o Capital Mixto, donde parte de la inversión es dada por un préstamo de una entidad financiera, se obtuvieron resultados similares, aunque se concluyó que con Capital Mixto se obtienen mejores resultados. A partir de ese nuevo precio de producto establecido se obtiene un proyecto económicamente viable, contando con buenos indicadores de rentabilidad. Otra conclusión que se obtuvo fue que el proyecto es muy susceptible a cambios en el precio de materia prima o de energía eléctrica.

Debido al impacto ambiental del proyecto, el mismo resulta de interés Nacional. Se cuenta con un beneficio fiscal debido a que se cumple con una serie de estímulos que promueve el desarrollo, contribuye con la reducción de gases contaminantes, utiliza tecnologías limpias y sofisticadas, y genera empleo descentralizado en el país. Este beneficio fiscal no es suficiente para alcanzar la rentabilidad del proyecto, por lo que se debe recurrir a subsidios adicionales.