



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

# Producción de metanol a partir de H<sub>2</sub> verde y CO<sub>2</sub> capturado de cementera

María Victoria Castro Ramallal  
Julián Fossemale Zanotta  
María del Pilar Montefiori Ramírez  
Manuela Neme Saenz  
Lucas Pereira Martínez  
Hernán Pérez Pereira

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

Gustavo Domínguez  
Santiago Ferro

## Tribunal

Norberto Cassella  
Gustavo Domínguez  
Santiago Ferro

Montevideo, Uruguay  
Abril de 2026

## Resumen ejecutivo

El presente proyecto analiza la viabilidad técnica, comercial, ambiental y económica de una planta industrial destinada a la producción de metanol sustentable a partir de hidrógeno verde y dióxido de carbono capturado de una industria cementera. La propuesta se enmarca en el contexto de transición energética y descarbonización del transporte. En este sentido, el metanol sustentable se presenta como una alternativa competitiva frente a otros combustibles de bajas emisiones, al ser líquido a temperatura y presión ambiente, facilitar su almacenamiento y transporte, y permitir su incorporación progresiva en infraestructura. El proyecto busca, además, posicionar a Uruguay como proveedor regional de combustibles sustentables.

El producto principal es metanol sustentable a granel, destinado a su uso como combustible marítimo. La estrategia comercial se orienta principalmente al abastecimiento de cruceros turísticos, identificados como un segmento premium dentro de la industria naviera, debido a su mayor exposición frente al consumidor final, su interés en estrategias de sostenibilidad y su potencial disposición a pagar precios superiores por combustibles de menor huella ambiental. A partir del análisis de demanda realizado, se estima un mercado potencial de 243.510 toneladas anuales de metanol sustentable, considerando puertos de Uruguay, México y Jamaica como destinos prioritarios. La distribución comercial propuesta contempla la venta del 12 % del producto en Uruguay, 24 % en México y 64 % en Jamaica, con precios de referencia de 1.526 USD/ton para Uruguay y 1.326 USD/ton para Jamaica y México.

La localización seleccionada para la planta corresponde al departamento de Lavalleja, en las inmediaciones de Cementos Artigas. Esta decisión surge de un análisis comparativo frente a la alternativa de Treinta y Tres, donde se encuentra la cementera Cielo Azul, considerando factores como cercanía a la fuente de CO<sub>2</sub>, disponibilidad de agua industrial, conectividad vial, acceso a energía eléctrica, etc. Lavalleja presenta una ventaja logística relevante por su menor distancia al Puerto de Montevideo, aproximadamente 180 km más cerca, lo que reduce los costos de transporte del producto terminado hacia el principal punto de comercialización y exportación. En el análisis comparativo, Lavalleja se consolidó como la alternativa más adecuada para la instalación de la planta.

El proceso productivo comprende tres grandes secciones: producción de H<sub>2</sub> verde, captura y purificación de CO<sub>2</sub>, y síntesis y purificación de metanol.

Para la generación de H<sub>2</sub> se selecciona tecnología de electrólisis PEM. La potencia eléctrica asociada a la electrólisis asciende a aproximadamente 140 MW, constituyendo el principal consumo energético del proyecto.

El dióxido de carbono se obtiene a partir de los gases de combustión de Cementos Artigas mediante absorción química con monoetanolamina (MEA). El sistema de captura permite obtener una corriente de CO<sub>2</sub> con una pureza aproximada de 99,3 %, adecuada para su posterior utilización en la síntesis de metanol.

Posteriormente, el CO<sub>2</sub> capturado reacciona con el H<sub>2</sub> en un reactor catalítico de lecho fijo, operando a alta presión y temperatura. Debido a la conversión limitada por pasada, se incorpora recirculación de gases no convertidos y una etapa posterior de purificación, obteniéndose metanol con calidad adecuada para su uso como combustible marítimo.

La planta fue diseñada para una capacidad de producción de 100.000 toneladas anuales de metanol. Para alcanzar la capacidad de producción definida, se requiere un consumo anual aproximado de 160.000 toneladas de CO<sub>2</sub> y una producción bruta de hidrógeno cercana a 21.200 toneladas anuales.

El abastecimiento hídrico se prevé desde el Arroyo La Plata, complementado con una represa de almacenamiento dentro del predio para asegurar autonomía operativa ante interrupciones temporales de captación.

El suministro eléctrico constituye uno de los aspectos críticos del proyecto. La demanda total de la planta se estima en aproximadamente 170 MW durante la operación normal, aumentando a 185 MW durante la etapa de arranque debido al uso de calentamiento eléctrico auxiliar. Se plantea una matriz de suministro híbrida, compuesta por energía proveniente de UTE y de proveedores privados de energía renovable. Asimismo, se considera el uso de certificados de atributos renovables y mecanismos de trazabilidad para respaldar el carácter sustentable del metanol producido.

Desde el punto de vista económico, se estimó una inversión total de capital de aproximadamente 313 millones de dólares, concentrada principalmente en inversiones amortizables tangibles asociadas a los equipos de proceso. Dentro de estas, se destacan los electrolizadores, debido a su elevado costo tecnológico y a su importancia central en la producción de hidrógeno verde.

La evaluación financiera se realizó para un horizonte de 10 años, considerando dos esquemas de financiamiento: capital propio y capital mixto. En el escenario de capital propio, el proyecto presenta un VAN de -7,5 millones de dólares, una TIR de 9,43 % y un período de repago de 7,50 años. Si bien la inversión logra recuperarse dentro del horizonte de análisis, los flujos actualizados no son suficientes para generar valor económico bajo esta modalidad. En cambio, bajo un esquema de capital mixto, se obtiene un VAN positivo de 22,9 millones de dólares, una TIR de 15,10 % y un período de repago de 6,35 años, evidenciando una mejora significativa en la rentabilidad del proyecto.

El análisis de sensibilidad confirma que las variables de mayor incidencia son el precio de venta del metanol y el costo de la energía eléctrica. En particular, para el caso de capital propio, un aumento del orden del 5 % en el precio del metanol o una reducción del 10 % en el costo energético permitirían alcanzar un VAN positivo. En el escenario de capital mixto, el proyecto ya resulta rentable en el caso base, aunque su desempeño mejora ante condiciones comerciales y energéticas más favorables.

En conclusión, el proyecto constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente relevante para la producción de metanol sustentable en Uruguay a partir de H<sub>2</sub> verde y CO<sub>2</sub> capturado de una fuente industrial existente. Su implementación permitiría integrar la industria cementera, la generación renovable, la producción química y la logística portuaria, contribuyendo a la descarbonización del transporte marítimo y al desarrollo de nuevas cadenas de valor en el país.

Desde el punto de vista económico, la viabilidad del proyecto depende fuertemente de la estructura de financiamiento adoptada. Bajo un esquema de capital propio, la rentabilidad resulta limitada y no se genera valor económico suficiente en las condiciones evaluadas. Sin embargo, bajo capital mixto, los indicadores financieros son positivos, con VAN mayor a cero, TIR superior a la tasa de descuento considerada y recuperación de la inversión dentro del horizonte de análisis. Por tanto, el proyecto puede considerarse económicamente viable bajo una estructura de financiamiento adecuada, aunque mantiene una sensibilidad relevante frente al costo de la energía eléctrica y al precio de venta del metanol sustentable.