



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO INDUSTRIAL



# Producción de hidrógeno verde y transporte mediante líquidos orgánicos

## **Autores:**

Facundo Calvetti

Pablo Maurer-Neuman

Santiago Moure

Justina Pisani

Yamila Scagni

## **Tutores:**

Santiago Ferro

Nicolás Ferrari

CURSO 2020

## Resumen Ejecutivo

Este proyecto busca abordar la alternativa del transporte de Hidrógeno ( $H_2$ ) por reacción química; en la cual se hace reaccionar este gas con un portador orgánico líquido (LOHC- Liquid Organic Hydrogen Carrier), se transporta y luego, a partir de la reacción inversa, se libera.

Se propone al  $H_2$  como una alternativa competitiva frente a los combustibles de origen fósil, con el fin de reducir su consumo. Además, se utilizará el denominado  $H_2$  verde, es decir, aquel producido a partir de energías renovables. El uso de estas energías es indispensable para un crecimiento sustentable y desempeña un papel clave para reducir las emisiones de carbono.

Para la obtención del gas se recurrirá a la tecnología de electrólisis PEM (Polymer Electrolyte Membrane), la cual utiliza agua pura como materia prima y logra una pureza del 99,99 %. La energía eléctrica necesaria será tomada de la red, procurando utilizar la obtenida a partir de fuentes renovables.

A partir del proceso de electrólisis, también se obtiene Oxígeno. Una parte de este subproducto será almacenada a presión y comercializada, mientras que el resto será ventado a la atmósfera.

El término LOHC incluye todos los sistemas de almacenamiento de  $H_2$  que son líquidos en condiciones de presión y temperaturas normales, siendo sus propiedades similares a las del crudo de petróleo. Para este proyecto, se selecciona de entre varios portadores con alto potencial económico, el dibenciltolueno ( $H_0$ -DBT), conocido comercialmente como Marlotherm SH o MSH.

El mercado objetivo será el transporte pesado local (camiones y ómnibus), dado que este sector es el que más aporta a las emisiones de  $CO_2$ . Por tratarse de un mercado nuevo, se decide implementar este proyecto en cinco etapas, abarcando el 40% del mercado en cada año de operación.

A partir del rendimiento de los vehículos a sustituir, el precio actual del Diesel en el mercado y los rendimientos esperados para las unidades a base de hidrógeno, se obtiene un precio de paridad estimado de 1,86 USD/kg de  $H_2$ . Una rápida evaluación económica del proyecto considerando este precio de venta, arrojó que el mismo no sería rentable. Por

esta razón, se realizará el estudio económico y financiero de este proyecto utilizando un precio de venta de 12 USD/kg de H<sub>2</sub>, el cual se encuentra dentro del rango de precios utilizados actualmente en el exterior (10 a 16 USD/kg), en lugares como California y países de Europa.

Con el fin de optimizar el transporte del portador orgánico líquido cargado (H<sub>18</sub>-DBT), se instalarán 6 centros de distribución en todo el país.

El primer centro, que corresponde a la planta principal, ubicada en San José, tiene como procesos principales la obtención del H<sub>2</sub> y la reacción de éste con el H<sub>0</sub>-DBT.

La obtención del H<sub>2</sub> implica un gran consumo de energía eléctrica, requiriendo una potencia máxima instalada de 110 MW para el último año de producción (2033).

En cuanto al proceso de hidrogenación, la reacción es exotérmica, requiere de altas presiones y de la presencia de un catalizador (Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Será llevada a cabo en reactores continuos agitados con camisa, en condiciones de T=240 °C y 30 bar de presión de H<sub>2</sub>.

El resto de los centros estarán ubicados en Colonia, Paysandú, Rivera, Cerro Largo y Maldonado. Aquí se dará la reacción de deshidrogenación (endotérmica), que también requiere de un catalizador (Pt/C) y se utilizarán reactores continuos agitados con camisa, en condiciones de T=310 °C y 1 bar de presión de H<sub>2</sub>. El hidrógeno se almacenará en tanques para su posterior distribución hacia los puntos de consumo; mientras que el portador orgánico líquido que se obtiene, será enviado a la planta principal para su reutilización.

Un punto importante a destacar de este proyecto es el gran consumo de energía (potencia instalada de aproximadamente 157 MW), en comparación con grandes industrias del país como Montes del Plata (90 MW).

A partir de datos del año 2019, se puede garantizar que hay disponible 1.583 MW de potencia instalados, provenientes de fuentes renovables. El consumo de potencia requerida por el proyecto corresponde entonces a un 10 %.

A nivel económico-financiero, se requerirá una inversión de USD 433 millones, la que corresponde principalmente a electrolizadores PEM, tanques para el almacenamiento de H<sub>2</sub> comprimido, catalizadores y al portador orgánico líquido.

Se analiza realizar esta inversión mediante capital propio, obteniéndose un VAN de USD 105 millones, una TIR de 16,4 % y un período de repago de entre 6 y 7 años.

Para el caso de realizar la inversión con capital mixto; es decir, a través del aporte de una fracción del capital por parte de una Institución Financiera, se obtiene un VAN de USD 173 millones, una TIR de 25,5 % y un período de repago de entre 6 y 7 años.\*

Además, se evalúa el proyecto según la Ley N° 16.906, la cual establece beneficios como la exoneración de impuestos como el IRAE e IP, a partir del cálculo de ciertos índices. Uno de ellos es la generación de empleo, a resaltar en este proyecto, ya que gracias a los 495 puestos de trabajo que se generarán, el valor de este índice será elevado, obteniéndose mayores exoneraciones fiscales.

Al aplicar los porcentajes de exoneración obtenidos, resulta una mayor rentabilidad del proyecto, con un VAN de USD 136 millones y una TIR de 18,2 % para el análisis con capital propio y un VAN de USD 195 millones y una TIR de 27,5 % para capital mixto.\*

En último lugar, serán estudiados dos escenarios alternativos a este proyecto. El primero corresponde al transporte del H<sub>2</sub> comprimido y el segundo a la exportación del portador orgánico líquido hidrogenado.

---

\* Índices de rentabilidad calculados desde el punto de vista del empresario.