



CENTRO DE INNOVACION UC  
ANACLETO ANGELINI



# VISIONES, MODELOS Y EXPERIENCIAS SOBRE EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE (H<sub>2</sub>V) PARA CHILE: UNA PERSPECTIVA MULTIDISCIPLINARIA



# VISIONES, MODELOS Y EXPERIENCIAS SOBRE EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE (H<sub>2</sub>V) PARA CHILE: UNA PERSPECTIVA MULTIDISCIPLINARIA

*Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V)  
para Chile: una perspectiva multidisciplinaria*

Primera edición / mayo 2026

**Equipo de desarrollo de contenidos, redacción y edición**  
Centro de Innovación UC Anacleto Angelini

**Fotografías**  
Se agradece a quienes facilitaron imágenes para este documento

**Diseño y diagramación**  
Macarena Lagreze

“Creemos firmemente que la academia tiene un rol insustituible como espacio de reflexión crítica, articulación de saberes y construcción de puentes entre el conocimiento científico, la política pública y la acción productiva”.



**MARÍA ANGÉLICA FELLENBERG**  
Vicerrectora de Investigación y Postgrado  
Pontificia Universidad Católica de Chile

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles y de bajas emisiones se ha consolidado como un desafío estratégico central para las economías contemporáneas. Ante la urgencia climática, la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de redefinir los modelos de desarrollo, el hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) ha cobrado protagonismo en la agenda internacional. Este vector resulta clave para descarbonizar los sectores industriales más complejos, impulsar la transformación productiva y estructurar nuevas cadenas de valor de alto contenido tecnológico y ambiental.

Para Chile, este escenario abre una oportunidad histórica. Las ventajas comparativas asociadas a la disponibilidad de recursos renovables de clase mundial, sumadas a un marco institucional en evolución y a una creciente articulación público-privada, posicionan al país como un actor potencialmente relevante en el desarrollo y la provisión de hidrógeno verde y sus derivados a escala global. Sin embargo, el despliegue efectivo de esta industria trasciende con creces los ámbitos tecnológico y energético. Involucra decisiones complejas en materias de planificación territorial, infraestructura, regulación, gobernanza, formación de capital humano, encadenamientos productivos, aceptación social y sostenibilidad ambiental, entre otras dimensiones críticas.

Conscientes de esta complejidad y del carácter sistémico del desafío, desde la Pontificia Universidad Católica de Chile, en colaboración con la Asociación Chilena del Hidrógeno (H<sub>2</sub> Chile) y Mankuk Consulting, hemos impulsado la elaboración del documento **“Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V) para Chile: una perspectiva multidisciplinaria”**. Esta iniciativa surge desde la convicción de que los procesos de transformación estructural requieren ser abordados desde el conocimiento riguroso, el diálogo informado y la colaboración efectiva entre la academia, el sector público y el sector privado.

Desde la Universidad Católica, este esfuerzo se inscribe en nuestro compromiso con la generación de conocimiento pertinente y de excelencia, la formación de capital humano avanzado y la vinculación activa con los grandes desafíos del país. Creemos firmemente que la academia tiene un rol insustituible como espacio de reflexión crítica, articulación de saberes y construcción de puentes entre el conocimiento científico, la política pública y la acción productiva. En esa línea, este documento aspira a contribuir a la construcción de una visión compartida y de largo plazo para el desarrollo sostenible del hidrógeno verde en Chile, basada en la colaboración, la evidencia y el sentido de responsabilidad intergeneracional.

En este sentido, este documento busca abrir un espacio de reflexión informada y propositiva, que contribuya a elevar la calidad del debate y a fortalecer los procesos de toma de decisiones en un ámbito estratégico para el desarrollo del país. El valor de este documento reside precisamente en la diversidad y profundidad de las miradas que lo componen, así como en su capacidad para articular conocimiento experto con los desafíos concretos que enfrenta Chile en su transición energética.

Con esta publicación, la Pontificia Universidad Católica de Chile reafirma su vocación de servicio público y su rol como institución formadora de pensamiento crítico, orientado al bien común. Desde la academia, asumimos la responsabilidad de contribuir activamente a la construcción de trayectorias de desarrollo que sean técnica, social y ambientalmente sostenibles, promoviendo una colaboración virtuosa entre el mundo del conocimiento, las políticas públicas y el sector productivo.

Esperamos que este documento sea un aporte para delinear caminos concretos para un despliegue del hidrógeno verde que combine innovación, sostenibilidad y desarrollo humano, en coherencia con las aspiraciones de Chile y los compromisos globales frente al cambio climático.

“Mejillones emerge como un espacio clave, no solo por su potencial logístico e industrial, sino también porque concentra los desafíos que supone construir una transición energética justa y territorialmente sostenible”.



**RICARDO DÍAZ**  
Gobernador Regional de Antofagasta

La transición energética abre para Chile una oportunidad histórica, pero en regiones como Antofagasta esa oportunidad no puede comprenderse únicamente como el surgimiento de una nueva industria, sino como un proceso de transformación territorial, productiva e institucional, cuyo alcance exige visión de largo plazo, articulación multi actores y una planificación capaz de armonizar competitividad, sostenibilidad y bienestar para nuestras comunidades.

La publicación **“Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V) para Chile: una perspectiva multidisciplinaria”** constituye un aporte muy valioso en ese sentido. El documento permite comprender que el hidrógeno renovable no es solo una promesa energética, sino una plataforma para repensar el desarrollo del país desde dimensiones que se encuentran profundamente entrelazadas: infraestructura, gobernanza, financiamiento, talento humano, ordenamiento territorial, innovación, soberanía energética y legitimidad social.

Para la Región de Antofagasta, esta reflexión tiene especial relevancia. Nuestro territorio reúne condiciones excepcionales para liderar esta nueva etapa: fuentes renovables de clase mundial, infraestructura energética y portuaria, proximidad con la gran minería, experiencia industrial acumulada y capacidades científico-tecnológicas que permiten proyectar una inserción estratégica de la región en la economía global del hidrógeno renovable y sus derivados. En ese marco, Mejillones emerge como un espacio clave, no solo por su potencial logístico e industrial, sino también porque concentra los desafíos que supone construir una transición energética justa y territorialmente sostenible.

Como Gobierno Regional, entendemos que el despliegue del hidrógeno renovable debe vincularse estrechamente con la Estrategia Regional de Desarrollo, nuestra Hoja de Ruta Regional de Hidrógeno Verde, recientemente publicada, y con una agenda

más amplia de diversificación productiva regional. Debe ser capaz de articularse con la minería sostenible, el fortalecimiento de la astronomía y el ámbito aeroespacial, con una mejor gestión del agua en condiciones de escasez estructural, y con el desarrollo logístico e internacional que representa el Corredor Bioceánico Capricornio. En otras palabras, el hidrógeno renovable y sus derivados deben ser parte de un nuevo ciclo de desarrollo regional, y no una industria desconectada del resto de nuestras prioridades estratégicas.

En este contexto, la planificación y el ordenamiento territorial adquieren un rol decisivo. Para ello el Plan Regional de Ordenamiento Territorial y la Zonificación del Borde Costero, son esenciales para orientar y delinear con mayor claridad la compatibilidad de usos en zonas costeras y rurales, la localización de infraestructuras compartidas, la protección y conservación de ecosistemas sensibles y la compatibilización entre actividades productivas, asentamientos humanos, patrimonio y biodiversidad. La zona costera de la región, y especialmente de Mejillones, es un espacio de enorme valor estratégico, pero también de alta sensibilidad territorial y ambiental. Por ello, el desarrollo de la industria del hidrógeno renovable exige reglas claras, visión de futuro y una gobernanza que permita anticipar conflictos en lugar de administrarlos tardíamente.

Asimismo, esta nueva etapa requiere fortalecer nuestras capacidades regionales. El talento técnico, la formación avanzada, la innovación aplicada, el desarrollo de proveedores y la articulación entre academia, sector privado y sector público serán determinantes para que Antofagasta no sólo produzca energía o exporte derivados, sino que también capture valor, conocimiento y empleo de calidad. La región debe consolidarse como un territorio que construye capacidades permanentes para liderar la descarbonización, la transición energética del país y dotarnos de mayor resiliencia ante un mundo cada vez más incierto.

Pero nada de esto será sostenible si no se funda en la legitimidad social. Nuestra región conoce de cerca las tensiones entre crecimiento económico, impactos ambientales y calidad de vida. Por eso, el hidrógeno renovable debe desarrollarse sobre nuevas bases: participación efectiva, transparencia, seguridad, cuidado del territorio, valor compartido y distribución más justa de beneficios y cargas. El desafío no es solo energético o industrial; es también democrático y territorial.

Esta publicación nos invita a dar ese debate con mayor profundidad. Nos recuerda que el futuro del hidrógeno renovable en Chile dependerá menos de la magnitud de nuestras ventajas naturales que de nuestra capacidad para construir instituciones, acuerdos y proyectos territoriales robustos. Desde el Gobierno Regional de Antofagasta reafirmamos nuestro compromiso con que esta transición sea conducida con responsabilidad, mirada estratégica, cohesión social y territorial y mejores oportunidades para las actuales y futuras generaciones.

**"Mejillones ya ha sido escenario de experiencias piloto en la producción de hidrógeno verde, lo que confirma que este no es un discurso futuro, sino una industria que comienza a instalarse en el territorio".**



**MARCELINO CARVAJAL**  
Alcalde de Mejillones

Chile ha puesto sus ojos en el hidrógeno verde como uno de los pilares de su desarrollo futuro. No es casualidad. El país tiene condiciones naturales privilegiadas para producir energía limpia a gran escala, y regiones como Antofagasta aparecen como protagonistas en este proceso.

En ese escenario, Mejillones vuelve a estar en el centro. No como una promesa, sino como un territorio donde este desarrollo ya empieza a tomar forma. Hoy no estamos hablando de ideas. En nuestra comuna ya existen proyectos concretos en carpeta, como la iniciativa Volta, que considera una inversión cercana a los USD 2.500 millones y la producción de más de 600 mil toneladas anuales de amoníaco verde, utilizando hidrógeno generado a partir de energía solar y recuperación de aguas servidas.

Lo anterior, beneficiará directamente a la comunidad. Esto, porque gracias a la empresa MAE, se permitió que Aguas Antofagasta pudiera reimpulsar nuevamente la construcción de una planta de tratamiento de aguas servidas para la ciudad y, de esta manera, evitar que estas aguas siguiesen vertiendo en la bahía. Luego, esa misma agua se utilizará para proveer de suministro hídrico a la operación del proyecto Volta.

A eso se suma que Mejillones ya ha sido escenario de experiencias piloto en la producción de hidrógeno verde, lo que confirma que este no es un discurso futuro, sino una industria que comienza a instalarse en el territorio. Pero más allá de las cifras, hay una pregunta de fondo que como comuna no podemos evitar: ¿cómo queremos que este desarrollo ocurra en Mejillones?

Porque esta no es la primera vez que enfrentamos un proceso de crecimiento industrial. Nuestra historia está marcada por eso. Hemos sido parte del desarrollo energético del país, hemos sostenido infraestructura crítica y hemos convivido con industrias que han aportado al progreso nacional.

Y justamente por esa experiencia, sabemos que el desarrollo no puede medirse solo en inversión o producción. El hidrógeno verde representa una oportunidad real. Puede abrir nuevas líneas productivas, generar empleo y posicionar a Mejillones como una industria clave a nivel global. Se proyecta incluso que iniciativas como Volta generen miles de empleos en su etapa de construcción y cientos en operación.

Pero también implica desafíos que no se pueden minimizar. Primero, la escala. Estamos hablando de proyectos industriales de gran magnitud, que requieren energía, agua, infraestructura y uso intensivo del territorio. En el caso de Mejillones, esto se cruza con una realidad conocida: una comuna que ya concentra una alta carga industrial.

Segundo, la planificación. No podemos permitir que este nuevo ciclo repita errores del pasado. No se trata de frenar inversiones, sino de ordenarlas. De evitar que cada proyecto avance por separado, sin una visión común de territorio. Por lo tanto, es de suma importancia el desarrollo de infraestructura compartida que permita un trabajo colaborativo entre los que hoy quieran invertir en esta nueva industria y donde el Estado debe jugar un rol fundamental en la inversión pública que dé sustancia a la infraestructura necesaria.

Hoy en día Mejillones ya tiene una ventaja importante por sobre Magallanes, ya que nuestra planificación territorial y experiencia en la región, ha permitido desarrollar infraestructura (carretera y puerto) que ya permite realizar actividades productivas de gran tamaño sin afectar el funcionamiento de la ciudad.

Tercero, la relación con la comunidad. Hoy las exigencias son distintas. Las vecinas y vecinos no solo quieren información, quieren participación, certezas y beneficios concretos. Y aquí hay un punto clave: el desarrollo del hidrógeno verde no puede construirse de espaldas a Mejillones.

Si esta industria va a instalarse en nuestra comuna, debe traducirse en oportunidades reales para nuestra gente. Eso significa empleo local, formación técnica, capacitación y acceso a los nuevos trabajos que esta industria va a generar.

También significa hacerse cargo de temas sensibles como el uso del agua, la seguridad de los procesos industriales y el impacto en el entorno. Sabemos que varios de estos proyectos consideran el uso de agua desalinizada o reutilización de aguas residuales, lo que abre una oportunidad para avanzar con mayor responsabilidad hídrica.

Pero eso no basta. La confianza no se construye solo con medidas técnicas, sino con transparencia y cumplimiento. Como municipio, tenemos una responsabilidad clara: velar porque este desarrollo tenga sentido para la comuna. Que no sea solo una buena noticia para el país o para los mercados internacionales, sino también para quienes viven día a día en Mejillones.

Eso implica exigir planificación territorial, estándares ambientales claros y una coordinación efectiva entre el Estado, las empresas y la comunidad. También implica mirar más allá del corto plazo.

El hidrógeno verde no es solo una industria. Es parte de una transformación más profunda, que puede cambiar la forma en que producimos, exportamos y nos relacionamos con el medio ambiente. Y en ese proceso, Mejillones tiene una ventaja, pero también una responsabilidad.

Podemos ser un ejemplo de cómo hacer bien las cosas. De cómo compatibilizar desarrollo industrial con calidad de vida. De cómo avanzar en energía limpia sin repetir lógicas que ya han demostrado sus límites. Pero eso no va a ocurrir solo. Requiere decisiones, voluntad y una mirada clara de futuro.

Como alcalde, creo que este es el momento de poner esas definiciones sobre la mesa. De decir con claridad que queremos desarrollo, pero no a cualquier costo. Que queremos inversión, pero con sentido de territorio.

El hidrógeno verde puede marcar un antes y un después para Mejillones. La diferencia va a estar en cómo decidamos enfrentarlo hoy.

"Nuestro potencial se sustenta en una ventaja natural excepcional: contamos con algunos de los recursos renovables más competitivos del mundo, desde la radiación solar del Desierto de Atacama hasta los vientos patagónicos".



**MARCOS KULKA**  
Director Ejecutivo  
Asociación Chilena de Hidrógeno A.G.

Chile se encuentra ante una encrucijada histórica: la transición energética global posiciona a nuestro país como un actor estratégico, en un rol que no habíamos ocupado antes. En este contexto, la industria del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) no debe entenderse únicamente como un nuevo sector exportador, sino como un vector habilitante para la descarbonización, la transformación industrial y el desarrollo de nuevas cadenas de valor con alto contenido tecnológico y social.

Nuestro potencial se sustenta en una ventaja natural excepcional: contamos con algunos de los recursos renovables más competitivos del mundo, desde la radiación solar del Desierto de Atacama hasta los vientos patagónicos. Sin embargo, el desafío que enfrentamos hoy trasciende lo tecnológico. Es un desafío sistémico, que involucra infraestructura, regulación, financiamiento y capital humano. En este contexto, el documento **"Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V) para Chile"** ofrece una hoja de ruta relevante para abordar esta complejidad.

Mejillones emerge en este análisis como un verdadero laboratorio vivo y *hub* estratégico. Su base logística preexistente -puertos de clase mundial, redes ferroviarias y plantas desalinizadoras- permite reducir significativamente las barreras de entrada y el CAPEX inicial de proyectos a gran escala. Iniciativas como el proyecto Volta, que ya cuenta con su Resolución de Calificación Ambiental, demuestran que la institucionalidad puede responder adecuadamente cuando se diseñan proyectos con enfoque preventivo y estándares internacionales.

No obstante, el principal desafío hacia adelante es el escalamiento. Para lograrlo, debemos avanzar desde una lógica de proyectos individuales hacia un modelo de infraestructura compartida. El desarrollo de terminales portuarios y ductos comunes no solo mejora la rentabilidad -al reducir costos como el LCOA-, sino que también permite operar de manera más eficiente desde el punto de vista ambiental, minimizando impactos acumulativos y optimizando el uso del territorio.

En el ámbito regulatorio, instrumentos como la Ley Marco de Autorizaciones Sectoriales (LMAS) y la plataforma SUPER pueden contribuir a otorgar mayor previsibilidad y eficiencia, manteniendo altos estándares. En paralelo, la naturaleza intensiva en capital de esta industria exige avanzar en esquemas de *blended finance* y mecanismos de reducción de riesgos que faciliten la participación de inversión privada, apoyados por banca multilateral y aseguradoras.

Un pilar igualmente crítico es el desarrollo de talento técnico. Anticipar esta necesidad, mediante esquemas de formación modular y certificable, será clave para asegurar la sostenibilidad de la industria, especialmente en regiones como Antofagasta donde ya existe una base relevante de capacidades.

Finalmente, el despliegue del hidrógeno verde dependerá de la construcción de una licencia social sólida y de avanzar hacia una verdadera justicia territorial. Mejillones, con su historia de carga ambiental, exige un nuevo contrato social basado en la transparencia, el valor compartido y una gobernanza multinivel efectiva. El H<sub>2</sub>V abre la oportunidad de desarrollar territorios inteligentes, donde la innovación productiva, como fertilizantes verdes o e-fuels, conviva armónicamente con la protección del entorno y el bienestar de las comunidades.

Desde la Asociación Chilena del Hidrógeno, nuestro rol es impulsar esta articulación público-privada y académica, para que el hidrógeno verde deje de ser una promesa y se consolide como una base real de desarrollo soberano, sostenible y equitativo para Chile.

**"Tenemos la convicción de que debemos avanzar hacia modelos colaborativos de desarrollo, ya que la magnitud de las inversiones requeridas y la complejidad de las cadenas productivas, hacen indispensable una mayor coordinación entre organismos públicos, empresas, instituciones académicas y actores locales".**



**KENIS AGUIRRE AGUILAR**  
Director Ejecutivo  
H2 Antofagasta A.G.

La industria del hidrógeno verde y sus derivados, está abriendo una magnífica oportunidad, para una transformación profunda de la matriz productiva regional que va mucho más allá de los aspectos meramente energéticos, ya que como nunca antes se incorporan fuertemente los temas ambientales, comunitarios y de gobernanza, convirtiéndose en una nueva posibilidad de diversificación productiva, reconversión industrial y descarbonización para la región de Antofagasta. Hoy existe un amplio consenso, respecto a que esta nueva industria representa una oportunidad, para impulsar una transformación económica, tecnológica y territorial, capaz de redefinir la posición de Chile en los mercados internacionales y fortalecer el desarrollo de nuestras regiones. Las distintas visiones, coinciden en que el principal desafío no radica únicamente en producir hidrógeno a costos competitivos, sino en construir las condiciones necesarias para que esta actividad genere encadenamientos productivos y valor compartido, tanto para la industria que la desarrolla, pero también para la comunidad que la acoge. Esto implica lograr una amplia y robusta gobernanza, que incorpore a todos los actores del ecosistema, significa desarrollar capital humano local, promover la innovación y el desarrollo en nuestras universidades regionales, fortalecer el concepto de "infraestructura compartida" y asegurar que los beneficios económicos alcancen efectivamente a las comunidades donde se emplazarán los proyectos.

Dentro de este escenario, la región de Antofagasta y especialmente la comuna de Mejillones, aparece como uno de los territorios mejor posicionados para liderar esta transformación. La combinación de recursos energéticos renovables ampliamente disponibles en el norte de Chile, con un extraordinario recurso solar y un importante potencial eólico, junto a una experiencia industrial centenaria apalancada por la minería, y una infraestructura logística ampliamente desarrollada, ofrecen una base robusta para la consolidación de nuevos polos productivos asociados al hidrógeno verde y sus derivados, y no solo para exportación, también para consumo interno en nuestro país, por parte de grandes industrias como la

minería, la logística, la industria química y otras. La industria del Hidrógeno Verde y sus Derivados avanza en el mundo, en Chile, y también en nuestra región, ejemplo de esto es la obtención de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) por parte de los proyectos, Volta de la empresa MAE Energy en Mejillones y el proyecto H2-Green Mining de la empresa Susterra en Calama, junto a otros proyectos ingresados también al sistema de evaluación ambiental y que se encuentran en proceso de desarrollo. Por ello, la expansión de esta nueva industria debe considerar de manera simultánea, variables ambientales, sociales, urbanas y productivas, incorporando mecanismos de coordinación, que permitan compatibilizar distintos usos del territorio y prevenir conflictos futuros, aspectos en lo que se ha avanzado fuertemente este último tiempo, con hechos concretos, como el lanzamiento reciente de la hoja de ruta regional de hidrógeno verde y derivados para Antofagasta, la cual fue elaborada incorporando la mirada de distintos actores como la academia, la comunidad, el estado y los privados.

Desde H2 Antofagasta, tenemos la convicción que debemos avanzar hacia modelos colaborativos de desarrollo, ya que la magnitud de las inversiones requeridas y la complejidad de las cadenas productivas, hacen indispensable una mayor coordinación entre organismos públicos, empresas, instituciones académicas y actores locales. Esta colaboración resulta fundamental para acelerar procesos, optimizar recursos, reducir riesgos de desarrollo y generar certezas para quienes participan en la construcción de esta nueva industria. Asimismo, el desarrollo del capital humano local será uno de los factores decisivos para el éxito, ya que la demanda por nuevas competencias técnicas y profesionales, obligará a fortalecer los sistemas de formación, capacitación y especialización, permitiendo que trabajadores y empresas locales, participen activamente en las oportunidades que emerjan durante las próximas décadas.

Otro elemento fundamental de éxito es la necesidad de impulsar infraestructura habilitante compartida, donde la planificación temprana de puertos, sistemas logísticos, suministro de agua desalada, redes de transporte y servicios asociados, permitirá mejorar la competitividad de los proyectos, reducir costos y minimizar impactos sobre el entorno. Este enfoque, favorece una utilización más eficiente del territorio y del borde costero, de los recursos públicos y privados, al tiempo que facilita el crecimiento ordenado de la industria. No obstante, un factor que aparece con fuerza en los distintos planteamientos, es la dimensión social asociada al desarrollo de esta nueva industria, donde la aceptación y apoyo de las comunidades dependerá de la capacidad de la industria para generar confianza, promover la vinculación temprana y asegurar que los beneficios locales del desarrollo sean percibidos de manera concreta por la población. Aspectos fundamentales, como la creación de empleo de calidad, la transferencia de conocimiento, la transparencia de los procesos, la mejora de infraestructura local y la protección ambiental, constituyen elementos esenciales para construir esa confianza.

No cabe duda de que la nueva industria del hidrógeno verde y sus derivados representa una gran oportunidad, para impulsar una nueva etapa de desarrollo en la región de Antofagasta, la que ha sido prácticamente mono dependiente por décadas, de la gran minería del cobre. El éxito de esta nueva industria dependerá también de la capacidad de articular crecimiento económico, innovación, sostenibilidad, cohesión territorial y social, en una estrategia común que permita convertir una ventaja natural en una ventaja competitiva de largo plazo.

El documento **"Visiones, Modelos y Experiencias sobre el Despliegue del Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V) para Chile"**, entrega un valioso aporte, presentando visiones diversas de cómo construir esta nueva industria y cómo el desarrollo debe aportar al crecimiento económico, pero también a mejorar la calidad de vida de nuestras comunidades.

## COMITÉ ASESOR

Este proyecto ha sido impulsado gracias al compromiso de empresas del rubro energético, logístico y de transporte.



# ÍNDICE

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                           |          |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1.  | Introducción                                                                                                                                                                                                                                                              | pág. 22  |
| 2.  | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                               | pág. 24  |
| 3.  | Dimensiones del H <sub>2</sub> V en Chile                                                                                                                                                                                                                                 | pág. 28  |
| 3.1 | Dimensión Ecosistémica y Estructural                                                                                                                                                                                                                                      | pág. 30  |
|     | Rudolf Araneda<br>Gabriel Bravo<br>Alvaro Castro<br>Edward Fuentealba<br>Lindley Maxwell<br>Lorena Olivares<br>Javier Quispe<br>Federico Rodríguez<br>Joris van de Klundert, César Cerda, Macarena Larraín y Tito Homem de Mello                                          |          |
| 3.2 | Dimensión Territorial                                                                                                                                                                                                                                                     | pág. 60  |
|     | Francisco Albornoz<br>Rodrigo De la Calle<br>Jaime Coquelet<br>Wolfram Jahn<br>Roberto Moris<br>Marcelo Villagrán<br>NatCap Urbano                                                                                                                                        |          |
| 3.3 | Dimensión Cadena de Valor Central de la Industria H <sub>2</sub> V                                                                                                                                                                                                        | pág. 84  |
|     | Francisco Belmar<br>Elodie Blanco<br>Felipe Givovich<br>Felipe Huerta<br>Mauricio Isaacs<br>Patricio Lillo<br>Nahuel Micone<br>Raúl Montano y Jorge Tamayo<br>Andrea Moraga<br>Agustina Ravotti<br>Lukas Roessler y Merit Bodner<br>Jorge Taboada<br>Erik van der Heidjen |          |
| 3.4 | Dimensión Competitividad y Desarrollo País                                                                                                                                                                                                                                | pág. 124 |
|     | Federico Del Mondo<br>Ramón Molina<br>Hans Vrijenhoef<br>Paula Wuth                                                                                                                                                                                                       |          |
| 4.  | Referencias y bibliografía                                                                                                                                                                                                                                                | pág. 136 |

# 1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la transformación energética mundial, el hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) emerge como una palanca estratégica para reducir emisiones, ampliar la base productiva y habilitar nuevas cadenas de valor industriales. Chile reúne condiciones geográficas excepcionales, conocimiento técnico acumulado y un ecosistema institucional-empresarial que le otorgan una posición favorable para promover esta industria con proyección tanto local como internacional.

El presente documento, titulado **“Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) para Chile. Caso Mejillones: una perspectiva multidisciplinaria”**, reúne miradas provenientes de la academia, la industria, el sector público y el mundo de la innovación con el objetivo de analizar, desde distintos ángulos, las oportunidades, desafíos y condiciones habilitantes para el desarrollo del hidrógeno verde en el país.

A lo largo de sus capítulos, el texto aborda dimensiones estratégicas como la infraestructura, la gobernanza, el financiamiento, la cadena de valor, la competitividad territorial y la articulación de ecosistemas. El caso de Mejillones se presenta como un territorio de referencia que permite observar, en un espacio concreto, cómo convergen factores logísticos, industriales, energéticos y sociales que resultan clave para el despliegue de esta industria emergente.

Más que ofrecer una única respuesta, el documento busca aportar insumos para la discusión, identificar aprendizajes y proponer marcos de acción que contribuyan a una implementación sostenible, coordinada y con visión de largo plazo. Se trata de una invitación a pensar el hidrógeno verde no solo como una oportunidad tecnológica o energética, sino como un proyecto país que requiere articulación institucional, colaboración público-privada y una mirada sistémica del desarrollo.

## 2. METODOLOGÍA

### 1. Enfoque metodológico general

El presente estudio se sustenta en una metodología progresiva, interdisciplinaria y territorialmente situada, diseñada para abordar el despliegue del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) en Chile desde una perspectiva sistémica. Lejos de tratarse de un ejercicio lineal, el proyecto ha evolucionado a lo largo de sus distintas etapas, ajustando sus énfasis analíticos en función de los hallazgos intermedios, las dinámicas propias del territorio de Mejillones y las necesidades de información requeridas para la toma de decisiones estratégicas.

Desde su concepción, el estudio asumió que el despliegue del H<sub>2</sub>V no puede comprenderse exclusivamente como un fenómeno tecnológico o energético. Se trata, más bien, de un proceso de transformación estructural que involucra dimensiones ecosistémicas, regulatorias, territoriales, productivas, financieras y sociales, cuya interacción configura un sistema complejo. En consecuencia, la metodología adoptada se orientó a construir un marco analítico capaz de integrar dichas dimensiones, evitando aproximaciones fragmentadas.

Este enfoque se apoya en tres principios rectores: (i) integralidad multidimensional, (ii) interdisciplinariedad académica y (iii) pertinencia territorial, tomando a Mejillones como caso estratégico para observar las condiciones habilitantes y las tensiones asociadas al desarrollo del H<sub>2</sub>V en Chile.

### 2. Primera etapa: diagnóstico y construcción de una taxonomía multidimensional

La primera etapa del proyecto tuvo un carácter exploratorio y estructurante. A través de mesas de trabajo interdisciplinarias, revisión documental y diálogo con actores vinculados al ecosistema energético y territorial, se elaboró un diagnóstico general que permitió identificar las principales variables que inciden en el despliegue del H<sub>2</sub>V.

El resultado más relevante de esta fase fue la construcción de una taxonomía analítica que organiza las dimensiones críticas del proceso. Esta taxonomía no cumple únicamente una función descriptiva, sino que opera como arquitectura conceptual del estudio. En ella se articulan cuatro grandes ámbitos: la dimensión ecosistémica y estructural; la dimensión territorial; la cadena de valor central de la industria; y la competitividad y desarrollo país.

La dimensión ecosistémica y estructural incorpora factores habilitantes tales como infraestructura crítica compartida, institucionalidad y marcos regulatorios, financiamiento e incentivos, estrategias de desarrollo de talento y ecosistemas de ciencia, tecnología e innovación. Estos elementos configuran el entorno estructural dentro del cual los proyectos de H<sub>2</sub>V pueden o no consolidarse.

Por su parte, la dimensión territorial reconoce que el despliegue del H<sub>2</sub>V ocurre en espacios concretos, con atributos ambientales, sociales y culturales específicos. Esta perspectiva permitió identificar tempranamente la necesidad de profundizar en la planificación territorial y urbana, entendida no solo como instrumento normativo, sino como herramienta de diseño estratégico de futuro.

Finalmente, la incorporación de la cadena de valor y de la dimensión de competitividad permitió ampliar el análisis hacia los sectores productivos, los desafíos transversales, la demanda nacional e internacional y los modelos de inserción estratégica de Chile en los mercados globales.

Esta primera etapa no solo permitió ordenar el campo analítico, sino también priorizar áreas de profundización, destacando la planificación territorial, los encadenamientos productivos sinérgicos y el fortalecimiento de la base tecnológica e innovadora.

3. Segunda etapa: profundización territorial y evaluación de capital natural

A partir de la priorización realizada, la segunda etapa se concentró en la dimensión territorial, asumiendo que la sostenibilidad del despliegue del H<sub>2</sub>V depende en gran medida de su coherencia con las condiciones ecológicas y sociales del territorio.

En este contexto, se aplicó la metodología de evaluación de capital natural en la comuna de Mejillones, integrando el enfoque por ecosistemas como marco conceptual orientador. Este enfoque permitió desplazar la mirada desde una evaluación exclusivamente sectorial hacia una comprensión funcional del territorio, considerando las interacciones entre componentes bióticos, abióticos y antrópicos.

La evaluación de funciones ecosistémicas, tales como almacenamiento de carbono, hábitat y refugio, polinización o conexión cultural, permitió identificar activos estratégicos y zonas de mayor sensibilidad ambiental. A partir de ello, se avanzó hacia una propuesta de zonificación ecosistémica, concebida como instrumento de apoyo a la planificación territorial y como insumo técnico para orientar decisiones de localización industrial.

Este ejercicio no solo generó información ambiental relevante, sino que permitió integrar variables de adaptación climática, gestión hídrica, riesgos naturales, patrimonio cultural y bienestar comunitario. En consecuencia, la dimensión territorial dejó de ser un marco pasivo de emplazamiento para transformarse en un componente activo de la estrategia de desarrollo del H<sub>2</sub>V.

4. Tercera etapa: integración sistémica y elaboración de visiones interdisciplinarias

La etapa final del proyecto, y en la que se enmarca el presente documento, retoma las dimensiones priorizadas y las integra en una reflexión estratégica de mayor alcance. El objetivo es ofrecer una visión transversal desde el ámbito académico sobre los modelos, desafíos, variables críticas y buenas prácticas asociadas al despliegue del H<sub>2</sub>V en Mejillones y, por extensión, en Chile.

Metodológicamente, esta fase combina revisión comparada de experiencias internacionales, análisis de modelos de gobernanza e incentivos, evaluación de estructuras productivas y sistematización de aportes de expertos nacionales provenientes de distintas disciplinas.

El análisis de la cadena de valor permite examinar los sectores involucrados, desde la generación energética hasta el transporte y la logística, junto con los desafíos transversales en materia de infraestructura, certificaciones, desarrollo de negocios, talento y vinculación con el medio. Asimismo, la consideración de la demanda nacional e internacional introduce variables de mercado, política comercial e inversiones extranjeras, que condicionan la viabilidad económica de los proyectos.

En paralelo, la dimensión de competitividad y desarrollo país incorpora ejercicios de prospectiva, análisis de ventajas comparativas, evaluación de modelos de encadenamientos productivos y reflexión sobre rentabilidad y riesgos. Esta integración permite conectar el caso territorial de Mejillones

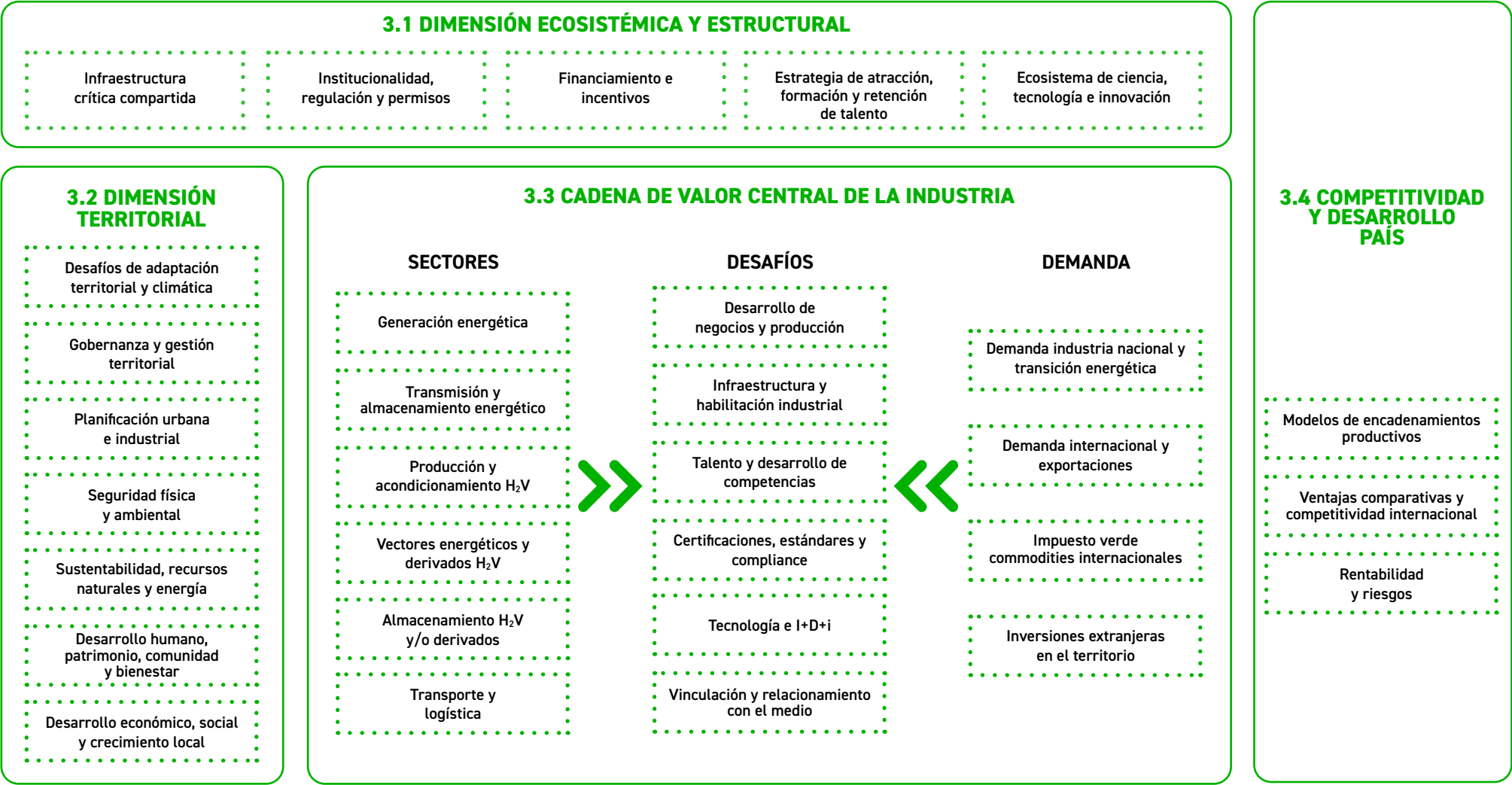
con una estrategia nacional de inserción en la economía del hidrógeno.

5. Consideraciones finales sobre el diseño metodológico

En conjunto, la metodología adoptada articula diagnóstico participativo, construcción conceptual, evaluación territorial basada en capital natural y análisis comparado internacional. Su carácter evolutivo ha permitido transitar desde una identificación amplia de dimensiones relevantes hacia una integración estratégica de variables críticas para el despliegue del H<sub>2</sub>V.

Más que ofrecer una receta prescriptiva, el estudio propone un marco de comprensión interdisciplinario que reconoce la complejidad del proceso de transición energética. En este sentido, el aporte metodológico radica en haber construido una plataforma analítica que conecta sostenibilidad ecológica, planificación territorial, desarrollo productivo e inserción internacional, contribuyendo así a fortalecer la calidad del debate y la toma de decisiones en torno al hidrógeno verde en Chile.

DESPLIEGUE H<sub>2</sub>V COMO DESAFÍO MULTIDIMENSIONAL



# 3. DIMENSIONES DEL H<sub>2</sub>V EN CHILE



# 3.1 DIMENSIÓN ECOSISTÉMICA Y ESTRUCTURAL

El hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) se ha consolidado como un vector energético clave en la transición global hacia economías bajas en carbono, desplazando el foco desde la mera disponibilidad de recursos renovables hacia la capacidad de los territorios para articular infraestructura, logística, financiamiento, innovación y acceso a mercados internacionales.

La comuna de Mejillones, en la Región de Antofagasta, presenta condiciones particularmente favorables para su consolidación como *hub* de hidrógeno verde y derivados. Su infraestructura portuaria, energética e industrial, desarrollada históricamente en torno a la minería y la generación eléctrica, constituye un activo estratégico que reduce barreras de entrada, acelera la maduración de proyectos y mejora la competitividad de Chile frente a otros polos emergentes a nivel internacional.

Esta dimensión del documento aborda el rol de la infraestructura habilitante y las oportunidades de exportación como ejes estructurales del despliegue del H<sub>2</sub>V, situando el análisis en un marco comparado con experiencias internacionales. Se examina, en particular, la infraestructura compartida como condición clave para compatibilizar el crecimiento acelerado de la industria con criterios de sostenibilidad económica, ambiental y territorial, optimizando el uso de activos, reduciendo costos y minimizando impactos acumulativos.

Asimismo, se reconoce el financiamiento y los incentivos como pilares estructurales del ecosistema del H<sub>2</sub>V. La elevada intensidad de capital, los riesgos tecnológicos y las incertidumbres regulatorias propias de una industria emergente requieren arquitecturas financieras integradas, capaces de movilizar inversión temprana, atraer capital privado y mitigar riesgos sistémicos.

El despliegue del hidrógeno verde en Mejillones no debe entenderse únicamente como un desafío técnico-económico, sino como un proceso socioecológico y territorial, donde la gobernanza, la coordinación multinivel y la legitimidad social resultan determinantes para consolidar una plataforma exportadora de energías limpias compatible con los objetivos de desarrollo sostenible del país.



## INFRAESTRUCTURA COMPARTIDA: CLAVE PARA LA COMPETITIVIDAD DE CHILE COMO OFERENTE DE HIDRÓGENO VERDE Y SUS DERIVADOS

### RUDOLF ARANEDA

Partner  
Arroyo Investors  
Presidente  
GASMAR SpA

La experiencia de países líderes en desarrollo económico, nos muestra cuán relevante es contar con infraestructura compartida de gran escala, especialmente en rubros como el energético, el logístico y el portuario.

Algunos ejemplos destacados son:

- Puerto de Rotterdam, que se convirtió en el principal *hub* de combustibles energéticos de Europa.
- Puerto de Singapur, como gran *hub* de *bunkering* y almacenamiento de Asia.
- Wilhelmshaven, que recientemente permitió un desarrollo acelerado para que Alemania y otros países pudieran recibir LNG tras la crisis provocada por la interrupción del suministro de gas ruso.
- Henry Hub, que al actuar como nodo en el que se interconectan múltiples gasoductos provenientes de diversos estados norteamericanos, terminó estableciendo el principal precio de referencia del gas natural a nivel mundial.

El desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados en Chile tiene mucho sentido porque el país cuenta con las ventajas de poseer extraordinarios recursos de energía solar y eólico, además de vastas extensiones territoriales en la Región de Antofagasta y en Magallanes en las cuales desplegar plantas de generación de energía renovable de muchos miles de MW que permitan contar con el insumo más relevante a bajo costo.

Pero para que Chile pueda alcanzar un costo competitivo del hidrógeno, amoníaco y otros combustibles verdes, puestos en planta de los usuarios finales (principalmente en Europa, Japón y Corea), toda la cadena de permisos, financiamiento, inversión, escala de producción y logística también tiene que ser eficiente para lograr tal competitividad.

Uno de los ámbitos en los que claramente resulta conveniente avanzar en Chile es en el desarrollo de infraestructura de almacenamiento, portuaria y logística compartida y de gran escala. Allí cabe destacar el proyecto Mejillones Green Fuels Terminal (MGFT) que están desarrollando Arroyo Investors, administradora de *private equity funds* norteamericana que invierte en generación eléctrica e infraestructura asociada a la energía, y GASMAR SpA. Estas empresas aportan una vasta experiencia en el desarrollo, construcción y operación de numerosas plantas de generación, gasoductos, terminales de licuefacción de gas, provisión de servicio de *bunkering* de GNL y operación de los principales terminales de recepción y almacenamiento de GLP del país (el propano se licúa a temperaturas similares al amoníaco y se traslada en los mismos barcos).

El proyecto MGFT consiste en un terminal de gran escala ubicado en la Bahía de Mejillones, con dedicación exclusiva en la prestación de servicios de recepción vía ductos, licuefacción, almacenamiento de hidrógeno y amoníaco verde, y su carguío en naves con destino al mercado de exportación así como en trenes y camiones con destino al mercado local.

Se trata de un proyecto de infraestructura compartida, concebido para prestar servicios a múltiples productores de hidrógeno verde y derivados de la Región de Antofagasta que irá creciendo en capacidad junto a sus usuarios hasta alcanzar gran escala (hasta 4,2 millones de toneladas de amoníaco por año, y 220.000 toneladas de hidrógeno por año).

Las ventajas principales de un terminal de estas características son:

**1. Lograr economías de escala y menores costos unitarios por los servicios de licuefacción, almacenamiento,** carguío de naves de exportación y servicios logísticos para acceder al mercado

local, que cualquiera de los productores de hidrógeno verde y derivados pudiera lograr a nivel individual.

**2. Acceso a un muelle especializado, diseñado para recibir las naves de transporte de amoníaco y de hidrógeno de mayor tamaño** que se proyecta estarán disponibles en diez años más, como los *ultra-large ammonia carriers* que cargarán 100.000 toneladas. Cabe señalar que el menor costo de transporte por tonelada de amoníaco en tales naves desde Chile a Rotterdam o a Japón, será de aproximadamente USD 70/ton; esto es, aproximadamente 10% del precio proyectado del amoníaco, o toda la ventaja del recurso solar o eólico chileno. Esta ventaja es indispensable para compensar nuestra mayor distancia a los principales mercados de destino.

**3. Mayor seguridad:** el amoníaco (hoy gris) es el segundo *commodity* químico más transado a nivel mundial y existen decenas de terminales marítimos de recepción y almacenamiento. Al igual que MGFT todos ellos son operados por personal altamente especializado y están dedicados exclusivamente al amoníaco, evitando cualquier otra carga o desplazamiento de grúas que pudiera interferir o afectar la seguridad de los estanques y los ductos que transportan amoníaco. Además, como emplazamiento, se escogió un frente de la Bahía al Norte del Terminal GNL Mejillones, alejado 9 kms. del área urbana de Mejillones.

**4. Menor impacto ambiental agregado:** al concentrar los servicios de licuefacción, almacenamiento y carguío de naves, las tomas de agua de mar para los sistemas de enfriamiento, así como los ductos de conexión con las plantas productoras, en vez de distribuirlas en múltiples terminales individuales, se acotan los impactos ambientales tanto en tierra como mar.

**5. Acota los plazos de aprobación de permisos e inversión de los proyectos de producción de hidrógeno verde y derivados.** Al evitar que cada uno de los proyectos de producción deba obtener su propia concesión marítima y permisos ambientales en el frente costero, así como derechos de paso de sus ductos por la zona industrial de Mejillones, se acotan significativamente los plazos totales de obtención de sus permisos, lo que incide favorablemente en los costos totales de su inversión. La posibilidad de externalizar los servicios de licuefacción, almacenamiento y carguío de naves disminuye a su vez la complejidad y plazos de inversión, selección y capacitación de personal y puesta en servicio de las plantas de producción de hidrógeno verde y derivados.

**6. Se acota la interferencia con las actuales y futuras actividades industriales de la Bahía de Mejillones, permitiendo un uso eficiente y seguro del territorio.** Al concentrar la salida por un gran terminal de licuefacción, almacenamiento y carguío de naves de acceso abierto, se acota el cruce de caminos y carreteras dedicadas a la circulación de insumos y productos de las demás actividades industriales de la bahía, con los ductos de transporte de amoníaco, hidrógeno, agua y líneas de alta tensión requeridos entre las plantas de producción y el terminal.

En caso de no contar con un terminal especializado que brinde servicios a múltiples productores, cada uno de ellos tendría que obtener permisos para cruzar el área industrial para dirigirse a un muelle diferente, incrementando el número de cruces complejos y la dificultad del desplazamiento de las demás actividades industriales y comerciales y de su expansión futura, aumentando el impacto adverso agregado.

Para minimizar tal interferencia, además de la concesión del terreno en el frente de playa de la bahía, MGFT ha solicitado una servidumbre y propone se reserve un corredor en el extremo norte del área industrial de la bahía, por el cual se proyecta circulen los ductos que llevan agua desalada a las productoras y los ductos a través de los cuales el terminal recibirá el amoníaco (y eventualmente el hidrógeno) producido por ellos. Aquello permitirá un uso más eficiente y seguro del territorio.

**7. Se facilita el respaldo cruzado entre productores, permitiendo que Chile pueda incrementar la seguridad de continuidad de sus entregas.** Especialmente durante los primeros años, las diversas plantas tendrán una alta dependencia de ciertos equipos críticos sin respaldo (como sus plantas Haber-Bosch) por lo que, al compartir infraestructura de recepción, almacenamiento y carguío de naves, podrán concordar más fácilmente el respaldo cruzado entre ellas (con un efecto similar al que se logra con plantas de generación eléctrica conectadas a un mismo sistema de transmisión).

**8. Competencia y eficiencia de mercado:** una infraestructura compartida, de acceso abierto con una estructura tarifaria transparente y no discriminatoria, facilita el acceso a nuevos entrantes a servicios esenciales en plazos y costos más acotados, mejorando la competitividad de la oferta de hidrógeno y amoníaco verde chilenos.

**9. Atracción de inversión extranjera:** Chile competirá con numerosos otros países que también desean ser proveedores de este tipo de combustibles verdes. La existencia de infraestructura compartida de acceso abierto que permita acortar plazos de aprobación y costos, además de la invariabilidad tributaria propuesta por el nuevo gobierno de Chile, representa un gran estímulo para inversionistas extranjeros.

**10. Facilita tanto las exportaciones como el suministro a usuarios locales y a naves que utilicen amoníaco como combustible.** El terminal contempla no solo un muelle que permita cargar las naves más grandes disponibles a nivel internacional, sino además:

a. Un terminal de carga de camiones y trenes (amoníaco a presión o en fase líquida) necesarios para abastecer el mercado local.

b. Barcazas para proveer servicio de *bunkering* a naves que utilicen amoníaco como combustible y que recalen en los diversos puertos de Mejillones y Antofagasta.

**11. Quedar habilitado además del amoníaco para recibir, licuar, almacenar y cargar naves especializadas en hidrógeno,** en caso que los desarrollos tecnológicos lo permitan (algunas empresas japonesas estiman ello sucederá alrededor de 2035 ó 2040). Esto tiene sentido, dado que el hidrógeno es el vector más directo: si se pudiera trasladar directamente para ser usado en celdas de combustible se evitarían pérdidas energéticas de hasta 40% por convertir el H<sub>2</sub> en amoníaco y luego *crackearlo* de regreso a H<sub>2</sub>. Dado que en la actualidad los procesos de licuar, almacenar y trasladar amoníaco están completamente maduros, las exportaciones se iniciarán de esta forma, y dadas las ventajas del amoníaco en algunas aplicaciones (como motores marinos), posiblemente coexistan ambas formas de exportación (como H<sub>2</sub> y como amoníaco) una vez que las tecnologías asociadas al H<sub>2</sub> licuado maduren.

Claramente conviene desarrollar un terminal con características similares a MGFT para atender los diversos proyectos que podrían desarrollarse en Magallanes, considerando que en síntesis estratégica, este tipo de terminales de infraestructura compartida:

- Reduce los costos e incrementan la competitividad de la oferta chilena.
- Acota significativamente los impactos ambientales y territoriales agregados.

- Facilita la entrada de múltiples actores, incrementando la oferta chilena y la competencia.
- La especialización y dedicación exclusiva, mejora radicalmente la seguridad de la operación.
- Permite un uso más eficiente y seguro del territorio y habilita el establecimiento de nuevas industrias en la zona.
- Acelera la transición energética del país.
- Incrementa la confiabilidad en la continuidad del suministro desde Chile.
- Menores plazos de aprobación y acceso abierto a servicios esenciales viabilizan e incrementan la inversión extranjera.
- Su existencia incrementa la confianza de los principales países usuarios (Europa, Japón, Corea) en productores que contemplen establecerse en Chile.
- El mayor grado de desarrollo de la industrial del hidrógeno verde y sus derivados en Chile, atraerá el establecimiento de industrias intensivas en esos combustibles (como acero, fertilizantes, y aluminio verde).

Dada la importancia estratégica de terminales de este tipo para el país, será importante incluir a nivel de políticas públicas:

a. Reservar los terrenos fiscales para desarrollar este tipo de terminales, así como los corredores de acceso y acotar radicalmente los cargos por concesionar o asignar tales terrenos y la concesión marítima respectiva hasta que las condiciones de mercado viabilicen su materialización.

b. Impulsar la inclusión en planes de desarrollo comunal y regional e instrumentos de planificación territorial, los terrenos necesarios en emplazamientos adecuados, para los terminales de infraestructura compartida, y corredores para el tendido de ductos desde las plantas productoras, con las facultades para el transporte, licuefacción, almacenamiento en grandes cantidades de estos combustibles (que en el caso del amoníaco es uso industrial de sustancias peligrosas).

c. Asegurar y normar el acceso abierto (*open access*) y el esquema tarifario de terminales de uso compartido de gran escala.

d. Aprobar las normas técnicas aplicables de acuerdo con altos estándares internacionales y acotar los plazos de otorgamiento de permisos y concesiones, de modo que permita tanto a los interesados en invertir en plantas de producción de hidrógeno y amoníaco verde, como en terminales de infraestructura compartida a avanzar en la ingeniería y selección de proveedores de modo de lograr una buena estimación del CAPEX y OPEX

de las plantas, necesaria para poder hacer una oferta de suministro a tiempo y en firme a potenciales compradores de estos combustibles. Solo así será posible que alguno (s) de ellos se adjudique (n) un contrato de suministro y pueda (n) confirmar sus requerimientos de servicios con el terminal. Ello les posibilitará a ambos obtener el capital y financiamiento necesario para iniciar la producción y exportación.

e. Permitir expresamente el transporte de amoníaco e hidrógeno por cañerías, así como la capacidad de imponer servidumbres para construirlas.

f. Permitir el desarrollo de subsistemas de generación eléctrica de gran escala dedicados a la producción del H<sub>2</sub> Verde y derivados autónomos, no conectados al sistema interconectado central o de tipo *off-grid*, si ello contribuye a minimizar el costo del suministro eléctrico, considerando que el H<sub>2</sub>V es un negocio de arbitraje geográfico de electricidad renovable y de la logística para hacerlo llegar a los usuarios.

g. Considerar el otorgamiento de garantías soberanas para acotar el costo financiero de los proyectos de compañías solventes.

h. Incluir acuerdos técnicos y comerciales con los principales potenciales países de destino referentes al potencial suministro, de hidrógeno verde y derivados desde Chile.

i. Posibilitar expresamente y sin obstáculos el transporte de amoníaco e hidrógeno verde por cañerías así como la capacidad de imponer servidumbres para construir los ductos.



## INSTITUCIONALIDAD, REGULACIÓN Y PERMISOS PARA EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE Y SUS DERIVADOS EN MEJILLONES

### GABRIEL BRAVO

Ex Jefe de División Combustibles y Nuevos Energéticos  
Ministerio de Energía

Chile ya demostró que puede ejecutar transformaciones energéticas a gran escala. En la última década, la capacidad ERNC instalada pasó de ~2,1 GW (2014) a 18,5 GW netos (septiembre 2025) -un aumento aproximado de 8,8 veces-, considerando potencia bruta con proyectos en pruebas, alcanzó 20,3 GW -aprox. 9,7 veces. Sin embargo, actualmente estamos en un momento en que el cuello de botella no es solo tecnológico, sino también institucional: el principal desafío para la competitividad del país está, por un lado, en cómo obtener Costos Nivelados del Hidrógeno (LCOH) que sean competitivos con China teniendo al menos 50% de diferencia en el costo de electrolizadores<sup>1-2</sup> y, adicionalmente, en la forma y plazos en que autorizamos, ordenamos y certificamos proyectos en el territorio. En este aspecto nos centraremos en esta columna.

Tenemos una ventana de oportunidad única. La nueva Ley LMAS<sup>3</sup> y la plataforma SUPER, nos dan las herramientas para pasar de los pilotos a los proyectos a gran escala. La tarea es simple de decir y difícil de ejecutar: menos papeles sueltos, más coordinación; menos jerga, más calendario público y responsabilidad compartida.

#### ¿Por qué Mejillones?

Mejillones parte dos goles arriba. Y por una razón simple, pero elocuente: el ecosistema ya existe. La zona cuenta con puertos de clase mundial, infraestructura de graneles líquidos, líneas férreas y carreteras expeditas, y terminal de GNL y gasoductos que abastecen a minería y generación, dos industrias de gran penetración y desarrollo a nivel regional. Esa base logística reduce CAPEX de entrada para grandes proyectos de inversión, acelera la curva de aprendizaje para producir amoníaco y e-combustibles, y habilita sinergias con la descarbonización acelerada de la zona, manteniendo consistencia, además, con el ambicioso plan de retiro de centrales a carbón autorizado por la Comisión Nacional de Energía.

Y algo aún más importante: la obtención de la Resolución de Calificación Ambiental del proyecto Volta -constituyendo el primer proyecto de amoníaco verde a escala industrial que ha finalizado su tramitación ambiental- ha demostrado que, con diseño preventivo y estándares internacionales, la institucionalidad funciona. Más aún, el proyecto no solo cumple íntegramente la normativa ambiental, sino que incorpora compromisos voluntarios asociados a la comprensión del titular de las condiciones hídricas de la zona y las necesidades propias de la comunidad de la zona de influencia, siendo la mejor evidencia de que un diseño preventivo, trazable y verificable es garantía de que los proyectos que encajan con la institucionalidad ambiental son efectivamente viables.

Sin embargo, también es cierto que parte de los proyectos se entran por una coordinación entre actores que es susceptible de mejora a través de una acción más eficiente en la gestión de permisos, con un liderazgo que facilite la colaboración, que entienda la lógica de contrapartes con intereses disímiles, que reduzca el riesgo de judicialización ante decisiones de aprobación de proyectos de parte del evaluador y que, con todo, se ponga en la lógica del bien común y que reconstruya las confianzas necesarias para el despliegue de nuevos proyectos. Precisamente, porque la oportunidad no espera, la fórmula para Mejillones exige menos discursos y más ejecución disciplinada.

#### Primero: ejecutar la LMAS, sin atajos

La LMAS no es una sigla más. Es la ley que fija reglas comunes para los permisos sectoriales y crea un expediente trazable. Y la plataforma SUPER<sup>4</sup> es su puerta de entrada: un solo lugar para saber qué permisos necesita un proyecto, presentarlos y seguir su avance. ¿Qué se espera de nosotros como Estado? Estandarizar requisitos, dar previsibilidad a los plazos, aplicar proporcionalidad según riesgo y simplificar trámites redundantes, junto a un adecuado acompañamiento de proyectos de parte del Estado a lo largo de todo el proceso de gestión de permisos. ¿Qué se espera de las empresas? Proyectos bien diseñados, con participación temprana y respuestas técnicas a las observaciones.

Las llamadas "técnicas habilitantes alternativas" -aviso o declaración jurada- son útiles, pero solo donde el riesgo es bajo y esté claramente reglado. Y cuando la ley permite 'silencios administrativos' o tramitación ágil para iniciativas estratégicas, hay que usarlos con cuidado: sirven para cortar burocracia, no para bajar estándares ambientales ni saltarse la evaluación ambiental del SEIA.

#### Luego: qué haríamos mañana en Mejillones

Primero, establecer un *hub* Industrial H<sub>2</sub> con zonas de resguardo definidas y una línea base ambiental común que evite 'reinventar' cada DIA, para que cada proyecto no tenga que partir de cero. Segundo, publicar un Plan Maestro de Concesiones Marítimas que ordene/defina los terminales de amoníaco y los trazados submarinos desde su etapa de diseño. Tercero, energía y agua *export-ready*: contratos eléctricos que conversen con las reglas europeas y desalinización con gestión responsable de la salmuera. Cuarto, certificación y trazabilidad interoperable con los estándares de la Unión Europea desde el día uno (RFNBO<sup>5</sup>), evitando doble auditoría. Quinto, instalar una gobernanza con un calendario público y un gestor de permisos para la accountability: cuando todos saben qué hito sigue, se evitan cuellos de botella.

#### Qué podemos copiar (y qué no) del mundo

Alemania activó la demanda con H<sub>2</sub>Global -un esquema público que garantiza precio para cerrar la brecha-; Países Bajos avanzó en una red troncal de hidrógeno con su operador de gas (Gasunie), separando la técnica de la política; Brasil simplificó trámites sin bajar exigencias, y entregando potentes señales para invertir las cuales, dicho sea de paso, le ha permitido lograr el liderazgo a nivel regional. La lección es simple: reglas claras, demanda inicial y trazabilidad de principio a fin.

#### En síntesis

Mejillones tiene con qué: logística de primera, experiencia local y un marco regulatorio que ya se modernizó. Si aplicamos la LMAS con rigor y usamos bien el incentivo a la demanda, Chile puede liderar. Menos trámites dispersos, más foco en ejecutar. Ese es el camino más corto entre la oportunidad y la realidad, junto a una articulación público - privada imprescindible para el liderazgo de Chile en esta nueva industria.



## FINANCIAMIENTO E INCENTIVOS

### ÁLVARO CASTRO

Asesor Financiero Proyecto Hidrógeno Renovable de GIZ  
Certified Expert in Sustainable Finance  
Executive MBA

En diferentes artículos y publicaciones, tanto de circulación nacional como internacional, se menciona que Chile presenta una oportunidad única para el desarrollo del hidrógeno verde y derivados. También se argumenta la ventaja comparativa que tenemos como país en la incorporación de energías renovables para la generación eléctrica, ya sea en norte del país con curvas de radiación por sobre el promedio, y en el sur del país con velocidad de los vientos superiores lo que conlleva a inferir “a priori”, sin mayor análisis técnico, que los factores de planta son muy convenientes para el desarrollo de un proyecto de este tipo a escala industrial, todo lo cual se traduce en una ventaja competitiva frente a otros países.

En las expectativas para el desarrollo del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) en Mejillones se suma su ubicación geográfica, la cual representa una oportunidad estratégica dado los análisis y publicaciones que explican su conveniencia.

Sin embargo, para materializar esta visión se requiere de esquemas robustos, flexibles y adaptados de financiamiento conjuntamente con incentivos tributarios concretos permitiendo superar las barreras económicas inherentes viabilizando la puesta en marcha y desarrollo de la industria de hidrógeno en el país. Es decir, ya estamos frente a un esquema o engranaje integral para movilizar la inversión y el financiamiento creando condiciones habilitantes para el desarrollo de la industria en Chile, considerando una serie de riesgos asociados en cuanto a la intensidad de capital requerido, los riesgos tecnológicos y comerciales asociados, entre otros, que por cierto forman parte del pool de los riesgos identificados.

En el caso de Mejillones, dentro del contexto estratégico del financiamiento, éste debe ser visto como un ecosistema financiero propio que considera ventajas competitivas únicas en la región, como por ejemplo: disponibilidad de energía renovable de alta

calidad -alto *performance*-, proximidad con la industria minera del cobre, infraestructura portuaria existente, acceso a plantas de desalinización, siendo la mirada de un “hub de producción y servicios de infraestructura compartida”, desarrollando por sí sólo un ecosistema que crea un entorno favorable para la generación de diversos modelos de financiamiento, que podríamos considerar desde los tradicionales modelos como *Project Finance* hasta la incorporación de nuevos modelos de financiamiento mixto. Para esto, las lecciones internacionales son claves para poder realizar diseños que articulen los instrumentos vigentes en el país con nuevos que incorporan las variables que permitan que se movilice la inversión, teniendo como marco principal que el diseño tiene por objetivo el desarrollo de una industria emergente como es la del hidrógeno y derivados, lo cual implica integrar nuevos elementos de tal forma de disminuir el *financing gap* actual, y permitir la viabilidad económica y la rentabilidad comercial. Para esto es necesario considerar instrumentos de *de-risking*.

Podemos considerar implementar un *blended finance* específico para articular y movilizar la inversión temprana en el desarrollo de Mejillones. Esto implica el desarrollo del modelo con un fondo *blended finance*, tomando en consideración tres elementos que conjuntamente interactúan como movilizadores de la inversión, por ejemplo: la estructuración basada en un 25% de un *first-loss-equity* (interviniendo con fondos fiscales, absorbiendo el desarrollo del riesgo inicial), luego un 25% - 30% de *Private Equity*, conformado por fondos privados que se especializan en *capturing upside* y, el otro 50%, mediante el uso de fondos concesionales estructurados con la banca multilateral donde la locación de cada parte se centrará principalmente en: i- Sector público: riesgo regulatorio, de permisos y de desarrollo. ii-. Los bancos multilaterales de desarrollo sse centrarán en los riesgos de construcción y de rendimiento tecnológico. iii- El capital privado por su parte asumirá los riesgos operacionales, de

mercado y los asociados a plusvalías. Esta sola mirada conjunta e interactuando de manera integrada asocia en un *business case* en la zona de Mejillones una solución con un beneficio en cuanto a alcanzar: i- Un *Equity Gap Solution* con un *first-loss equity*, para financiar proyectos que hasta ahora no es factible realizar, ii- Una estructura de *Co-investment magnet*, es decir, un imán para la co-inversión, la que se transforma en una estructura para atraer capital privado internacional, iii- Una reducción de los riesgos sistemáticos, mediante la diversificación a través de múltiples proyectos los cuales reducen el riesgo individual de un proyecto; iv- Facilita el desarrollo de múltiples proyectos a escala industrial. Este modelo, con los componentes que se han abordado, es un modelo probado internacionalmente como *blended finance*. Por cierto, cada mercado tiene consideraciones específicas, sin embargo, el mercado financiero local es propicio para un modelo como el mencionado.

Otro aspecto importante que enfrentan los proyectos y, en especial aquellos que su locación geográfica se ubica en la zona norte del país, como es el caso de los proyectos que buscan su emplazamiento en Mejillones, es el canon de arriendo definido bajo el alcance del Decreto Ley 1.939, el cual contiene las disposiciones claves que rigen la administración y disposición de los bienes fiscales y nacionales de uso público en Chile, principales disposiciones que, entre otras, señalan: “que el Estado, a través del Ministerio de Bienes Nacionales, tiene la atribución exclusiva de administrar, enajenar (vender), arrendar y regularizar todos los bienes raíces fiscales del país”, siendo en términos generales, su determinación el canon de uso de suelo para terrenos fiscales mediante una tasación oficial en función del valor comercial del suelo en cada región y las características del proyecto solicitado, estableciendo la renta anual mínima en el arrendamiento de bienes raíces fiscales. Esto significa que, independientemente del uso o sector, el canon o renta mínima anual para arrendamientos de terrenos fiscales corresponde al 8% del valor fiscal tasado oficialmente. El análisis respectivo, y de acuerdo con la extensión del terreno requerido para el emplazamiento y construcción de un proyecto asociado a la cadena del valor de hidrógeno verde, tiene un impacto significativo directo en la determinación del valor del LCOH (Costo Nivelado de Producción de Hidrógeno), estableciendo una ventaja competitiva de otros proyectos con otra locación geográfica en el contexto mundial.

En efecto, como precedente internacional, podemos revisar lo considerado en el modelo de desarrollo de la industria de hidrógeno renovable que recientemente ha establecido Omán. En términos de diferencia existe una brecha competitiva

cercana a 17 veces respecto de Chile, estableciendo un sistema que permite habilitar las condiciones para el desarrollo de esta nueva industria. El hecho de que Omán establezca una reducción del 90% en *Land Fees* para los proyectos de hidrógeno verde afecta positivamente en la reducción del valor del LCOH, y, en forma paralela, permite atraer la inversión para el desarrollo del *pipeline* de proyectos y posicionar como *hub* regional la naciente industria de hidrógeno verde, destacando que Omán es un país productor de petróleo y gas y su industria petrolera ha sido el motor principal de su economía desde que empezó la producción comercial en 1967.

En Chile, la implementación de medidas ejecutivas que viabilicen los proyectos de hidrógeno verde -como proyectos de interés estratégico nacional-, permitirían la atracción de inversión y, por consecuencia, el *tax revenue* de las operaciones compensaría el menor costo fiscal asociado a la reducción del canon fiscal de uso oneroso. Al mismo tiempo, la inversión contribuiría positivamente a la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) como indicador del nivel de inversión productiva en la economía de país.

Otro aspecto a considerar es el desarrollo del mercado de seguros especializados para la industria de hidrógeno verde, siendo la tendencia internacional creciente con un potencial de mercado global cercano a USD 5 billones, con diferentes instrumentos específicos y productos especializados -como son aplicables, entre otros, los siguientes: i- Seguro de cobertura por interrupción de suministro eléctrico desde las renovables; ii- Seguro por incumplimiento de compradores industriales -asociado a quiebra (*bankruptcy*)-; iii- Seguro de cobertura por fuerza mayor asociado a eventos de la naturaleza (sismo -terremoto); iv- Seguro de garantía de rendimiento -performance- de equipos tecnológicos (electrolizador por debajo de la capacidad nominal definida por el fabricante).

Estos tipos de productos actuando conjuntamente bajo el paraguas de seguros asociados han demostrado en el contexto internacional ser efectivos mediante esta adopción del modelo de participación temprana de las aseguradoras, conjugando una participación previa a la fase *Feed* (que conlleva la definición en profundidad de los requisitos técnicos, alcance y costos principales del proyecto para minimizar riesgos, optimizar inversiones y establecer la base para licitaciones y contratos de ejecución) teniendo un rol principal las aseguradoras como asesoras de riesgos desde el primer día.

También en esta etapa temprana, su alcance considera la optimización del diseño en base a la configuración del proyecto buscando minimizar la exposición al riesgo. Sumado a esto, la optimización de los costos con la reducción de las primas asociadas mediante una gestión proactiva de riesgos en el proyecto y, por último, productos de seguros definitivos en el proyecto contra una participación temprana.

Lo anterior, permitiría en la fase de operación al mercado, ir con una suite completa de productos buscando cubrir los riesgos en todas las categorías siendo un mercado más competitivo al mismo tiempo de propender a la formación de corredores y evaluadores de riesgos locales. Esto genera una oportunidad competitiva con múltiples aseguradoras y productos para la industria en desarrollo.

El impacto directo para los proyectos en la zona es permitir su financiamiento, incorporando los estándares de asegurabilidad equivalentes a los proyectos en desarrollo en el mercado europeo.

Al sintetizar lo anterior, y al accionar con instrumentos, medidas y acciones de manera coordinada es factible disminuir cada componente del *financing gap* presente que actualmente es una barrera muy alta que tienen los proyectos sumados a otros costos que deben asumir, que asocian tiempo e incertidumbre en el resultado esperado, haciendo que las empresas decidan ver como opción otros países para su desarrollo.

Con todo, y haciendo el foco en este componente financiero, al incorporar y adaptar al mercado local un “*pool* de instrumentos financieros” como el *blended finance* descrito que ayuda a apalancar el *equity gap* y *capital structure*; incorporar los productos de seguros que ayudarán a resolver el problema de los riesgos tecnológicos y de operación presentes en una industria emergente con alta probabilidad de ocurrencia, fortalecer las capacidades operacionales críticas para la generación eléctrica dentro de un sistema mediante la incorporación de CfD (*Contract for Difference*) como instrumento en sí, pero que interactúa con los otros componentes del sistema como son la ejecución de subastas competitivas (*Auction Management*) con *ránking* en precio -esto es gestión de subastas, con monitoreo y resolución de disputas (*Contract Enforcement*)- a través del cumplimiento de contratos; la evaluación de los riesgos (*Risk Assessment*) mediante *due diligence* técnicos y financieros del proyecto y, finalmente, la definición del precio (*Strike Price Setting*), mediante metodología transparente basada en el LCOH más el retorno permitido, como sistema en sí permite actuar reduciendo

el riesgo de precio y certeza en los ingresos, complementando con solución y apoyo para disminuir la desventaja competitiva con el costo actual bajo del DL 1939, incorporando medidas de armonización similares a las descritas en la experiencia internacional actual.

Esta alineación en diferentes aspectos -que abarca el contexto de financiamiento e incentivos- se basa en las mejores prácticas internacionales que se han ido desarrollando e implementando en el contexto global en lo concerniente a la debida mitigación de riesgos multidimensionales (*risk mitigation cross-dimensional*), facilitando directamente la integración de la cadena del valor de la industria del hidrógeno verde.



## INVESTIGAR ANTES DE QUE EL MERCADO LLEGUE: EL ROL DE LAS UNIVERSIDADES EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

### EDWARD FUENTEALBA VIDAL

Director del Centro de Desarrollo Energético Antofagasta CDEA  
Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Antofagasta

En energía, no todas las tecnologías estratégicas son inmediatamente rentables. Algunas requieren años de investigación, validación, formación de capacidades, infraestructura especializada y aprendizaje aplicado antes de alcanzar madurez técnica, económica y regulatoria. Sin embargo, si esperamos a que una tecnología sea plenamente competitiva para comenzar a estudiarla, probablemente llegaremos tarde.

Ese es uno de los principales roles de las universidades: investigar más allá del negocio inmediato, anticipar escenarios futuros y preparar las capacidades que el país necesitará para enfrentar sus desafíos de desarrollo, sostenibilidad y descarbonización.

Hoy, el hidrógeno verde es un buen ejemplo de esta discusión. A nivel global, esta tecnología enfrenta desafíos importantes: costos elevados, incertidumbre de demanda, falta de infraestructura, marcos regulatorios en desarrollo y competencia con otras rutas tecnológicas, especialmente la electrificación directa. Estas barreras han generado dudas legítimas. Pero que una tecnología no sea plenamente rentable hoy no significa que deba ser descartada como alternativa futura.

La transición energética no se resolverá únicamente electrificando procesos. Una parte importante del consumo energético sigue vinculada al uso de combustibles, especialmente en transporte, procesos industriales y generación de calor. Por eso, desarrollar alternativas limpias para usos térmicos, combustibles sintéticos, almacenamiento químico o aplicaciones difíciles de electrificar sigue siendo relevante para avanzar hacia una descarbonización profunda.

Para que ese potencial se transforme en desarrollo real, no basta con contar con buenos recursos renovables. También se requiere conocimiento local, infraestructura experimental,

capacidades técnicas, profesionales formados y articulación entre universidad, industria, Estado y territorio. Aquí es donde las universidades cumplen una función que muchas veces no es suficientemente visible.

Investigar hidrógeno, almacenamiento energético, economía circular, electromovilidad, eficiencia energética o nuevas soluciones para zonas áridas no significa apostar ciegamente por una moda tecnológica. Significa construir las bases para que, cuando esas tecnologías maduren o cuando el contexto energético las vuelva necesarias, el país no dependa completamente de conocimiento importado, proveedores externos o capacidades desarrolladas en otros territorios.

Además, en este proceso la colaboración internacional cumple un rol clave. Vincularse con centros de investigación, universidades, laboratorios e instituciones que ya han avanzado en estas áreas permite acortar curvas de aprendizaje, conocer experiencias previas, evitar repetir errores y adaptar soluciones a la realidad local.

La transferencia de conocimiento no consiste solo en importar tecnología. Consiste en aprender de experiencias internacionales, formar equipos locales, fortalecer capacidades técnicas y generar criterios propios para aplicar, modificar y desarrollar soluciones según las condiciones del territorio.

En regiones como Antofagasta, y específicamente la bahía de Mejillones, este punto es especialmente relevante. Las condiciones del desierto, la alta radiación solar, la presencia de industrias intensivas en energía, los desafíos asociados al agua, la minería y la logística hacen que las tecnologías energéticas deban ser evaluadas en contextos reales y exigentes. No basta con replicar modelos externos: es necesario adaptarlos, validarlos y mejorarlos desde el territorio.

La historia reciente de la energía solar es ilustrativa. Hace poco más de una década, su inserción masiva parecía lejana para muchos actores. Hoy, la energía solar es una de las tecnologías más relevantes para la transición energética, especialmente en el norte de Chile. Sin embargo, incluso una tecnología ampliamente implementada sigue enfrentando desafíos científicos, técnicos e industriales: durabilidad de componentes en condiciones extremas, acumulación de polvo, operación en ambientes desérticos, reciclaje de materiales, trazabilidad, circularidad y gestión de residuos futuros. Es decir, la masificación tecnológica no elimina la necesidad de investigación. Al contrario, la vuelve más urgente y específica.

Lo mismo puede ocurrir con el hidrógeno y con otras tecnologías emergentes. Puede que hoy no todas tengan una rentabilidad clara. Puede que algunas aplicaciones tarden más de lo previsto. Puede que ciertos mercados se desaceleren o cambien de dirección. Pero si el objetivo es construir una matriz energética limpia, resiliente y diversificada, necesitamos explorar distintas rutas tecnológicas con rigurosidad, sin reducir la discusión energética solo a lo que hoy presenta retorno económico inmediato.

Desde el Centro de Desarrollo Energético de la Universidad de Antofagasta CDEA, creemos que las universidades tienen la responsabilidad de mirar más lejos, esto implica formar capital humano avanzado y técnico, desarrollar laboratorios, levantar pilotos, evaluar tecnologías en condiciones reales, generar datos locales, participar en redes internacionales, acompañar procesos de transferencia tecnológica y contribuir a que las regiones tengan un rol activo en la transición energética.

La colaboración internacional, en este sentido, permite acelerar procesos de enseñanza y aprendizaje. Permite que estudiantes, investigadores, profesionales y técnicos accedan a conocimientos que han sido desarrollados en otros contextos, pero que pueden ser reinterpretados y aplicados a los desafíos locales. También abre oportunidades para proyectos conjuntos, movilidad académica, formación especializada, pasantías, certificaciones, uso compartido de infraestructura y desarrollo de estándares técnicos.

Este tipo de vinculación no reemplaza el conocimiento local "lo fortalece". Permite que las regiones no partan desde cero. Permite avanzar con mayor rapidez hacia capacidades instaladas, metodologías validadas y mejores decisiones tecnológicas. Y permite que la transferencia tecnológica no sea solo un resultado final, sino también un proceso continuo de aprendizaje, adaptación y colaboración.

En regiones como Antofagasta, la transición energética no puede depender únicamente de decisiones tomadas desde los grandes centros de consumo o inversión. Debe construirse también desde los territorios donde se despliegan las tecnologías, donde se enfrentan las condiciones operacionales más exigentes y donde se juega buena parte del futuro productivo del país. Por eso, el trabajo universitario en tecnologías que aún no son completamente rentables no debe entenderse como una apuesta desconectada de la realidad industrial. Al contrario: es una inversión en preparación, soberanía tecnológica, formación de personas y reducción de brechas futuras.

La investigación aplicada permite acortar curvas de aprendizaje. Permite que, cuando una tecnología se vuelva competitiva o necesaria, existan profesionales preparados, técnicos capacitados, infraestructura básica, conocimiento acumulado y redes de colaboración nacionales e internacionales. Sin ese trabajo previo, cualquier transición será más lenta, más costosa y más dependiente.

La pregunta, entonces, no debería ser solo si una tecnología es rentable hoy. También deberíamos preguntarnos qué capacidades necesitamos construir para que Chile y la región de Antofagasta pueda decidir, adaptar, implementar y mejorar las tecnologías que serán relevantes en los próximos 10 o 20 años, porque la transición energética no se trata únicamente de reemplazar fuentes de energía, se trata de desarrollar conocimiento, capacidades productivas, soluciones territoriales y capital humano para un nuevo ciclo de desarrollo y en esa tarea, las universidades locales tienen un rol insustituible.



## CHILE ANTE UNA RECONFIGURACIÓN ENERGÉTICA, TERRITORIAL Y GEOPOLÍTICA

### LINDLEY MAXWELL

Líder de Hidrógeno Verde  
Instituto de Tecnologías Limpias

La transición energética global, acelerada por la urgencia climática y los compromisos del Acuerdo de París, ha situado a Chile en una posición geopolítica inédita. Un país históricamente dependiente de la importación de combustibles fósiles enfrenta hoy una oportunidad concreta: transitar hacia una condición de exportador neto de energía limpia. Este giro no se explica solo por ventajas naturales -radiación solar en el Desierto de Atacama y vientos patagónicos-, sino por la posibilidad de construir una arquitectura industrial y territorial que sostenga una nueva economía energética.

Desde mi perspectiva, el hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) y sus derivados -en particular el amoníaco verde (NH<sub>3</sub>)- no deben entenderse como una “industria más”, sino como vectores habilitantes para descarbonizar sectores difíciles de abatir a escala global (marítimo, industria pesada, y parte relevante de la minería). Pero esa promesa solo se materializa si el despliegue se realiza con diseño sistémico: infraestructura compartida, seguridad por diseño, gobernanza y legitimidad social.

Por ello, focalizo esta nota en Mejillones, Región de Antofagasta: el territorio donde se observa con mayor nitidez la tensión y la oportunidad de esta transición. Mejillones no es un receptor pasivo de inversiones; es un laboratorio vivo para implementar un *Hub* de hidrógeno en Chile, con infraestructura portuaria y energética robusta, y a la vez con una historia marcada por las externalidades de la termoeléctrica a carbón. El desafío, entonces, no es solo técnico-económico: es socioecológico y profundamente político.

### 1. Marco estratégico nacional: de la ventaja comparativa a la política industrial

Chile ha evolucionado desde una fase de posicionamiento (Estrategia Nacional 2020) hacia una etapa más táctica de implementación (Plan de Acción 2023-2030). Este plan operacionaliza la estrategia con líneas de acción en inversión, sostenibilidad, infraestructura y valor local, con una gobernanza interministerial que reconoce una realidad básica: el H<sub>2</sub>V no se despliega desde un solo ministerio, sino desde un Estado coordinador.

Un cambio cualitativo que considero central es el énfasis en el ordenamiento territorial proactivo: avanzar hacia planes maestros y “polos de desarrollo” (como Mejillones) para evitar la instalación fragmentada de proyectos que compiten por suelo, agua, transmisión y licencia social. En otras palabras: la permisología no se destraba solo con “más velocidad”, sino con mejor planificación.

En paralelo, la política incorpora instrumentos para mitigar la brecha de costo frente a alternativas fósiles. La Ventanilla Facility H<sub>2</sub>V (CORFO), y los mecanismos orientados a asegurar *off-take* (demanda) mediante acuerdos internacionales, son componentes esenciales para reducir el costo de capital y mejorar la bancabilidad, como también muy importante el proyecto de ley que se está discutiendo en el Congreso, respecto a los incentivos financieros de poder de compra local por más de USD 2,8 mil millones. Mi lectura es clara: sin estructuras financieras y contractuales que asignen riesgos de forma inteligente, el H<sub>2</sub>V no despegará a la escala necesaria, incluso si el recurso renovable es excepcional.

### 2. El modelo estructural del *Hub*: “Solar NH<sub>3</sub>-Pool” en Mejillones

El caso “Solar NH<sub>3</sub>-Pool Chile” (consorcio público-privado bajo el programa H<sub>2</sub>Uppp de la GIZ) representa una propuesta que, a mi juicio, sintetiza la dirección correcta: abandonar la lógica de proyectos “isla” y avanzar hacia un Parque Industrial Integrado basado en infraestructura compartida y economías de aglomeración. El Plan Maestro al 2050 reserva una superficie del orden de ~900 hectáreas (fase inicial ~153 ha.) y propone un diseño modular que permite escalar plantas de electrólisis, síntesis Haber-Bosch y corredores de tuberías (agua, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>). Esta visión es clave porque reduce costos, riesgos e impactos acumulativos. Pero lo más interesante, desde una perspectiva industrial, es el modelo de negocio tipo *tolling* que en términos simples el operador cobra por “usar la infraestructura”, no por vender el producto, por tanto:

- Se desacoplan riesgos entre *upstream* (generación renovable), *midstream* (producción de moléculas) y *downstream* (logística/puerto).
- Los productores pagan tarifas por servicios comunes (agua, puerto, transmisión, urbanización industrial), evitando CAPEX redundante.
- Operadores especializados asumen el riesgo técnico-operacional de activos críticos (desalación, terminales, ductos). Este esquema baja barreras de entrada y mejora la bancabilidad: el desarrollador puede concentrarse en eficiencia de electrólisis y síntesis, en vez de “cargar” con un puerto o una desaladora completa en su balance.

En el componente territorial, el plan reconoce restricciones ambientales relevantes, como zonas de nidificación del Gaviotín Chico, integrando exclusiones y trazados que minimicen fragmentación de hábitat. Esta es una señal importante: en Mejillones, la viabilidad del *hub* será tan ambiental y social como ingenieril.

### 3. Infraestructura crítica compartida: la verdadera ingeniería de la competitividad

Mi lectura es que la competitividad del H<sub>2</sub>V chileno no se decidirá solo por LCOE-LCOH, sino por la eficiencia de infraestructura crítica compartida.

#### 3.1 Puerto y logística de amoníaco

Mejillones ya tiene una ventaja instalada: puertos de clase mundial y una bahía protegida. Exportar NH<sub>3</sub> requiere tanques

criogénicos, brazos de carga y operación con estándares estrictos. El beneficio del terminal compartido es doble: ahorro de CAPEX (del orden de MUSD 200 por proyecto) y menor intervención del borde costero.

#### 3.2 Agua y desalación centralizada

En el desierto, la solución sostenible es desalación. Pero multiplicar desaladoras pequeñas por proyecto es ineficiente, caro y ambientalmente agresivo. La centralización y escalamiento reducen el costo unitario del agua y minimizan ductos de captación/descarga. Se estima además un ahorro de CAPEX por proyecto del orden de MUSD 8, junto a menores OPEX, aunque importante destacar que el consumo de agua no es intensivo. Ver próximamente datos de la estrategia regional de H<sub>2</sub>V en Antofagasta liderado por la autoridad regional.

#### 3.3 Transmisión y corredores energéticos

Los electrolizadores demandan potencia masiva y estable. La idea de corredores comunes (por ejemplo, líneas 500 kV compartidas) evita la proliferación de líneas individuales, reduce costos de inversión (se plantea un orden de ~40%) y disminuye fragmentación territorial.

### 4. Seguridad y gestión de riesgos: hidrógeno v/s amoníaco. En Mejillones, la seguridad no es un capítulo adicional: es la condición habilitante de la licencia social y de la continuidad operacional

- Hidrógeno: riesgo dominante de inflamabilidad/explosión; dispersa rápido en exterior por su flotabilidad, pero en confinamiento puede ser crítico.
- Amoníaco: riesgo dominante de toxicidad; una fuga puede generar nube tóxica a ras de suelo con efectos potencialmente extensos.

Desde el análisis presentado, emerge una recomendación estructural: privilegiar amoníaco refrigerado (-33°C) por sobre amoníaco presurizado a temperatura ambiente, ya que el escenario de fuga presurizada puede generar *flashing* y nubes más extensas. Esto obliga a diseñar corredores industriales, ductos y tanques con enfoque refrigerado, y establecer zonas de amortiguación claras respecto de áreas habitadas.

5. Ecosistema Ciencia y Tecnología: si Chile exporta moléculas, también debe exportar conocimiento

Antofagasta ha comenzado a entender que capturar valor local es más que instalar plantas: implica desarrollar capital humano, datos, ingeniería y tecnología. La articulación academia-industria-gobierno (triple hélice), el Diplomado en Hidrógeno Solar (CDEA-UA-H<sub>2</sub> Antofagasta) y el rol de centros como el ya cerrado centro CICITEM (pilotaje móvil en condiciones reales del desierto, I+D aplicada en derivados) muestran un camino consistente. Todo esto está convergiendo en la apuesta que está realizando el Instituto de Tecnologías Limpias ITL, quienes tienen como objetivo final, acelerar la adopción de tecnologías a través de plantas pilotos que permitan disminuir la incertidumbre técnica como financiera y de forma paralela, formar capital humano y aportar al desarrollo de políticas públicas, entre otros.

Mi reflexión aquí es directa: sin CTCi, corremos el riesgo de exportar recursos sin densidad tecnológica local. La sostenibilidad del *hub* requiere que el territorio sea capaz de operar, mantener, mejorar y eventualmente innovar sobre lo instalado.

6. Transición socioecológica justa: el contrato social de Mejillones

Mejillones es el epicentro de una transición compleja: retiro progresivo del carbón e instalación de una industria química/energética de gran escala. El Plan de Transición Socioecológica Justa (consulta pública 2025) busca orientar este proceso con gobernanza participativa, incluyendo a industria, municipio, sociedad civil y juventudes.

Pero las tensiones persisten: agua, borde costero, seguridad del NH<sub>3</sub> y percepción de “extractivismo verde”. Por eso, el concepto de valor compartido no es retórico: debe traducirse en empleo local de calidad, encadenamientos con proveedores regionales, mejoras ambientales y urbanas verificables y una distribución justa de beneficios y cargas.

7. Proyectos ancla y señales de madurez (2024-2025)

- Volta (MAE): proyecto de amoníaco verde a gran escala (≈600 ktpa), con recomendación ambiental del SEA (dic. 2025). Actúa como ancla de demanda e infraestructura, el cual ya cuenta con un informe consolidado aprobado por SEA, lo que permitió obtener una calificación favorable de la Comisión de Evaluación Ambiental (COEVA).
- FCAB y locomotora a hidrógeno: hito operativo para transporte pesado y minería; instala capacidades reales de abastecimiento y operación, y valida demanda interna.

Conclusiones y recomendaciones estratégicas

1. El modelo *Hub* (infraestructura compartida) es superior al modelo “isla”, por costo, impacto y bancabilidad.
2. La planificación territorial es urgente: corredores industriales, buffers de seguridad, y protección de biodiversidad deben definirse antes de que el suelo quede capturado por decisiones irreversibles (gobierno regional está trabajando en esto).
3. Seguridad por diseño debe volverse estándar, especialmente en N<sub>3</sub>: refrigerado, ductos dedicados, y zonificación coherente.
4. CTCi y capital humano determinan el valor local: sin capacidades regionales, Chile arriesga capturar poco del valor tecnológico.
5. La licencia social es el verdadero cuello de botella: la transición justa en Mejillones constituye el contrato social que habilita -o bloquea- el liderazgo de Chile en H<sub>2</sub>V.



## TALENTO TÉCNICO PARA EL HIDRÓGENO VERDE: EL CUELLO DE BOTELLA QUE SÍ PODEMOS ANTICIPAR

### LORENA OLIVARES

Gerente de Formación Dual y Capacitación  
AHK Chile

#### La Cámara Alemana - AHK Chile: experiencia, red y cooperación para habilitar el H<sub>2</sub>V

En Chile solemos hablar del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) como una promesa país: abundancia renovable, industrias por descarbonizar, regiones con vocación energética y una oportunidad concreta de diversificar nuestra matriz productiva. Pero, si hay algo que la experiencia internacional nos enseña, es que las transiciones energéticas no se ganan solo con tecnología: se ganan con personas.

Desde la Cámara Chileno-Alemana de Comercio e Industria (AHK Chile) llevamos 110 años conectando empresas, tecnología y formación. Alemania está comprometida, al más profundo nivel, con la sustentabilidad y la eficiencia energética; no es un discurso, es política pública, inversión, estándares y cultura industrial. Esa trayectoria se traduce en aprendizajes prácticos que pueden acelerar el camino chileno, especialmente en un tema tan exigente como el H<sub>2</sub>V y los combustibles sintéticos (Power-to-X).

En AHK Chile contamos además con un Círculo de Energía muy activo -integrado por socios dedicados a energías renovables, eficiencia energética, ingeniería, construcción y servicios especializados- que puede apoyar el escalamiento del H<sub>2</sub>V desde la etapa de proyectos a la etapa de ejecución: estándares, buenas prácticas, formación, proveedores, seguridad y cultura preventiva. Y lo hacemos también desde la conexión internacional: organizamos delegaciones técnicas en temáticas de H<sub>2</sub>V hacia Alemania y Europa, y recientemente a Brasil, porque la colaboración y la comparación entre ecosistemas acelera decisiones y reduce errores.

#### Power-to-MEDME-FuE: cuando la cooperación se vuelve resultados

No hablamos desde la teoría. En los últimos dos años, AHK Chile ha sido parte del proyecto Power-to-MEDME-FuE, un programa de I+D a gran escala de cooperación bilateral, que busca acelerar la instalación de la industria del H<sub>2</sub>V y derivados del hidrógeno, particularmente metanol verde y éter dimetílico (DME) a gran escala.

El proyecto fue financiado por el Ministerio Federal de Investigación, Tecnología y Espacio de Alemania y se desarrolló entre octubre de 2023 y diciembre de 2025 (con resultados consolidados a octubre de 2025). Su implementación fue liderada por Fraunhofer Chile y Alemania, e integrada por el instituto alemán FiBS RILL (Research Institute on Lifelong Learning), en conjunto con AHK Chile.

¿Por qué esto importa para la conversación de talento? Porque Power-to-MEDME-FuE no se limitó a hablar de moléculas, conocimiento aplicado, tecnologías y optimización de procesos: aterrizó necesidades reales de capital humano. Tradujo la ambición del H<sub>2</sub>V en perfiles, competencias, proyecciones de demanda laboral y un piloto de capacitación. Esa es la clase de evidencia que permite pasar de slogans a políticas habilitantes.

#### Resultados que no podemos ignorar: perfiles, brechas y una demanda laboral “por olas”

Primer resultado: el H<sub>2</sub>V no “inventa” una industria desde cero. La mayor parte del talento requerido se apoya en bases ya existentes (electricidad industrial, mecánica, instrumentación y control, montaje, mantenimiento, seguridad industrial). Lo que cambia es lo específico: se suma complejidad, se elevan exigencias de seguridad y se requieren competencias específicas para hidrógeno y derivados.

En ese marco, el proyecto identificó quince perfiles ocupacionales técnicos priorizados, estructurados en dos macroprocesos: construcción/montaje y operación/mantenimiento. Y entregó una señal muy concreta para la política pública: no todos los perfiles son igual de fáciles de conseguir. En la categorización del estudio, cuatro perfiles aparecen como escasos, ocho con disponibilidad moderada y tres más disponibles. La implicancia es directa: si no priorizamos, llegaremos tarde.

Además, el análisis subraya que los perfiles se ajustan bien a profesionales que ya tienen formación técnica en sectores relacionados, y que la pertinencia regional es clave: las capacidades de formación son disímiles entre regiones. En simple: hay que “capacitar”; y ojalá desarrollar el talento local.

Si nos enfocamos en el norte, Antofagasta destaca a nivel nacional por su menor brecha en infraestructura práctica para la formación técnica vinculada al H<sub>2</sub>V: presenta una fortaleza clara en equipamiento, con talleres y laboratorios evaluados como “suficientes” para perfiles asociados a sistemas mecánicos/hidráulicos y operador de sistemas hidráulicos, siendo la mejor calificación entre las regiones comparadas de Chile en el estudio. Además, sobresale en perfiles eléctricos, ya que programas de estudio, capacidades docentes y equipamiento fueron calificados como “suficientes” para instalador eléctrico industrial y operador-mantenedor eléctrico industrial. En términos comparados, Antofagasta lidera en estándares de equipamiento a nivel país -especialmente en perfiles hidráulicos y eléctricos-, lo que la posiciona como un territorio con condiciones habilitantes más sólidas para escalar formación técnica orientada a proyectos de hidrógeno verde.

Una evidencia especialmente valiosa es la aproximación modular. El proyecto implementó un piloto de capacitación en “Seguridad industrial y gestión de riesgos en plantas de hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) y sus derivados”, precisamente porque fue el tema más demandado en todas las regiones levantadas por el estudio y porque, en una industria que recién comienza, la seguridad no es un complemento: es la condición habilitante para avanzar. El piloto se realizó junto a CEIM en Antofagasta, con una duración de 36 horas, y graduó, por primera vez, a veintiún participantes. Este tipo de micro-formación, diseñada con industria, es una forma pragmática de habilitar talento a velocidad sin sacrificar seguridad.

Segundo resultado: la demanda de empleo no crece de manera lineal. La estimación de empleo muestra que los trabajos de construcción y montaje tienen una dinámica temporal “por olas”: en los primeros años están impulsados por proyectos que ya avanzan en sus procesos regulatorios y, de acuerdo con las proyecciones del estudio, podrían alcanzar su punto máximo hacia 2029, según la información que se tiene a la fecha considerando los proyectos presentados al SEIA. Además, una parte relevante del volumen de empleo se explica por la construcción de plantas de energía renovable asociadas a la cadena del H<sub>2</sub>V.

Tercer resultado: la operación y mantenimiento (O&M) son el corazón del empleo permanente, pero crecen más lento. En el escenario conservador, la estimación llega a 5.200 empleos de O&M a lo largo de toda la cadena de valor; este valor se cuadruplica si los proyectos ingresan masivamente a fase de implementación. Y, al desagregar, la producción de energía renovable concentra la mayor proporción de empleo O&M, seguida por la producción de hidrógeno; otros segmentos como desalinización y producción de derivados aportan de manera más marginal al empleo directo de O&M.

Estas cifras dialogan con una señal que ya llegó a la prensa: se proyectan más de 40.000 empleos para técnicos ligados al hidrógeno verde. La conclusión: el H<sub>2</sub>V competirá por talento con minería, energía, construcción e industrias de proceso. Si no planificamos, el mercado lo hará por nosotros, con mayor rotación, mayores costos y riesgos.

#### Ideas fuerza para una estrategia de atracción, formación y retención de talento H<sub>2</sub>V

##### 1) Tratar el talento como infraestructura habilitante

Si no hay técnicos y técnicas certificados, no hay cronogramas que se cumplan. La estrategia de talento debe estar en la misma mesa que permisos, inversión y *supply chain*: con metas, responsables y financiamiento estable.

##### 2) Menos “nuevas carreras”, más competencias combinadas

La oportunidad está en articular trayectorias existentes. El foco debe estar en módulos específicos H<sub>2</sub> (seguridad, riesgos, protocolos, instrumentación) sobre bases técnicas ya presentes en el sistema TP y en trabajadores con experiencia.

3) Atracción con sentido y acceso real

Atraer no es solo comunicar: es habilitar entrada. Marca sectorial H<sub>2</sub>V por región, prácticas pagadas, apoyos de movilidad y metas de inclusión (mujeres y reconversión laboral) son medidas concretas que reducen deserción y amplían el *pool*.

4) Formación modular y certificable, con estándares compartidos

La respuesta rápida no es improvisación: es modularidad con calidad. Microcredenciales apilables, reconocimiento de aprendizajes previos y certificación alineada al Marco Nacional de Cualificaciones permiten escalar sin perder estándar.

5) Formación dual y aprendizaje en contexto real

El H<sub>2</sub>V exige cultura de seguridad y disciplina operacional. Eso se aprende mejor con alternancia: tutores en empresa, prácticas estructuradas, evaluación por desempeño y responsabilidad compartida entre industria e instituciones formativas.

6) Retención: carreras, bienestar y arraigo territorial

Retener será clave. Mapas de carrera (oficio → supervisión → especialización), capacitación continua, estándares de seguridad y condiciones habilitantes en regiones (vivienda, transporte, servicios) son parte del paquete, no un beneficio accesorio.

7) Gobernanza y cooperación: un pacto por el talento H<sub>2</sub>V (2026-2030)

La demanda “por olas” requiere coordinación: bolsas regionales de talento, portabilidad de certificaciones y un plan de formación de formadores. AHK Chile puede contribuir como plataforma de articulación con empresas, el Círculo de Energía y la cooperación chilena-alemana -incluyendo delegaciones y transferencia de buenas prácticas- para convertir evidencia en implementación.

Conclusiones

Si Chile quiere que el H<sub>2</sub>V pase de la promesa a la realidad, debe anticipar su principal cuello de botella: el capital humano. La buena noticia es que este cuello de botella sí se puede gestionar, si dejamos de verlo como un tema “educativo” y lo entendemos como política industrial. Tenemos evidencia, redes y experiencia para hacerlo. Lo que falta es decisión, coordinación y velocidad.

En AHK Chile estamos disponibles para empujar esa agenda: con nuestro ecosistema empresarial, nuestro Círculo de Energía, la experiencia alemana en eficiencia energética y sostenibilidad, y proyectos concretos como Power-to-MEDME-FuE que ya demostraron cómo traducir metas climáticas en capacidades reales. El talento no es un apéndice de la transición energética, es la base.



## POTENCIAL DE MEJILLONES COMO *HUB* DE HIDRÓGENO VERDE: INFRAESTRUCTURA Y OPORTUNIDADES PARA LA EXPORTACIÓN

### JAVIER R. QUISPE

Director del Departamento de Ingeniería Química y Medio Ambiente  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas  
Universidad Católica del Norte Antofagasta

La comuna de Mejillones, ubicada en la Región de Antofagasta, se ha consolidado como un polo estratégico para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Chile. Su posición geográfica estratégica, combinada con una infraestructura habilitante sólida y su cercanía a importantes polos industriales, le otorgan un potencial excepcional para liderar la transición energética hacia fuentes limpias y sostenibles. Diversos estudios coinciden en señalar a Mejillones como un territorio ideal para el establecimiento de un *hub* de hidrógeno verde, tanto a nivel nacional como internacional.

Uno de los pilares fundamentales de esta infraestructura es su puerto de aguas profundas, uno de los más relevantes del norte del país. Este puerto no solo facilita la importación de insumos y la exportación de productos, sino que representa una ventaja logística clave para el transporte de hidrógeno verde y sus derivados, como el amoníaco verde, hacia mercados internacionales. La capacidad portuaria actual, junto con su potencial de expansión, posiciona a Mejillones como un nodo exportador de energías limpias, especialmente hacia Europa y otras regiones con alta demanda de vectores energéticos sostenibles.

Otro componente esencial es su conectividad ferroviaria, que enlaza a Mejillones con el interior de la región y con los principales centros mineros del país. Esta red no solo facilita el transporte de materiales y productos, sino que también puede ser adaptada para movilizar hidrógeno y sus derivados, reduciendo costos logísticos y emisiones asociadas al transporte terrestre. Esta ventaja comparativa es significativa frente a otras zonas del país que aún carecen de este tipo de infraestructura.

La disponibilidad de plantas desalinizadoras en la zona es otro factor crítico. La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis requiere grandes volúmenes de agua, y en una región árida como Antofagasta, el acceso al agua dulce es limitado.

Las plantas desalinizadoras existentes en Mejillones permiten satisfacer esta demanda sin comprometer los recursos hídricos naturales, asegurando la sostenibilidad del proceso productivo. Además, la experiencia acumulada en la operación de estas instalaciones puede ser aprovechada para escalar la producción de agua desalada destinada a la industria del hidrógeno verde.

En cuanto a recursos energéticos, Mejillones se encuentra a menos de 100 kilómetros de zonas con altos niveles de radiación solar, lo que se traduce en un factor de planta fotovoltaico de entre 32% y 35%, muy por encima del promedio mundial. Esta condición permite la instalación de parques solares de gran escala, capaces de generar la electricidad necesaria para alimentar los electrolizadores de hidrógeno verde. La combinación de energía solar con otras fuentes renovables, como la eólica, puede garantizar un suministro energético constante y competitivo, condición indispensable para la viabilidad económica del hidrógeno verde.

La infraestructura eléctrica existente también desempeña un papel clave. Mejillones cuenta con una red eléctrica robusta, con subestaciones y líneas de transmisión que permiten integrar nuevas fuentes de generación renovable. Esta red puede transportar energía desde los parques solares hasta las plantas de electrólisis, así como inyectar excedentes al sistema eléctrico nacional. Su capacidad de adaptación a nuevas demandas energéticas es esencial para el desarrollo de proyectos a gran escala.

Asimismo, la comuna dispone de una red de gas natural licuado (GNL), que podría facilitar la transición hacia el uso de hidrógeno en aplicaciones industriales y residenciales. Aunque el hidrógeno y el GNL no son directamente intercambiables, esta infraestructura puede ser aprovechada para desarrollar soluciones híbridas o facilitar la distribución de nuevos vectores energéticos en el futuro.

Desde la perspectiva de la demanda doméstica, Mejillones se encuentra en una ubicación privilegiada por su cercanía a la industria minera, uno de los principales consumidores potenciales de hidrógeno verde y sus derivados. La minería requiere grandes cantidades de energía para sus operaciones, y el hidrógeno puede ser utilizado como combustible en camiones de extracción, procesos térmicos o generación eléctrica, contribuyendo significativamente a la descarbonización del sector.

En este contexto, la Región de Antofagasta ya cuenta con cuatro proyectos de producción de hidrógeno verde destinados al consumo local, lo que evidencia un compromiso concreto con la transición energética. Entre ellos, destaca el proyecto (H<sub>2</sub>) Green Mining, desarrollado por Subterra Spa, que ya cuenta con Resolución de Calificación Ambiental (RCA), posicionándose como el más avanzado de su tipo en la región. Este proyecto busca abastecer de hidrógeno verde a operaciones mineras, alineándose con los objetivos nacionales de reducción de emisiones.

En paralelo, se han identificado doce proyectos de producción de amoníaco verde en la región, con un enfoque claro en la exportación internacional. Entre ellos, sobresalen el proyecto Volta, de la empresa MAE, y el proyecto INNA, de AES Chile, ambos en etapas avanzadas de desarrollo (en evaluación ambiental). Estas iniciativas representan una oportunidad estratégica para diversificar la matriz exportadora del país y posicionar a Chile como un actor clave en el mercado global de combustibles limpios, especialmente en un contexto de creciente demanda por amoníaco verde como portador de hidrógeno y fertilizante sostenible.

Sin embargo, para consolidar su liderazgo, la Región de Antofagasta debe observar con atención el avance de *hubs* internacionales de hidrógeno verde que ya operan bajo modelos de exportación consolidados. Un ejemplo destacado es el *Hub* (H<sub>2</sub>V) Ceará, ubicado en el Complejo Industrial y Portuario de Pecém (Brasil), una iniciativa conjunta entre el Gobierno del Estado de Ceará y el Puerto de Róterdam. Este *hub* ya cuenta con más de 40 memorandos de entendimiento (MoU) firmados con empresas nacionales e internacionales para la producción y exportación de amoníaco verde, lo que lo posiciona como el competidor más avanzado de Chile en América Latina en términos de desarrollo y atracción de inversiones.

A nivel global, otro referente es el *Hub* Hydrom en Omán, impulsado por el consorcio Green Energy Oman, en colaboración con el Puerto de Ámsterdam, Zenith Energy Terminals y GasLog.

Este megaproyecto está orientado a la producción de hidrógeno verde líquido y amoníaco verde para exportación a gran escala, principalmente hacia Europa, y se distingue por su infraestructura compartida altamente integrada, que incluye redes de transmisión eléctrica para energías renovables, plantas desalinizadoras, gasoductos y un puerto especializado.

La escala, coordinación y visión estratégica de este *hub* representan un modelo a seguir para cualquier país que aspire a liderar el mercado global del hidrógeno verde.

La presencia de empresas proveedoras de servicios industriales en Mejillones constituye otro activo estratégico para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. Muchas de estas compañías, con amplia experiencia en sectores como la minería, la energía y la logística, cuentan con las capacidades necesarias para adaptarse y ofrecer servicios especializados al ecosistema del hidrógeno, desde el mantenimiento de electrolizadores hasta la construcción y operación de infraestructura asociada. Esta red de proveedores locales no solo contribuye a reducir los costos operativos y logísticos, sino que también fortalece el tejido productivo regional, generando encadenamientos económicos y empleo de calidad.

Adicionalmente, Antofagasta y Mejillones disponen de una fuerza laboral calificada, compuesta por técnicos, ingenieros y profesionales formados en instituciones académicas de la región. La cercanía a centros de formación técnica y universidades facilita la creación de programas de capacitación específicos para la industria del hidrógeno, asegurando la disponibilidad de talento humano acorde a las nuevas demandas del sector. Esta articulación entre el ámbito académico y el productivo es clave para impulsar la innovación, la transferencia tecnológica y el desarrollo de capacidades locales.

En síntesis, la comuna de Mejillones reúne una combinación única de infraestructura habilitante, recursos naturales, capital humano y proximidad a la demanda industrial, que la posicionan como un nodo estratégico para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Chile. La existencia de proyectos concretos en distintas etapas de avance, tanto para el consumo local como para la exportación, refuerza esta visión de futuro. No obstante, para mantener su competitividad frente a *hubs* internacionales como Ceará (Brasil), Hydrom (Omán), será fundamental avanzar en la consolidación de infraestructura compartida -como gasoductos de hidrógeno verde, ductos para transporte de amoníaco, puertos especializados y plantas desalinizadoras-, así como en el fortalecimiento de alianzas público-privadas y estrategias de atracción de inversión que permitan escalar esta industria a nivel global.



## LA BRECHA ENTRE LA ESTRATEGIA Y EL TERRITORIO: DESAFÍOS NORMATIVOS PARA EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

### FEDERICO RODRÍGUEZ

Director de Energía e Infraestructura  
Albagli Zaliasnik

Chile ha hecho un trabajo que podemos calificar de destacable vendiendo su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V)<sup>1</sup> al mundo. En el papel, somos los futuros líderes globales. Pero quienes trabajamos en la operativa diaria de la permisología, sabemos que, al bajar esa estrategia a la realidad del territorio, nos encontramos muchas veces con un muro. No es un problema de tecnología ni de falta de visión, el problema es normativo.

En nuestra experiencia asesorando proyectos -de este y otro tipo- en la zona, he detectado un patrón frustrante: instrumentos de planificación desactualizados que no responden al vertiginoso y sustentable crecimiento de las ciudades, una propiedad fiscal saturada de derechos superpuestos -concesiones mineras, concesiones de uso oneroso, servidumbres, entre otros- y, lo más grave, una administración del Estado que parece no ponerse de acuerdo. Mientras el Ministerio de Energía nos pide acelerar, Salud y Vivienda muchas veces frenan el avance con clasificaciones obsoletas. Fragmentan los proyectos: tratan el panel solar como energía limpia, pero a la planta de amoníaco la miran con la misma desconfianza que a una fábrica de chimeneas humeantes.

Acá, Mejillones aparece como un caso de estudio en materia de hidrógeno verde. La elección de Mejillones no es una apuesta al azar. Esta bahía tiene una vocación industrial en su esencia que la convierte en el candidato natural para liderar la transición energética. No solo cuenta con una radiación solar privilegiada a pocos kilómetros; posee algo mucho más difícil de replicar: infraestructura crítica habilitante. Hablamos de puertos consolidados con capacidad exportadora, una base industrial instalada con termoeléctricas en proceso de reconversión y, crucialmente, la cercanía inmediata con los grandes yacimientos mineros del norte, que están llamados a ser los primeros consumidores (*offtakers*) de esta nueva industria. Es, en el papel, el ecosistema logístico y comercial perfecto. Sin

embargo, su ordenamiento territorial actual actúa más como una camisa de fuerza que como una plataforma de despegue.

Mejillones es hoy un termómetro que permite medir esta fiebre regulatoria. En estas líneas no queremos quedarnos en la teoría. La idea es contrastar lo que ocurre con un modelo hipotético de proyecto que busca eficiencia territorial en zonas protegidas, frente a la reciente aprobación del proyecto Volta. Hacer un ejercicio comparativo de cómo dos proyectos de hidrógeno verde ubicados en el mismo polo de desarrollo, Mejillones, sufren un tratamiento desigual a pesar de presentar una planificación territorial y productiva no muy diferente. El foco, en este ensayo, dada su extensión, se pondrá única y exclusivamente en la regulación territorial -o urbanística, si se quiere- de la zona de Mejillones.

La comparación que se hace es reveladora y deja lecciones para la autoridad urbanística: hoy, el éxito de un proyecto no depende de su ingeniería, sino de la gimnasia interpretativa que hagamos para definir si somos “energía” o “industria”.

#### El problema del instrumento de planificación: el PRIBCA

Para entender el problema, hay que mirar las reglas del juego. El árbitro territorial en la bahía es el Plan Regulador Intercomunal del Borde Costero de Antofagasta (PRIBCA), un instrumento cuyo diseño original no logra aún anclarse en una visión industrial moderna.

Sulógica es binaria: divide el territorio en compartimentos estancos. Por un lado, define zonas como la Zona de Protección de Interés Paisajístico (ZPIP), donde permite “infraestructura energética”, pero prohíbe terminantemente la “actividad productiva” (fábricas). Por otro lado, por ejemplo, en la Zona de Extensión Industrial Condicionada solo se permiten actividades productivas.

El problema es que el hidrógeno verde y sus derivados no respetan esa frontera. Una planta de amoníaco verde es, a la vez, almacenamiento energético y proceso químico. Al aplicar paradigmas regulatorios anacrónicos, el instrumento asimila erróneamente lo que constituye infraestructura de almacenamiento energético a una actividad industrial convencional.

Como veremos a continuación, estos problemas han tenido que ser solucionados por interpretaciones normativas de la autoridad -la Dirección de Desarrollo Urbano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (DDU)-, los que muchas veces son también confusos y cambiantes.

#### La paradoja de la DDU 470: un avance con letra chica

Una de las contradicciones críticas que proviene del PRIBCA es la siguiente: mientras la generación eléctrica y los electrolizadores ya son reconocidos como infraestructura, la producción de sus derivados (amoníaco verde) sigue atrapada en la rigidez de la industria manufacturera.

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo intentó arreglar esto con la Circular DDU 470 de 2022. Fue un avance, sí, pero con letra chica. El documento reconoció que las plantas de H<sub>2</sub>V son “infraestructura energética”, pero sentenció explícitamente que si el hidrógeno se usa para producir otra sustancia -como amoníaco-, la instalación pasa a ser “actividad productiva” (industria).

Esta definición administrativa es crítica para la eficiencia territorial y el desarrollo de la industria. Gran parte de los mejores terrenos solares en Mejillones coinciden con Zonas de Protección de Interés Paisajístico (ZPIP) del PRIBCA. Estas zonas permiten instalar paneles y electrolizadores (“infraestructura”), pero prohíben terminantemente la “industria”, vale decir, la producción de amoníaco.

El resultado es absurdo: un proyecto integral queda normativamente mutilado. Podemos generar el electrón y la molécula de H<sub>2</sub> en el sitio, pero no podemos transformarla en amoníaco exportable ahí mismo, porque la norma lo lee como una fábrica molesta y no como almacenamiento de energía.

#### El giro interpretativo que tuve que tomar la DDU para el proyecto Volta

La prueba más contundente de esta incertidumbre jurídica no es teórica, es fáctica. Basta mirar el expediente del recientemente aprobado proyecto Volta (RCA N° 202502001229)<sup>2</sup> para ver cómo la autoridad tuvo que cambiar las reglas de ordenamiento territorial a la mitad del procedimiento de evaluación para salvar la inversión.

En abril de 2024, la SEREMI MINVU de la Región de Antofagasta rechazó la parte de hidrógeno del proyecto<sup>3</sup>. ¿La razón? Al ser clasificada como “infraestructura energética” (por la DDU 470), resultaba incompatible con la Zona de Actividades Productivas (ZAP) donde querían instalarse, que paradójicamente prohíbe la infraestructura energética. Un verdadero sinsentido: el hidrógeno no cabía en la zona industrial por ser “energía”, pero tampoco cabe en la zona rural protegida por ser parte de un proceso industrial.

Pero en mayo de 2025, vimos un verdadero giro interpretativo. La misma autoridad emitió un nuevo oficio favorable<sup>4</sup> cambiando la lógica: argumentó que, como el producto final es amoníaco (industrial), la producción de hidrógeno se “subsume” en la actividad industrial. Al etiquetar todo el paquete como “industria”, el proyecto pudo encajar en la zonificación ZAP.

Esta voltereta deja una lección amarga: la clasificación jurídica de la molécula depende de la conveniencia del mapa. Lo que salvó el proyecto Volta en términos territoriales (decir que todo es “industria”) es exactamente la lápida para los proyectos que buscan emplazarse en zonas ZPIP, donde la etiqueta de “Industria” activará una prohibición automática.

#### La sensatez de la DDU 522 para baterías: una visión correcta

La reciente Circular DDU 522 (marzo de 2025) sobre baterías (BESS) nos muestra una solución a la problemática.

Aquí el MINVU aplicó sentido común: instruyó que los proyectos de baterías *Stand Alone* son “infraestructura energética” y no industria, aunque tengan procesos electroquímicos adentro. El argumento es sistémico: el “resultado final del proceso” sigue siendo energía para el sistema.

Con esta DDU se genera un doble estándar regulatorio evidente. Se acepta el almacenamiento de energía a través de baterías de litio, pero no si ese almacenamiento se produce en amoníaco verde. Las baterías serían solo energía, por otro lado, el amoníaco es solo el resultado de una actividad productiva. Todo da cuenta de una visión restrictiva del asunto y no acorde con la Política Nacional de Hidrógeno Verde ya citada.

Siendo particularmente rudimentario en esta explicación, el amoníaco verde es, en esencia, una “*batería líquida*” para exportar sol chileno. Tratarlo como una manufactura convencional es no entender la tecnología ni la transición energética.

**Coherencia normativa para una estrategia que dice ser prioritaria**

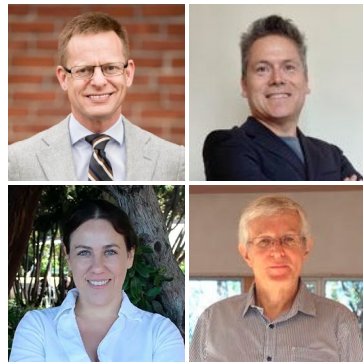
Si realmente queremos que Mejillones se consolide como un *hub* mundial de hidrógeno verde -y no quede reducido a una promesa reiterada en presentaciones internacionales-, es imprescindible alinear la planificación territorial con la lógica técnica y económica de esta nueva industria. En la cadena de valor del hidrógeno, el amoníaco cumple un rol estructural: permite resolver dos de los principales límites de la energía renovable, el almacenamiento de largo plazo y el transporte a gran escala hacia los centros de consumo del hemisferio norte. Sin esa molécula intermedia, los proyectos simplemente no son viables.

Persistir en tratar al amoníaco verde como una manufactura convencional, ajena a la infraestructura energética, no solo desconoce la tecnología, sino que erosiona la credibilidad de la propia Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. El contraste con la Circular DDU 522 sobre sistemas de almacenamiento en baterías es evidente: allí el MINVU entendió correctamente que, aunque existan procesos internos complejos, lo relevante es el resultado final del sistema. Si ese resultado es energía, estamos frente a infraestructura energética. No hay una razón técnica consistente para negar ese mismo razonamiento al amoníaco verde, que cumple exactamente la función de vector energético.

La experiencia reciente -y en particular las contorsiones interpretativas observadas en el caso del proyecto Volta- deja en evidencia que el principal obstáculo no es normativo en sentido estricto, sino interpretativo. Las reglas actuales, aun obsoletas, han demostrado ser lo suficientemente dúctiles cuando existe voluntad de viabilizar un proyecto. El problema es que esa ductilidad se aplica de manera desigual e impredecible, generando un nivel de incertidumbre incompatible con

inversiones de esta magnitud. Hoy, el éxito de un proyecto depende menos de su mérito técnico o ambiental que de cómo la autoridad decida etiquetar una misma molécula según la zona en que se pretenda emplazar.

En definitiva, la discusión sobre si el amoníaco verde es “infraestructura” o “industria” no es puramente técnica: es una decisión política disfrazada de clasificación urbanística. Si el Estado de Chile ha definido al hidrógeno verde como una estrategia país, sus órganos deben alinear la interpretación normativa con ese objetivo, y no convertir el ordenamiento territorial en una barrera silenciosa. Mejillones tiene el recurso, la infraestructura y la vocación industrial. Lo que falta es que la voluntad política deje de expresarse en discursos y estrategias, y se traduzca en criterios regulatorios coherentes, estables y aplicables en el territorio. Solo entonces el amoníaco dejará de ser visto como un problema industrial y podrá asumirse, de una vez, como parte central de la solución energética de Chile.



## INFRAESTRUCTURA COMPARTIDA Y SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS DE H<sub>2</sub>V Y DERIVADOS

JORIS VAN DE KLUNDERT | CÉSAR CERDA |  
MACARENA LARRAÍN | TITO HOMEM DE MELLO

Escuela de Negocios  
Universidad Adolfo Ibáñez

De acuerdo con la base de datos de la IEA de septiembre de 2025, la cartera de proyectos de hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) y sus derivados en Chile contempla la instalación de una capacidad de generación eléctrica renovable de 34,3 GW, los que se distribuyen de la siguiente forma: 48% en la Región de Antofagasta, 42% en la Región de Magallanes y Antártica chilena y 10% en el resto del país. Para poner en perspectiva el tamaño de las inversiones, es interesante considerar que, según el informe del Coordinador Eléctrico Nacional de septiembre/2025, la capacidad instalada total del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es de 38,3 GW, de los cuales 18 GW corresponden a centrales eólicas y solares.

Es decir, los proyectos de hidrógeno proyectan instalar casi la misma capacidad actual del SEN, concentrada sólo en dos regiones del país. Asimismo, proyectan instalar casi el doble de la capacidad combinada eólica y solar del sistema actual. A esto debe sumarse que estos proyectos requieren de infraestructura adicional para producir, almacenar y transportar el hidrógeno y derivados, requiriendo de procesos industriales y capacidades logísticas adicionales y de tamaños sin precedentes en nuestro país. La gran mayoría de los proyectos se enfoca en exportación de derivados de H<sub>2</sub>V como amoníaco verde (NH<sub>3</sub>V).

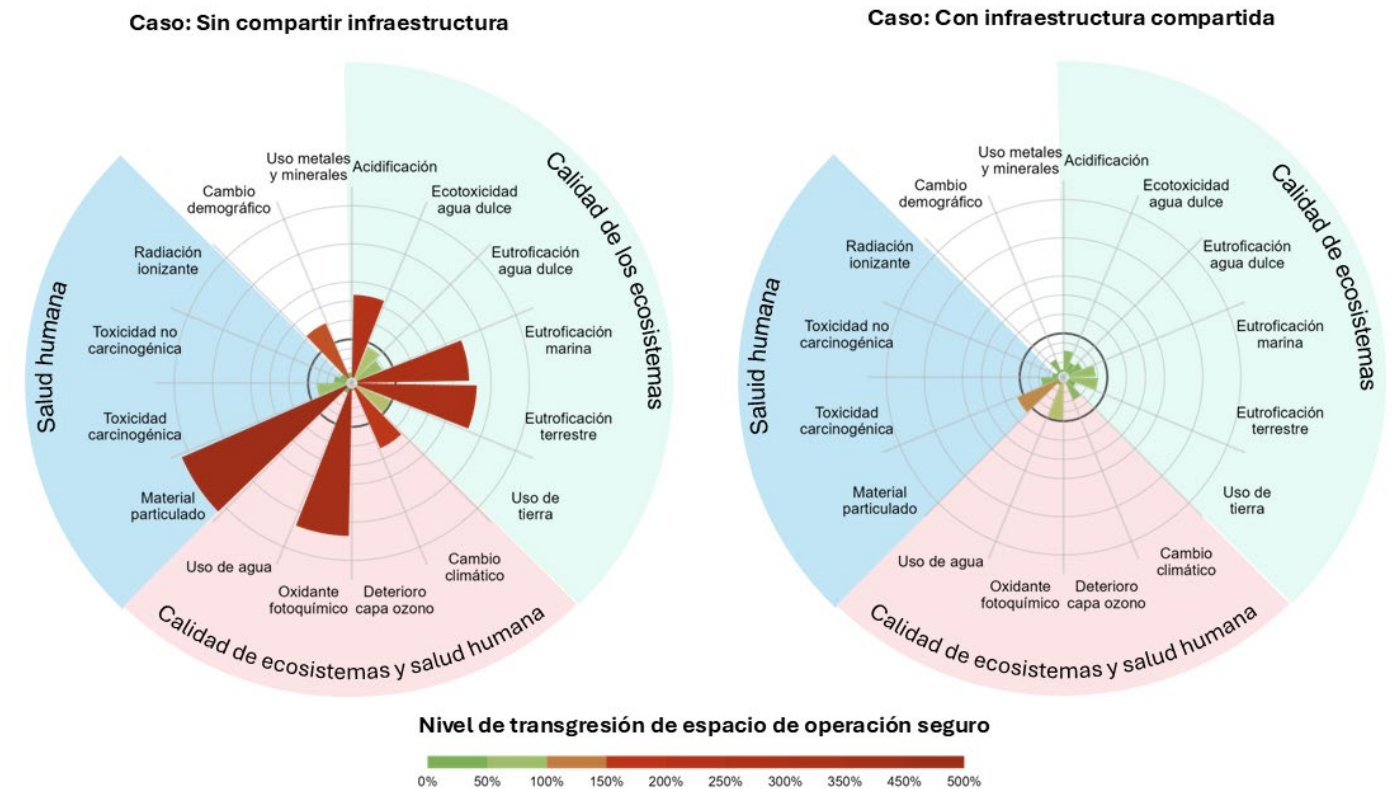
Proyectos de esta envergadura generarán impactos económicos, sociales y ambientales enormes, sobre todo en las regiones de Magallanes y Antofagasta. Actualmente, todos los proyectos que se someten al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) deben proveer, como vía de ingreso al sistema, un instrumento de evaluación ambiental sea una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) conforme el caso. Dicho requisito establece la inclusión de toda infraestructura necesaria para la realización del proyecto en su descripción, desincentivando así el uso de infraestructura de terceros o compartida que podría no ser implementada. Sin embargo, este foco en proyectos individuales puede resultar en una pérdida de oportunidades para compartir infraestructura y

consecuentemente no beneficiarse de sus ventajas económicas, sociales, y ambientales.

A pesar de los requisitos de aprobación ambiental mencionados anteriormente, existe un interés en compartir infraestructura portuaria necesaria para la exportación. Los puertos representan aproximadamente 10% de los costos por proyecto (o del costo nivelado de amoníaco, LCOA por sus siglas en inglés), incluyendo la infraestructura relacionada como ductos y almacenamiento de derivados. Existen oportunidades grandes para compartir infraestructura, sobre todo en los puertos.

Resultados preliminares de nuestros estudios indican que compartir esta infraestructura logística de exportación podría reducir el LCOA entre 6,1% y 6,4%, dependiendo de si el desarrollador del puerto es una entidad privada o pública, cuya mejora es producto del menor costo de capital al que este último puede acceder. La asignación de costos de inversión y de operación de la infraestructura compartida se hizo utilizando *Teoría de Juegos Cooperativa*, utilizando el valor de Shapley (Winter, 2002)<sup>1</sup>, que distribuye los costos de acuerdo con la contribución marginal de cada uno de los participantes. Asimismo, un beneficio económico que resulta de compartir infraestructura, sobre todo cuando se utilizan oportunidades de colaboración público-privada, es el aumento de la ventaja competitiva global de Chile como proveedor más económico de (H<sub>2</sub>V) y sus derivados.

Además de la reducción de costos, el compartir infraestructura resulta en considerables beneficios ambientales. El análisis realizado en nuestros estudios se basa en la metodología de Evaluación de Sostenibilidad Ambiental Absoluta (AESA por sus siglas en inglés). La AESA es un marco evaluativo que determina si una actividad específica sigue siendo sostenible desde el punto de vista medioambiental en términos absolutos (Bjørn, 2025)<sup>2</sup>. El análisis contrasta los efectos sociales y ambientales del



proyecto con la fracción de los límites planetarios (Rockström, 2009)<sup>3</sup> que le corresponderían al proyecto, según su aporte al Producto Interno Bruto mundial.

Resultados preliminares de la aplicación de esta metodología en un escenario hipotético de cinco proyectos, con capacidad para producir del orden de un millón de toneladas anuales de amoníaco cada uno en la Región de Magallanes, revelan que compartir infraestructura de ductos y puertos puede hacer la diferencia entre transgredir o no los límites planetarios.

Tal como se muestra en la siguiente figura, la infraestructura compartida permite desarrollar la industria del hidrógeno verde dentro de los límites planetarios, generando beneficios económicos para el país y la comunidad local, respetando los recursos sociales y naturales de la región. Alternativamente, el desarrollo de proyectos de forma individual, sin compartir infraestructura, puede significar transgredir dichos límites, generando daños irreparables sobre su patrimonio social y ecológico.

En resumen, la implementación de los proyectos de hidrógeno verde con una mirada de infraestructura compartida permite desarrollar la industria del hidrógeno verde dentro de los límites planetarios. Al mismo tiempo produce beneficios económicos que se traspasan al costo nivelado y que permiten blindar la ventaja comparativa de bajos costos de generación renovable de Chile. Sin embargo, la implementación de infraestructura compartida requiere de cambios culturales, tanto en las empresas desarrolladoras, como en órganos estatales y de gobierno, como así también de una regulación que la incentive y garantice el acceso de los actuales y futuros desarrolladores.

## 3.2 DIMENSIÓN TERRITORIAL

El despliegue del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) debe comprenderse como un proceso territorialmente situado, cuya viabilidad y sostenibilidad dependen de la interacción entre dinámicas productivas, capital natural, ordenamiento espacial y estructuras sociales preexistentes. Más allá de los factores tecnológicos e institucionales que habilitan la industria, el territorio emerge como una variable activa que condiciona, orienta y, en última instancia, define las trayectorias posibles de desarrollo.

La dimensión territorial aborda el H<sub>2</sub>V desde la perspectiva del espacio habitado y ecológicamente delimitado, reconociendo que su implementación genera efectos acumulativos sobre el uso del suelo, los paisajes, los sistemas socioecológicos y la relación entre ciudad e industria. En este sentido, el territorio no se concibe como un soporte pasivo de proyectos, sino como un sistema complejo cuya capacidad de carga, resiliencia y legitimidad social influyen directamente en la viabilidad de largo plazo de la industria.

El caso de Mejillones permite observar con particular claridad estas tensiones y oportunidades. Su configuración costera-desértica, su historia productiva vinculada a la energía y su condición de comuna urbana-industrial plantean desafíos específicos en materia de planificación, integración urbana, protección ambiental y cohesión social. La dimensión territorial propone, por tanto, una lectura prospectiva del espacio, orientada a anticipar conflictos, ordenar usos y compatibilizar desarrollo industrial con bienestar territorial.

Desde esta perspectiva, el despliegue del H<sub>2</sub>V se interpreta como un proceso de reorganización espacial que exige planificación estratégica, reconocimiento de límites ecológicos y construcción de legitimidad territorial. Integrar estas variables resulta fundamental para transitar desde un enfoque de localización de proyectos hacia un modelo de desarrollo territorial coherente, resiliente y socialmente sostenible.



## DESAFÍOS PARA QUE LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA AVANCE HACIA PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN BASE A HIDRÓGENO VERDE

### FRANCISCO ALBORNOZ

Profesor Asociado Departamento de Ciencias Vegetales  
Facultad de Agronomía y Sistemas Naturales  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Centro UC Desierto de Atacama

La comuna de Mejillones presenta importantes ventajas que la posicionan a nivel global como un potencial productor a gran escala de hidrógeno verde. El acceso directo al mar asegura el abastecimiento continuo del principal insumo utilizado para la elaboración de este producto: agua. Tras la desalinización del agua de mar, se avanza hacia el proceso de electrólisis, donde la molécula de agua se divide en hidrógeno y oxígeno. Tanto la desalinización como la electrolisis requieren altos aportes energéticos. Aquí aparece la segunda ventaja de la comuna de Mejillones: la alta radiación solar que genera una gran productividad en la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos.

Entonces, desde el punto de vista estratégico, esta comuna en el norte de Chile presenta condiciones excepcionales para la producción de hidrógeno verde, posicionándose como un territorio clave en la transición energética global. Su ubicación geográfica le otorga ventajas comparativas únicas: una de las radiaciones solares más altas del planeta, extensas superficies disponibles para la instalación de plantas fotovoltaicas, acceso a puertos de aguas profundas para exportación, y cercanía a polos industriales y mineros que demandan energía limpia para descarbonizar sus operaciones.

La producción a gran escala de hidrógeno verde no solo puede generar beneficios económicos directos, como la creación de empleos especializados, atracción de inversión extranjera y desarrollo de infraestructura energética, sino también impactos sociales positivos, como la diversificación de la matriz productiva local, el fortalecimiento de capacidades técnicas en la población y la mejora en la calidad de vida mediante proyectos sostenibles. Además, el hidrógeno verde puede ser utilizado como insumo en múltiples rubros industriales, incluyendo la minería, la metalurgia, el transporte pesado, la generación eléctrica y la producción de combustibles sintéticos.

Sin embargo, más allá de su uso como insumo energético, se abre una oportunidad estratégica para elaborar productos con alto valor agregado, como fertilizantes verdes, especialmente urea producida a partir de amoníaco generado con hidrógeno verde y nitrógeno del aire. Este tipo de fertilizante no solo responde a la creciente demanda global de soluciones agrícolas sostenibles, sino que también permite a Chile posicionarse como un actor relevante en el mercado internacional de agro insumos, con una oferta diferenciada por su bajo impacto ambiental y trazabilidad de origen renovable.

La integración de esta cadena de valor podría transformar a la Región de Antofagasta en un centro de innovación y producción limpia, con capacidad para exportar conocimiento, tecnología y productos de alto estándar ambiental.

El norte de Chile tiene una larga tradición como productor de fertilizantes, específicamente aquellos que contengan nitrógeno. El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de los cultivos, sin embargo, su disponibilidad en los suelos es baja. Durante la primera mitad del siglo XIX, comienza la explotación industrial de guano rojo desde los depósitos costeros en lo que es actualmente, las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Este material se genera por la acumulación de desechos de aves marinas, los cuales representan una buena fuente de nitrógeno para fertilizar los cultivos. Luego, a partir de la segunda mitad del siglo XIX hasta la década de 1930, Chile comienza la explotación del salitre sódico también en el norte del país. A diferencia del guano rojo, el salitre sódico representa una fuente mineral de nitrógeno, el que fue ampliamente utilizado a nivel mundial hasta la invención del método de Haber y Bosch, cuando comienza la producción de salitre sintético, hoy conocido como urea. La urea se genera a partir de la fijación de nitrógeno gaseoso ampliamente disponible en la atmósfera-cerca de un 78% de la atmósfera corresponde a nitrógeno gaseoso- a través

de un proceso altamente demandante en energía. La producción de 1 tonelada de urea produce 910 kg. de CO<sub>2</sub> que se liberan al ambiente.

La producción de hidrógeno verde se presenta como una alternativa estratégica y sustentable para reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas a la fabricación de urea, un fertilizante ampliamente utilizado en la agricultura. A diferencia del hidrógeno gris, que se obtiene a partir de combustibles fósiles, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable, lo que lo convierte en un insumo clave para descarbonizar procesos industriales intensivos en emisiones. Para que este tipo de hidrógeno pueda ser utilizado en la producción de urea, es necesario integrarlo con una planta de síntesis de amoníaco, ya que éste es el precursor esencial en la reacción química que da origen a la urea, junto con el dióxido de carbono.

Este encadenamiento productivo abre una oportunidad única para la Región de Antofagasta, que cuenta con condiciones excepcionales para la generación de energías renovables, especialmente solar. Gracias a su radiación de clase mundial y a sus extensas zonas desérticas, la región podría posicionarse como un *hub* global de producción de urea verde, aprovechando el nitrógeno del aire y el hidrógeno verde como materias primas limpias. Esto no solo permitiría diversificar la matriz productiva regional, sino también agregar valor a los recursos naturales disponibles, fomentando una industria con alto potencial de exportación y bajo impacto ambiental.

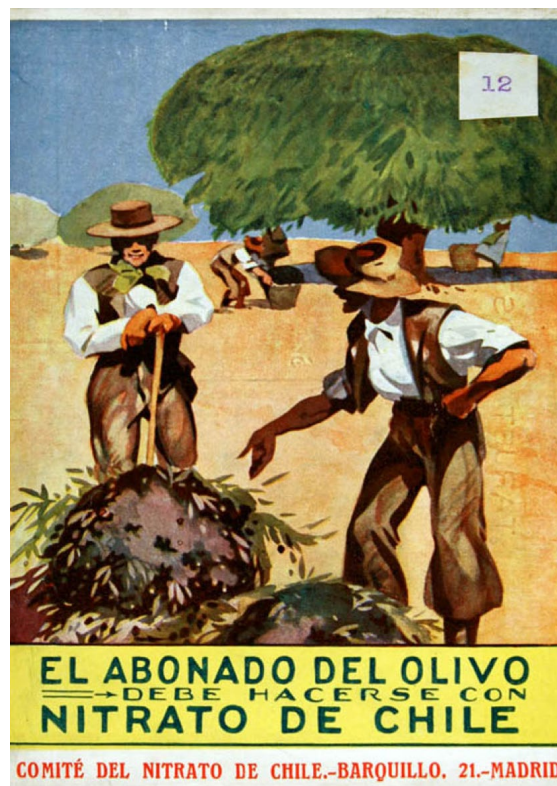
Para materializar esta visión, es fundamental que el desarrollo de esta industria sea abordado de manera colaborativa entre el sector privado, la academia y las instituciones públicas. Se requiere una planificación estratégica que incluya el diseño de proyectos integrados, la inversión en infraestructura tecnológica, la formación de capital humano especializado y la creación de incentivos regulatorios que promuevan la innovación y la sostenibilidad. El objetivo debe ser avanzar hacia la producción de un fertilizante de alto valor agregado, que permita a Chile dejar de ser un mero proveedor de insumos básicos y convertirse en un actor relevante en la cadena global de suministro de fertilizantes sostenibles.

Actualmente, el mercado global de la urea se estima en aproximadamente USD 120.000 millones, y se proyecta que alcanzará un valor superior a los USD 165.000 millones para el año 2032, con una tasa de crecimiento anual compuesta

que oscila entre 2,1% y 6,8%. Este crecimiento está impulsado principalmente por el aumento en la demanda de fertilizantes nitrogenados en países del Asia-Pacífico, donde la expansión agrícola y la necesidad de mejorar la productividad de los suelos son factores clave. En términos de volumen, se espera que para el 2030 la producción mundial de urea supere los 300 millones de toneladas métricas, lo que evidencia la magnitud del mercado y el potencial que representa para regiones como Antofagasta, que buscan insertarse en cadenas de valor globales con una oferta diferenciada y sustentable.

A pesar de las condiciones excepcionales que ofrece la comuna de Mejillones para la producción de hidrógeno verde -como el acceso al agua de mar y una alta radiación solar para generación fotovoltaica- la implementación de una industria de urea verde en la Región de Antofagasta enfrenta desafíos técnicos, económicos y de coordinación institucional. En primer lugar, se requiere una infraestructura compleja que integre plantas de desalinización, electrólisis, producción de amonio y síntesis de urea, cada una con altos requerimientos energéticos y tecnológicos. Esto implica inversiones significativas en ingeniería, logística y mantenimiento, además de asegurar la disponibilidad continua de energía renovable para mantener la sostenibilidad del proceso. En segundo lugar, es necesario desarrollar capacidades locales en capital humano especializado, tanto en operación como en investigación y desarrollo, para garantizar la eficiencia y competitividad de la industria. A nivel económico, el desafío radica en posicionar la urea verde en un mercado global altamente competitivo, donde el costo de producción debe equilibrarse con los beneficios ambientales y el valor agregado del producto.

Finalmente, la articulación efectiva entre el sector público, privado y académico será clave para diseñar políticas de fomento, atraer inversión extranjera y establecer una cadena de valor robusta. Superar estos desafíos permitiría retomar el protagonismo histórico del norte de Chile como proveedor global de fertilizantes nitrogenados, esta vez con un sello verde que responda a los compromisos climáticos globales y a las exigencias de sostenibilidad del mercado internacional.



Afiches comerciales del salitre chileno en España a comienzos del siglo XX. El salitre chileno contó con una amplia promoción para cultivos como naranjo, papa, vid y olivo. Fuente de las imágenes: Archivo Nacional de Chile.



## EL IMPERATIVO DEL CUIDADO: SEGURIDAD FÍSICA Y AMBIENTAL EN EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

### RODRIGO DE LA CALLE

Gerente División Prevención  
ACHS

El desarrollo del hidrógeno verde en Chile representa una oportunidad estratégica para transformar nuestra matriz energética, posicionar al país como líder en energías limpias y contribuir a la descarbonización global. En este contexto, Mejillones se proyecta como un lugar clave para la instalación de proyectos de producción, almacenamiento y exportación de hidrógeno y amoníaco verde, gracias a sus condiciones geográficas, logísticas y energéticas. Sin embargo, este despliegue debe estar guiado por un principio ineludible: el cuidado de las personas.

#### Primero, las personas: el valor intrínseco de la vida

Ningún trabajo debiera poner en riesgo la vida ni la salud de quienes lo realizan. Este imperativo ético debe ser el fundamento de cualquier industria, y con mayor razón de una que se construye desde cero. La seguridad y salud ocupacional no son sólo requisitos normativos, sino expresiones concretas de respeto por la dignidad humana. La industria naciente del hidrógeno y amoníaco verde, tiene la oportunidad desde el inicio de ser diseñada y desarrollada en base a entornos laborales libres de accidentes y enfermedades profesionales, donde el autocuidado, la corresponsabilidad, el ejemplo de los líderes, y el desarrollo de una cultura preventiva sean parte del ADN organizacional.

#### Legitimidad social: armonía con la vida y el medio ambiente

La legitimidad de esta nueva industria dependerá de su capacidad para desarrollarse en armonía con las comunidades y el entorno. Mejillones, con su historia de carga ambiental acumulada, exige un nuevo estándar de desarrollo: uno que no solo sea sustentable en términos técnicos, sino también justo y seguro para las personas. La seguridad física y ambiental debe ser vista como una condición habilitante para el éxito del hidrógeno y el amoníaco verde, no como una externalidad a gestionar.

#### Mirar la cadena completa de valor

La seguridad no puede limitarse a la etapa de producción. Debe abarcar toda la cadena de valor: generación, almacenamiento, distribución y aplicación. Esto incluye a contratistas, transportistas, operadores, comunidades vecinas y usuarios finales. Cada eslabón presenta riesgos específicos que deben ser gestionados con rigurosidad técnica y sensibilidad territorial. En este contexto, la implementación de *Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional* (SGSSO) integrales es clave para asegurar una cobertura efectiva en todas las fases del proceso.

#### Reconocer los riesgos, aplicar el conocimiento

El hidrógeno y el amoníaco, tanto como producto final, o como el vector más probable para el transporte y almacenamiento del H<sub>2</sub>V, son sustancias peligrosas, cuya producción y tratamiento se asocia a riesgos inherentes significativos. Pretender lo contrario sería irresponsable. Sin embargo, las industrias química y energética cuentan con décadas de experiencia en el manejo seguro de estos compuestos. El desafío no es partir de cero, sino trasladar el conocimiento acumulado a esta nueva industria, adaptarlo a sus particularidades y traducirlo en controles operacionales, sistemas de mitigación, procesos robustos y mejores prácticas en seguridad y salud ocupacional. La transferencia de saberes técnicos será esencial para construir una industria segura desde el inicio.

#### Si bien la regulación inicial es suficiente, su evolución es imprescindible

Chile cuenta con una regulación adecuada para iniciar el desarrollo del hidrógeno verde en condiciones seguras. Normativas como el DS 13/2022 del Ministerio de Energía, que aprueba el reglamento de seguridad para las instalaciones de hidrógeno, el DS 43/2016 del Ministerio de Salud, sobre almacenamiento de sustancias peligrosas, el DS 594/1999 también del Ministerio de Salud, sobre condiciones sanitarias y ambientales en las condiciones de trabajo, y junto con los lineamientos de diversos ministerios para proyectos H<sub>2</sub>V, ofrecen un marco sólido para la evaluación de riesgos y la implementación de medidas preventivas. No obstante, el dinamismo de esta industria y la escala a la cual se aspira a desarrollar exigirán una evolución normativa continua, basada en evidencia, diálogo multisectorial y aprendizaje en terreno.

#### Una industria verde al servicio del desarrollo económico, ambiental y social

El hidrógeno verde puede ser una de las palancas de transformación productiva, ambiental y social más potentes para el desarrollo de Chile. Pero su éxito dependerá de que se construya sobre la base del cuidado de las personas, comunidades y medio ambiente. La seguridad física y ambiental no es un requisito más; es la piedra angular de una transición energética justa, legítima y sostenible.

Gracias al hidrógeno verde, Mejillones tiene la oportunidad de demostrar que es posible desarrollar una industria compleja con estándares ejemplares de seguridad y salud. Desde la ACHS reafirmamos nuestro compromiso con ese objetivo, acompañando a las organizaciones del sector para que la prevención se integre como un componente estructural de esta nueva etapa.



## DESARROLLO HUMANO, PATRIMONIO Y COMUNIDADES: OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN

### JAIME COQUELET

Académico y Director de Estudios Aplicados  
Escuela de Antropología  
Pontificia Universidad Católica de Chile

El despliegue de la industria de hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) sitúa a la Región de Antofagasta -y a Mejillones en particular- como uno de los ejes articuladores del Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, que busca posicionar a Chile como potencia regional en energías limpias. La combinación de recursos renovables (solar y eólico), infraestructura portuaria y proximidad a la gran minería -potencial demandante de H<sub>2</sub>V- convierte a Mejillones en un punto estratégico para esta transición tecnológica y productiva<sup>1</sup>.

El H<sub>2</sub>V es más que una tecnología emergente, constituye una plataforma para articular crecimiento económico, transición energética e innovación social a escala territorial. En este marco, Mejillones -con su entorno desértico-costero, su devenir histórico y sus capas patrimoniales- ofrece condiciones singulares para pilotear estándares de primera línea en desarrollo humano, participación comunitaria y protección del patrimonio cultural, tanto material como inmaterial.

El desarrollo humano, en el sentido propuesto por Amartya Sen<sup>2</sup>, se define como la expansión de las libertades y capacidades reales de las personas para desplegar sus proyectos de vida: aprender, cuidar, crear, habitar con dignidad y participar en la conducción de su comunidad. Su medición trasciende la mera riqueza económica o el empleo: se expresa en el grado en que los habitantes pueden ejercer derechos, vivir en entornos saludables y participar de decisiones colectivas.

El patrimonio cultural -material e inmaterial- aporta identidad, sentido y conocimiento<sup>3</sup>. Cuando las políticas públicas y la inversión privada lo integran como activo, la identidad se transforma en agencia, los saberes en gestión ambiental y la memoria en educación, generando estrategias de bienestar sostenidas en el tiempo. En esta clave, el patrimonio no constituye el “costo social” de la transición, sino la base cultural que permite que el desarrollo energético se traduzca en progreso humano.

### Mirar el territorio: aprender de lo realizado

Chile ha suscrito compromisos internacionales -como el Acuerdo de París- que establecen la meta de carbono-neutralidad al año 2050<sup>4</sup>. En ese contexto, la promoción del H<sub>2</sub>V adquiere relevancia estratégica. Las experiencias del país en minería, energía y puertos demuestran que el éxito de las industrias depende de integrar desde el inicio dimensiones ambientales, sociales y culturales que no solo mitiguen impactos, sino que generen oportunidades de desarrollo y aprendizaje territorial.

La macrozona norte acumula más de cuatro décadas de relación entre minería, energía y comunidades. Ese capital institucional, con sus aciertos y conflictos, constituye el piso desde el cual el H<sub>2</sub>V debe avanzar hacia nuevos estándares. La evaluación futura de este proceso -tomando el año 2050 como horizonte- permitirá determinar si la industria del H<sub>2</sub>V, además de diversificar la matriz energética, se consolida como referente internacional en desarrollo humano territorial, cooperación y construcción de identidad. Para ello propongo poner la mirada y los esfuerzos en cuatro dimensiones centrales para una industria de clase mundial.

### 1. Comunidades organizadas con espacio de participación

Los territorios son escenarios de diversidad y conflicto, donde convergen actores con intereses y visiones distintas. En Mejillones conviven comunidades indígenas, pescadores artesanales, instituciones estatales, sindicatos portuarios, colectivos culturales, asociaciones gremiales y grupos de memoria, entre otros. Este tejido social demuestra una madurez organizativa y una capacidad de interlocución que exige nuevos formatos de participación.

La innovación social debe centrarse en cambios significativos para las personas y comunidades: empleos de calidad, formación técnica y universitaria ligada a las nuevas ocupaciones del H<sub>2</sub>V, deben fortalecer la participación temprana e incidente -no meramente informativa-, y generar mecanismos de queja y reparación efectivos<sup>5</sup>. En definitiva, se trata de construir articulaciones amplias antes, durante y después del ciclo industrial, fortaleciendo la cohesión social y generando las condiciones de legitimidad.

### 2. Marcos normativos y estándares como piso de exigencia

El desarrollo del H<sub>2</sub>V se produce en un contexto normativo más robusto que el que conocieron la gran minería -metálica y no metálica- o las primeras empresas de energías renovables. El Acuerdo de Escazú, junto con su Plan Nacional de Implementación Participativa 2024-2030, establece obligaciones de acceso a información, participación incidente y justicia ambiental<sup>6</sup>.

Los estándares de debida diligencia en derechos humanos, definidos en instrumentos como los Principios Rectores de la ONU sobre Empresas y Derechos Humanos (2011) y en la Guía de Debida Diligencia para la Conducta Empresarial Responsable de la OCDE (2018)<sup>7</sup>, constituyen hoy la infraestructura ética del desarrollo sostenible. Este enfoque convierte los derechos humanos en procedimientos verificables para identificar, prevenir, mitigar y reparar impactos.

En el ámbito del patrimonio, las Guías de Evaluación de Impacto en Contextos de Patrimonio Mundial de la UNESCO (2022)<sup>8</sup> aportan metodologías que integran el patrimonio cultural y natural en las evaluaciones ambientales. En Chile, la Ley 19.300 (1994) y la Ley 17.288 (1970) establecen las bases legales para la protección ambiental y patrimonial. Así también, la Ley 21.273 (2020), que reconoce al pueblo Chango, refuerza la necesidad de procesos de consulta y consentimiento libre, previo e informado en el borde costero<sup>9</sup>, son prácticas permanentes en la industria.

Este entramado normativo e institucional -nacional e internacional- ofrece las condiciones para aplicar buenas prácticas de alta exigencia, articulando sostenibilidad ambiental, justicia social y respeto cultural.

### 3. Patrimonio como palanca de desarrollo humano

Mejillones no es solo una bahía logística, es un paisaje social, cultural y patrimonial. El Bien Nacional Protegido Península de Mejillones resguarda una franja de alto valor ecológico y paisajístico<sup>10</sup>, mientras que el Museo Municipal Raúl Mavrakis Morales -restaurado en 2024- se ha consolidado como espacio de investigación y encuentro comunitario<sup>11</sup>.

Ambos ejemplos, permiten concebir el patrimonio como activo de desarrollo -y no como restricción- permiten anclar la innovación energética en una narrativa de orgullo local. Rutas interpretativas, señalética de oficios tradicionales (salitre, pesca, ferrocarril, entre otras) y programas museográficos vinculados a la transición justa son ejemplos de cómo el patrimonio puede generar sentido, aprendizaje y cohesión.

Experiencias internacionales documentadas por la UNESCO<sup>12</sup> muestran que es posible compatibilizar conservación y producción industrial siempre que la gobernanza incorpore a las comunidades locales, establezca monitoreos independientes y defina límites a la huella de las operaciones. El patrimonio, tanto material como inmaterial, conforma un sistema vivo, los sitios se preservan cuando las prácticas que les dan significado siguen ocurriendo.

### 4. Gobernanza de triple licencia: ambiental, social y patrimonial

El éxito del H<sub>2</sub>V en Mejillones depende de una gobernanza integrada, capaz de articular tres licencias simultáneas: ambiental, social y patrimonial.

Respecto de la licencia ambiental, significa diseñar procesos con agua desalada y energía renovable para todos los consumos, establecer metas verificables de eficiencia y publicar indicadores. La gestión de salmueras, así como de las planteas eólicas y fotovoltaicas, debe realizarse con monitoreo participativo y auditorías externas.

En cuanto a la licencia social, implica, por una parte, adoptar un sistema formal de debida diligencia en derechos humanos; pero también, generar consejos de gobernanza territorial con comunidades costeras, pueblos indígenas, comunidades, sindicatos y universidades y disponer de un mecanismo de quejas accesible y transparente. Los acuerdos comunitarios deben ser vinculantes y revisables, con metas en empleo local, formación y cadenas de suministros de proveedores.

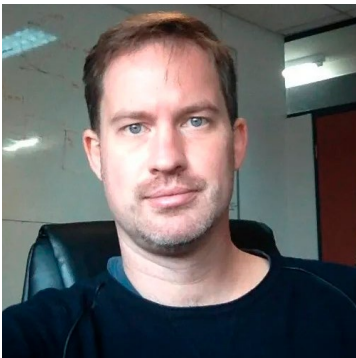
Finalmente, una licencia patrimonial, que permita aplicar instrumentos, como la guía de evaluación de impacto al patrimonio desde la prefactibilidad de los proyectos de inversión, estableciendo zonas de exclusión cultural y natural, contar con monitores culturales y fomentar estructuras como consejos patrimoniales local con representación de actores gubernamentales, pueblos indígenas, historiadores y cultores locales, expertos académicos y organizaciones comunitarias, entre otras. Disponer además de fondos patrimoniales financiados por los proyectos para conservación y mediación cultural.

Estas tres dimensiones -ambiental, social y patrimonial- conforman una matriz de legitimidad que convierte la transición energética en un proceso participativo, equitativo y culturalmente pertinente.

Una mirada desde el futuro

En definitiva, el hidrógeno verde ofrece a Mejillones la posibilidad de resignificar su identidad industrial desde la sostenibilidad. El desafío es doble, consolidar un *hub* energético competitivo y, simultáneamente, un territorio de desarrollo humano. Para ello, la gobernanza de triple licencia -ambiental, social y patrimonial- debe operar como núcleo del modelo.

Si la planificación del H<sub>2</sub>V integra debida diligencia, participación incidente y patrimonio como plataforma de identidad, Mejillones podrá convertirse no solo en centro logístico de la transición energética, sino en un faro de innovación social y cultural. Un territorio que combina productividad, equidad y memoria, y que demuestra que la energía más limpia puede ser también la más justa.



## EL HIDRÓGENO Y LA SEGURIDAD

### WOLFRAM JAHN

Profesor Asociado  
Escuela de Ingeniería

Pontificia Universidad Católica de Chile

Un accidente grave asociado a una tecnología nueva puede tener consecuencias que trascienden el evento en sí, ya que no solo pone en riesgo vidas humanas y genera pérdidas materiales, sino que además erosiona la confianza pública en dicha innovación. La percepción de inseguridad se instala rápidamente en la sociedad, amplificada por la cobertura mediática y el desconocimiento generalizado sobre sus riesgos reales, lo que puede frenar la aceptación y adopción de la tecnología incluso si en términos estadísticos ofrece beneficios o mayor seguridad que las alternativas tradicionales. Así, un solo incidente puede convertirse en un símbolo del peligro percibido, retrasando procesos de innovación y dificultando la implementación de soluciones que podrían ser fundamentales para el desarrollo futuro.

Para que el hidrógeno verde llegue a ser una alternativa real en la industria, en el sector residencial y en el transporte, no basta con hablar de su enorme potencial energético o de su aporte a la descarbonización. Es imprescindible garantizar que su uso sea seguro. Esto significa trabajar en dos frentes: reducir al máximo la probabilidad de que ocurra un accidente y, al mismo tiempo, estar preparados para mitigar sus posibles consecuencias. La seguridad, en este sentido, no es un obstáculo ni un trámite burocrático, sino la condición básica que permitirá que empresas, trabajadores y la ciudadanía confíen en esta tecnología. Solo así el hidrógeno podrá dejar de ser una promesa y convertirse en una pieza clave de nuestra economía futura.

A diferencia del gas natural o del gas licuado de petróleo (GLP), que forman parte de la vida cotidiana de muchos hogares, el hidrógeno sigue siendo un gran desconocido para la mayoría. No es un combustible familiar, y su manejo seguro exige precauciones específicas que aún no están instaladas en la cultura general. Esto se debe a sus características particulares: es un gas extremadamente liviano y altamente difusivo, lo que

hace que al aire libre se disipe rápidamente y reduzca el riesgo de acumulación. Sin embargo, en espacios cerrados puede alcanzar con gran facilidad concentraciones peligrosas, ya que posee un rango de inflamabilidad muy amplio -aproximadamente entre 4% y 75% en volumen en aire, comparado con un rango entre 5% y 15% para el gas natural. A ello se suma que, aunque su temperatura de autoencendido es relativamente alta, su energía mínima de activación es muy baja, lo que facilita la ignición. Además, el hidrógeno tiene una velocidad de llama muy elevada y, en condiciones confinadas, puede producir explosiones muy violentas (detonaciones). El hidrógeno tiene particularidades que requieren atención, ya que su llama es prácticamente invisible a la luz del día, lo que aumenta el riesgo de quemaduras. El hidrógeno también puede debilitar ciertos materiales metálicos -un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno- que, si no se controla adecuadamente, favorece la aparición de fugas. Estas propiedades explican por qué, pese a su enorme potencial, el hidrógeno requiere una cultura de seguridad sólida, y por qué resulta tan importante educar, informar y preparar a la sociedad antes de que se convierta en parte de nuestra vida diaria. La siguiente tabla comparativa ilustra cómo estas propiedades difieren de las de otros combustibles de uso común.

El hidrógeno no es un completo desconocido en el ámbito productivo. De hecho, varias industrias lo han utilizado de forma intensiva durante más de un siglo: la aeroespacial, la petroquímica, la de fertilizantes -donde resulta esencial para producir amoníaco- e incluso la industria alimentaria. Cada año se producen y transportan millones de toneladas de hidrógeno en todo el mundo, y aun así la tasa de incidentes es extremadamente baja. Existen, además, miles de kilómetros de tuberías de hidrógeno en operación -solo en Estados Unidos más de 1.600 kms.- con un historial de seguridad comparable al del gas natural. En la industria aeroespacial, el hidrógeno líquido

| PROPIEDAD                      | HIDRÓGENO (H <sub>2</sub> )   | GAS NATURAL (CH <sub>4</sub> ) | GLP (PROPANO/BUTANO)             |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| DENSIDAD RELATIVA (AIRE=1)     | 0.07 (muy liviano)            | 0.55 (liviano)                 | 1.5-2.0 (más pesado que el aire) |
| DIFUSIVIDAD                    | Muy alta --> se disipa rápido | Media                          | Baja (tiende a acumularse)       |
| RANGO DE INFLAMABILIDAD (VOL%) | 4 - 75%                       | 5 - 15 %                       | 2 - 10%                          |
| ENERGÍA MÍNIMA DE IGNICIÓN     | ~0.02 mJ (muy baja)           | ~0.28 mJ                       | ~0.25 mJ                         |
| TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN    | ~585 °C                       | ~540 °C                        | ~490 °C                          |
| VELOCIDAD DE LLAMA             | ~2.9 m/s (muy alta)           | ~0.4 m/s                       | ~0,5 m/s                         |
| TENDENCIA A DETONACIÓN         | Alta en espacios confinados   | Baja                           | Baja                             |
| VISIBILIDAD DE LA LLAMA        | Prácticamente invisible       | Visible (azulada)              | Visible (amarilla-azul)          |
| FRAGILIZACIÓN DE MATERIALES    | Sí, puede debilitar metales   | No relevante                   | No relevante                     |

se ha empleado en más de mil lanzamientos de cohetes, bajo protocolos de seguridad extremadamente estrictos. Estudios de la Comisión de Seguridad del Hidrógeno (CSH<sub>2</sub>) y guías técnicas europeas muestran que los accidentes graves con hidrógeno ocurren con una frecuencia comparable, o incluso menor, que la de otros gases industriales como el metano o el propano. En Estados Unidos, por ejemplo, la OSHA y la EPA registran que los incidentes con hidrógeno representan menos del 2% de los accidentes reportados con gases inflamables en plantas químicas. Lejos de ser un obstáculo, estos antecedentes confirman que el hidrógeno puede manejarse de manera segura, siempre que existan estándares adecuados y una cultura de seguridad robusta.

El desafío está entonces en trasladar la experiencia acumulada en seguridad del hidrógeno, propia de industrias especializadas, hacia aplicaciones de uso masivo y en contacto directo con un público no entrenado. Los futuros usuarios están habituados a combustibles como gas natural, GLP, gasolina o kerosene, pero no al hidrógeno, lo que obliga a generar un marco de confianza.

La clave está en combinar una regulación clara y exigente -como por ejemplo el Decreto Supremo 13/2022 del Ministerio de Energía, promulgado en junio de 2024- con programas de capacitación técnica, campañas de educación masiva y una comunicación transparente hacia la ciudadanía. Este decreto representa un avance significativo al establecer requisitos de seguridad para las instalaciones fijas de hidrógeno, pero deja fuera las aplicaciones móviles -como el transporte o el almacenamiento en vehículos-, que demandan normas específicas de diseño, operación y mantenimiento. Desarrollar

este marco complementario será fundamental para asegurar la trazabilidad y la coherencia del sistema regulatorio en su conjunto. Es importante resaltar que no basta con controlar el riesgo real: también es necesario gestionar la confianza social, involucrando a las comunidades en los procesos de decisión y mostrando con ejemplos concretos que el hidrógeno puede manejarse de manera segura. Solo así se podrá garantizar que el salto hacia el hidrógeno ocurra con seguridad, credibilidad y legitimidad social.

Pero queda aún camino por recorrer. El problema de la regulación es que, en la mayoría de los casos, surge de la experiencia acumulada y se traduce en normas detalladas que orientan cómo cumplir con sus exigencias. En el caso del hidrógeno, ese camino aún no está del todo trazado: no contamos con un marco normativo completo ni con la experiencia local suficiente para desarrollarlo de manera autónoma. De ahí la importancia de impulsar investigación pre normativa, que permita generar la evidencia científica y técnica necesaria para sustentar futuras regulaciones y adaptarlas a las condiciones del país. Justamente allí se abre una oportunidad: aprender de la experiencia internacional, adaptar buenas prácticas a la realidad chilena y, con ello, adelantarse en la construcción de un marco regulatorio moderno que no solo dé certezas, sino que también impulse la innovación.

Chile tiene hoy la oportunidad de posicionarse como un referente en el desarrollo seguro del hidrógeno verde. Lograrlo dependerá no solo de la tecnología, sino también de la confianza que sepamos construir en torno a ella. Esa confianza será, en última instancia, el verdadero combustible de la transición energética.



## DEL EXTRACTIVISMO A LA INNOVACIÓN PRODUCTIVA: EL HIDRÓGENO VERDE COMO CATALIZADOR DE LA TRANSFORMACIÓN TERRITORIAL CHILENA

**ROBERTO MORIS**

Director

Cerolabs UC

Profesor

Escuela de Arquitectura y del Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales  
Pontificia Universidad Católica de Chile

### La encrucijada histórica de Chile

Chile experimenta una transformación sin precedentes hacia la descarbonización económica, donde el hidrógeno verde emerge como catalizador fundamental del cambio. Esta transición representa más que una oportunidad comercial: constituye la posibilidad histórica de reescribir la trayectoria económica nacional, superando siglos de dependencia extractivista para construir una matriz productiva basada en conocimiento, innovación y sostenibilidad.<sup>1-2-3</sup>

El país enfrenta una coyuntura decisiva para redefinir su inserción económica global mediante el desarrollo del hidrógeno verde. Tres territorios estratégicos lideran esta transformación: Antofagasta con Mejillones como epicentro industrial, la macrozona central (Santiago, Valparaíso y O'Higgins), y Magallanes. Antofagasta aporta la radiación solar más intensa del planeta e infraestructura industrial consolidada; la macrozona central ofrece los principales centros de consumo y sectores productivos; mientras Magallanes destaca por su potencial eólico, recursos hídricos y acceso a rutas marítimas globales. Estos elementos, que constituyen el 70% del costo de producción, posicionan a Chile para generar el hidrógeno verde más competitivo mundialmente.<sup>4-5-6</sup>

Chile estaría desperdiciando 2 TWh anuales de energía renovable por limitaciones en infraestructura de transmisión y almacenamiento, evidenciando que el desafío trasciende la generación para situarse en la gestión integral del sistema energético<sup>7-8</sup>. Esta paradoja representa una oportunidad histórica: mientras el ciclo salitrero decimonónico explotó recursos finitos, hoy el amoníaco retorna como motor económico desde un paradigma sostenible donde la abundancia renovable sustituye el agotamiento de recursos naturales. Materializar

este potencial transformador requiere planificación territorial integral que articule desarrollo económico, preservación ambiental y equidad social, posicionando a Mejillones como laboratorio de innovación para la economía descarbonizada.

### Los aprendizajes del extractivismo: hacia un nuevo paradigma productivo

La historia económica chilena ofrece lecciones cruciales para esta transición. El ciclo salitrero del siglo XIX, basado en la explotación de recursos finitos, generó riqueza temporal, pero no desarrollo territorial sostenible. Posteriormente, el modelo de industrialización sustitutiva dio paso a una economía dependiente de importaciones, donde la capacidad productiva nacional se debilitó progresivamente.

El hidrógeno verde presenta una paradoja histórica notable: el amoníaco, protagonista del auge salitrero, retorna como motor económico, pero desde un paradigma radicalmente distinto. Ya no se trata de agotar reservas naturales, sino de aprovechar la abundancia renovable perpetua. Esta transformación exige superar la visión tradicional de Chile como proveedor de materias primas para avanzar hacia un modelo donde la energía renovable catalice ecosistemas productivos complejos.

La superficie territorial limitada de comunas como Mejillones -con apenas 14.000 habitantes, pero posicionada como uno de los 16 puntos de exportación de amoníaco del hemisferio sur- demanda maximizar la densidad productiva mediante tecnologías avanzadas. No basta con exportar hidrógeno o amoníaco verde; es imperativo desarrollar cadenas de valor que transformen estos insumos en productos de alta complejidad tecnológica.

### Territorios inteligentes: la convergencia entre energía e innovación

El concepto de territorios inteligentes trasciende la digitalización urbana convencional. En el contexto del hidrógeno verde, implica crear espacios donde converjan industria energética, desarrollo tecnológico, investigación aplicada y emprendimiento innovador con una "interpolinización creativa". Esta visión requiere superar la separación tradicional entre zonas industriales y urbanas, avanzando hacia modelos de integración donde los polos productivos convivan armónicamente con ciudades de alto estándar.

La abundancia energética renovable abre posibilidades inéditas para Chile. Por ejemplo, en el contexto del desarrollo de la economía digital las Fábricas de Inteligencia Artificial emergen como alternativa concreta para transformar excedentes energéticos en capacidad computacional estratégica. Estos centros no serían meros data centers, sino complejos productivos que agreguen valor mediante procesamiento avanzado, análisis predictivo y generación de conocimiento aplicado. La energía limpia abundante permitiría operar infraestructuras computacionales intensivas a costos competitivos, posicionando a Chile en las cadenas globales de valor digital.

Los referentes internacionales validan esta visión. Tarragona con su *smart chemistry* integrando biotecnología y economía circular, o Kiruna transformando su economía extractiva hacia acero verde, demuestran que la excelencia industrial puede catalizar desarrollo urbano de calidad superior. Mejillones requiere aspirar a constituirse en un referente de simbiosis entre industria responsable y calidad de vida excepcional. En el pasado la comunidad ya ha recibido ofertas incumplidas de modernización gracias al desarrollo industrial, el nuevo Mejillones requiere asumir esta historia y construir nuevas confianzas transversales.

### Infraestructura productiva: más allá de la transmisión energética

El ciclo productivo del hidrógeno verde -desde la desalinización y electrólisis hasta la síntesis de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch optimizado- requiere infraestructura compleja que trasciende las redes de transmisión convencionales. Sin embargo, el verdadero desafío radica en construir ecosistemas productivos de alta diversidad que aprovechen esta energía para generar valor agregado. Un modelo de infraestructuras compartidas evitaría la dispersión de inversiones, pero requiere una planificación estratégica y una convicción en el actuar que no ha existido.

La planificación territorial requiere evolucionar para facilitar este desarrollo. Los instrumentos tradicionales como planes reguladores intercomunales y comunales resultan insuficientes ante la complejidad de los polos industriales modernos. Se requieren mecanismos innovadores que generen "zonas de innovación" y regulaciones *sandbox* que permitan experimentación controlada. Los planes maestros de inversión (plurianuales) permiten integrar diversas fuentes de financiamiento en coherencia con las estrategias sectoriales, regionales y comunales bajo una visión consensuada con las comunidades. También se pueden considerar las zonas de interés público para la focalización, planificación y gestión de inversión pública y privada para fines de integración social y urbana como herramientas a explorar.

Desde al menos el año 2016 se ha venido perfeccionando la caja de herramientas de planificación y gestión territorial, donde el Proyecto de Ley de Modernización y Fortalecimiento del Sistema de Planificación Territorial<sup>9</sup> busca ampliar las posibilidades de una planificación más adaptativa y de colaboración público-privada. Los convenios de programación público privados junto a nuevas entidades de gestión territorial parecen ser fundamentales en el contexto actual. Pero es necesario aprender de aquellas experiencias que han generado estructuras paralelas a la gestión pública, y buscar modelos de potencien la capacidad del Estado, en particular los gobiernos locales, pero que definan condiciones claras para la convergencia de acciones que involucren al sector privado y las comunidades locales.

Nuevos dispositivos como las Agencias de Financiamiento e Inversión para el Desarrollo serán entidades estatales flexibles y con autonomía financiera destinadas a impulsar la transformación productiva mediante instrumentos de inversión, financiamiento y garantías orientados a innovación, adopción tecnológica y capital de riesgo. Este tipo de organismos podrían aplicarse al desarrollo de complejos industriales y portuarios junto con la modernización de marcos normativos que aborden adecuadamente las actividades peligrosas no contaminantes y orienten la transición energética. Las ciudades relacionadas a zonas productivas y nodos logísticos requieren diseñarse para potenciar estas actividades y asegurar la calidad de vida de los habitantes.

### Captura de valor local: ciudades de excelencia en territorios productivos

El aspecto más crítico de esta transformación es garantizar que los beneficios económicos se traduzcan en desarrollo territorial tangible. Mejillones no puede repetir el modelo de enclaves industriales desconectados del tejido urbano. La visión requiere ser integral: a un polo industrial de clase mundial le corresponde una ciudad de excelencia urbana, a la altura de una región con el mayor ingreso per cápita del país.

Esto implica crear fondos públicos y público-privados que reinviertan los beneficios económicos en desarrollo territorial sostenible. La infraestructura de alto estándar, servicios urbanos de primer nivel y oportunidades laborales calificadas necesitan constituir resultados directos de la actividad industrial. La participación ciudadana requiere transformarse desde consultas formales a modelos de gobernanza participativa donde la comunidad sea socia activa del desarrollo. La exploración de modelos que permitan la captación de ganancias por parte de las comunidades, con cooperativas y/o sociedades mixtas que podrían entregar bases de sustentabilidad al desarrollo nacional y local.

La tecnología constituye un componente fundamental de esta transformación. Por ejemplo, los gemelos digitales urbanos que posibilitan simular escenarios complejos, experimentar soluciones innovadoras y optimizar la gestión territorial en tiempo real ameritan ser explorados. Estos sistemas de gestión integrada, combinando tecnología avanzada y análisis multidimensional, pueden superar la fragmentación institucional que históricamente ha obstaculizado políticas territoriales efectivas.

### Gobernanza multinivel para la transformación territorial

El éxito de esta transición demanda articular eficientemente múltiples variables críticas de gobernanza. La coordinación institucional multinivel requiere alinear objetivos de gobiernos centrales, regionales y locales mediante contratos de desarrollo territorial y sistemas de monitoreo compartido. Esta arquitectura institucional requiere fundamentarse en principios de colaboración creativa más que en jerarquías rígidas.

Los sistemas de gestión integrada inteligente han de combinar regulación, inversión, monitoreo y gestión bajo una visión unificada de desarrollo avanzado. Esto implica superar la dispersión sectorial tradicional donde energía, industria, urbanismo y medio ambiente operan en silos aislados. La integración sistémica es entonces un prerrequisito fundamental para capitalizar efectivamente las oportunidades del hidrógeno verde.

### El imperativo de la innovación productiva

En síntesis, Chile enfrenta una oportunidad sin precedentes para redefinir su inserción en la economía global. El hidrógeno verde puede ser el vector que transforme al país de exportador de materias primas a productor de bienes y servicios de alta complejidad tecnológica. Sin embargo, esta transformación requiere más que infraestructura energética: demanda construir territorios inteligentes donde la innovación, producción y calidad de vida se potencien mutuamente.

Mejillones está llamada a convertirse en el laboratorio de esta transformación, demostrando que es posible crear ciudades de excelencia en contextos industriales avanzados. La abundancia energética renovable requiere traducirse en ecosistemas productivos diversos, desde fábricas de inteligencia artificial hasta *clusters* de tecnología y manufactura avanzada. Solo así Chile podrá capitalizar plenamente sus ventajas comparativas, construyendo un modelo de desarrollo que sea simultáneamente próspero, equitativo y sostenible.

El futuro sostenible del país dependerá de la capacidad colectiva para renovar no solo las tecnologías energéticas, sino fundamentalmente las formas de pensar y construir territorio. El hidrógeno verde es la oportunidad para demostrar que Chile puede liderar la transición hacia una economía del conocimiento, donde la prosperidad económica, la preservación ambiental y el bienestar social no sean objetivos en conflicto, sino dimensiones complementarias de un desarrollo territorial verdaderamente integrado.



## GOBERNANZA MULTINIVEL Y DIMENSIÓN TERRITORIAL PARA EL DESPLIEGUE SUSTENTABLE DEL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

**MARCELO VILLAGRÁN**

Managing Director

Mankuk

Abogado

Pontificia Universidad Católica de Chile<sup>1</sup>

El despliegue del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) como vector energético para la descarbonización del planeta representa una oportunidad histórica para transitar hacia un modelo de desarrollo más sostenible y resiliente. Mejillones, por su ubicación estratégica en la Región de Antofagasta, una región con gran potencial para la producción de energías renovables, su infraestructura instalada, su conexión portuaria y su disponibilidad territorial, ha sido identificada como uno de los polos prioritarios para esta nueva industria y la futura exportación de energías verdes de Chile al mundo (Altman et al., 2022<sup>2</sup>; Cortés Leiss et al., 2023<sup>3</sup>).

Sin embargo, más allá de los factores técnicos y económicos, el despliegue territorial de esta industria plantea desafíos complejos en materia de sustentabilidad, gobernanza y cohesión social. Este breve ensayo sostiene que el éxito de la industria del hidrógeno verde en Mejillones dependerá no solo de desarrollos tecnológicos, sino principalmente de la capacidad del Estado, las empresas y las comunidades locales para construir un modelo colaborativo de gobernanza multinivel, articulado y legítimo, que respete los límites territoriales y promueva el bienestar de sus habitantes.

### El territorio como condición habilitante: variables críticas para Mejillones

El análisis territorial del despliegue del H<sub>2</sub>V requiere superar la visión instrumental del territorio como simple contenedor de infraestructuras, para reconocerlo como una construcción política, ambiental y cultural que condiciona la viabilidad de los proyectos energéticos. En Mejillones confluyen variables críticas que deben ser abordadas desde una perspectiva integrada: la disponibilidad de agua en un contexto de escasez hídrica; los impactos acumulativos sobre ecosistemas marinos y costeros; las tensiones por el uso del suelo entre industrias portuarias, energéticas, pesqueras y asentamientos urbanos; y la tensa relación histórica entre el desarrollo industrial y la

exclusión social de las comunidades locales, que asocian dicho crecimiento con la consolidación de una zona de sacrificio (Sánchez & Cabaña, 2023)<sup>4</sup>.

Como advierte Pino Zúñiga<sup>5</sup>, el hidrógeno verde en Chile ha avanzado rápidamente como política sectorial sin una regulación territorial específica que oriente su despliegue espacial, lo que pone en riesgo la coherencia entre los objetivos climáticos nacionales y las capacidades locales para gestionarlos. La ausencia de instrumentos de planificación territorial vinculantes que regulen adecuadamente la instalación de esta nueva industria -como una zonificación energética con criterios socioambientales o una evaluación ambiental estratégica a nivel regional- limita la capacidad de anticipar y mitigar conflictos territoriales.

### Modelos de gobernanza multinivel: coordinación, legitimidad y descentralización

Frente a este escenario, se vuelve indispensable diseñar e implementar modelos de gobernanza multinivel que integren coherentemente los niveles nacional, regional y local, con mecanismos efectivos de participación y control ciudadano. La gobernanza multinivel no debe entenderse solo como una arquitectura de competencias formales entre niveles de gobierno, sino como una red dinámica de actores públicos, privados y sociales que interactúan para resolver problemas complejos con múltiples escalas de acción. Como señala Alica y Schakel (2025)<sup>6</sup> las decisiones que involucran gobiernos subnacionales (regionales/locales) mejoran la aceptación entre los ciudadanos, lo cual subraya la importancia de mecanismos de participación y control ciudadano en modelos de gobernanza multinivel.

En Chile, la reciente experiencia del “Protocolo de Cooperación” público-privado firmado entre el Gobierno central de Chile, el Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena y la Asociación Gremial H<sub>2</sub>V Magallanes AG para el impulso del hidrógeno verde en Magallanes, más conocido como “Pacto de Magallanes”, constituye un referente interesante. Este acuerdo, firmado en 2023 establece compromisos conjuntos en materia de formación de capital humano, desarrollo de proveedores locales, infraestructura compartida y estándares socioambientales. Si bien se trata aún de un modelo incipiente, ofrece una hoja de ruta para avanzar en co-gobernanza territorial en otras regiones.

### La participación como eje estructurante del co-gobierno territorial

Un elemento central para la legitimidad de cualquier modelo territorial de desarrollo es la participación efectiva de las comunidades locales en la toma de decisiones que afectan su entorno (Bishoge et al., 2020)<sup>7</sup>. En el contexto del H<sub>2</sub>V, esto implica pasar de modelos tradicionales de consulta formal -frecuentemente percibidos como mecanismos meramente procedimentales- hacia esquemas de co-diseño, cogestión y co-beneficio, donde las comunidades tengan capacidad real de incidir en los proyectos desde su etapa temprana de formulación.

Una de las principales preocupaciones de autoridades locales y comunidades es no ser consideradas ni consultadas en el diseño y definición de estrategias que afectan sus territorios. Los impactos positivos de los proyectos se centran por lo general en los beneficios económicos como consecuencia del desarrollo de la industria, sin considerar aspectos centrales que preocupan a los territorios como son la reparación de zonas ya intervenidas, la remediación ambiental, el reconocimiento de pueblos indígenas y sociedad civil, beneficios para las zonas a intervenir, entre otros (Sánchez & Cabaña, 2023)<sup>4</sup>.

### Sustentabilidad, planificación y justicia territorial

La sustentabilidad del H<sub>2</sub>V en Mejillones no puede reducirse a su contribución a la reducción de emisiones globales. Debe evaluarse también en términos de su impacto sobre los sistemas sociales y ambientales locales. Esto requiere herramientas de planificación espacial que permitan ordenar los distintos usos del territorio, favorecer el uso de infraestructuras compartidas para minimizar el impacto de los proyectos, proteger zonas de alto valor ambiental o áreas sensibles, sincerar y concretizar los beneficios locales de la industria y compatibilizar su desarrollo con el mejoramiento de las condiciones actuales del territorio.

Es esencial incorporar desde el inicio criterios de equidad territorial, análisis de escenarios acumulativos y participación ciudadana. Asimismo, la generación de fondos de inversión territorial, directamente vinculados al desarrollo de la industria, podría contribuir a financiar infraestructura social, salud, educación, y fortalecimiento institucional a nivel comunal.

Finalmente, es crucial promover mecanismos de transparencia y trazabilidad de los procesos industriales asociados al H<sub>2</sub>V, para que el hidrógeno producido en Chile no solo sea verde en términos de emisiones, sino también justo en términos sociales. En este contexto, cobra especial relevancia adoptar esquemas de certificación internacional que integren de forma explícita criterios sociales, junto con los ya habituales estándares ambientales, como lo recomiendan diversos estudios (GIZ et al., 2021)<sup>8</sup> que analizaron esquemas de certificación existentes y coinciden en la incorporación progresiva de dimensiones sociales en sus matrices de evaluación.

### Conclusiones

El despliegue del hidrógeno verde en Mejillones representa una oportunidad única para redefinir las relaciones entre el Estado, el sector privado y la sociedad en el territorio. Sin embargo, dicha oportunidad solo podrá materializarse si se adoptan enfoques de gobernanza multinivel y multiactor que integren capacidades técnicas, participación ciudadana y planificación territorial sostenible. Lecciones tanto nacionales como internacionales demuestran que la co-gobernanza efectiva -donde comunidades, empresas y gobiernos diseñan juntos el futuro del territorio- es la clave para evitar los errores del pasado y construir un desarrollo verdaderamente justo y sustentable.

Este objetivo solo será alcanzable mediante la colaboración y articulación entre actores públicos y privados, de todos los sectores y niveles, asegurando que cada parte contribuya desde su rol y conocimiento específico. En este proceso, Mejillones puede y debe liderar, no solo como plataforma energética, sino como laboratorio de gobernanza territorial para una transición energética justa e inclusiva.



## PLAN ESTRATÉGICO PRELIMINAR FUNCIONES Y ZONIFICACIÓN ECOSISTÉMICA DE LA COMUNA DE MEJILLONES

### NatCap Urbano

A continuación se presenta el resumen ejecutivo del "Plan estratégico preliminar funciones y zonificación ecosistémica de la comuna de Mejillones", elaborado por NatCap Urbano en febrero de 2025.

#### Visión estratégica del plan

La comuna de Mejillones, ubicada en la Región de Antofagasta, se sitúa hoy en una encrucijada crítica: transformarse en un polo estratégico del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) sin sacrificar sus activos ecosistémicos ni su patrimonio natural y cultural. El plan estratégico preliminar busca orientar el desarrollo territorial hacia un modelo de sostenibilidad y resiliencia, aplicando la Convención sobre la Diversidad Biológica (la CDB), el Enfoque por Ecosistemas de la CDB, las Metodologías de Capital Natural (NatCap) y los estándares de la de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

#### Fundamentos normativos

Este plan se sustenta legal y constitucionalmente en:

- La ratificación del Convenio sobre la Diversidad Biológica (la CDB), que es parte del sistema jurídico chileno y pilar de las políticas públicas de biodiversidad. Este tratado internacional, en sus conceptos y principios centrales, debe ser entendido como una fuente normativa de rango constitucional, y debe ser aplicado en todo el sistema legal ambiental pues incide, entre otras cosas, en el concepto de "medio ambiente".
- La CDB promueve el enfoque ecosistémico como eje de acción para entender el "medio ambiente" de manera funcional y no meramente de manera estructural (i.e. por componentes). Esto permite conciliar y compatibilizar la conservación de biodiversidad y el uso sostenible, en base a doce principios.

- Los estándares internacionales de la UICN, adoptados por la CDB en su Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas, que sirven como base para clasificar categorías de manejo en diversas zonas de gestión y conservación.
- La aplicación del Protocolo de Capital Natural implementa el Enfoque por Ecosistemas integrando dependencias e impactos ecológicos en la planificación económica y financiera, y, por lo tanto, su adopción permite armonizar decisiones empresariales con metas ambientales.
- La Ley 20.930 sobre el Derecho Real de Conservación, que permite jurídicamente proteger funciones ecosistémicas mediante instrumentos privados vinculantes de conservación.

#### Estructura del informe

El plan se estructura en seis secciones principales:

- 1. Introducción:** presenta el contexto geográfico y ecológico de Mejillones, así como los desafíos y oportunidades que motivan la elaboración del plan.
- 2. Marco conceptual:** define los principios del Enfoque por Ecosistemas, las Metodologías de Capital Natural, y el sustento legal y teórico que los respalda, en concordancia con la CDB y los compromisos internacionales de Chile.
- 3. Marcos internacionales e instrumentos de gestión:** identifica los acuerdos internacionales aplicables (CDB, ODS, Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030), y describe los estándares operativos (UICN, ISO, ASG, taxonomías verdes) que guían la evaluación ambiental y territorial.
- 4. Diagnóstico territorial funcional:** analiza las funciones ecosistémicas claves del territorio, mediante modelación

espacial y evaluación multicriterio, para fundamentar la zonificación ecosistémica.

**5. Zonificación ecosistémica y compatibilidad con la industria del hidrógeno verde:** clasifica el territorio según su fragilidad ecológica, establece usos del suelo compatibles, y propone lineamientos para la instalación de infraestructura H<sub>2</sub>V en armonía con el capital natural.

**6. Conclusiones y recomendaciones:** resume los hallazgos principales y plantea propuestas de gobernanza, planificación y acción estratégica para la implementación efectiva del Plan.

#### Desarrollo detallado de las secciones del informe

##### 1. Introducción: contexto y justificación

El desarrollo industrial acelerado y la presión territorial en Mejillones exigen un enfoque integral que armonice sostenibilidad y crecimiento. El plan nace como respuesta a esa necesidad, reconociendo que el ecosistema costero desértico contiene funciones claves como el secuestro de carbono, la polinización, el refugio para especies y la conexión cultural. La falta de actualización del Plan Regulador Comunal y la expansión inminente del sector H<sub>2</sub>V hacen urgente una intervención técnica basada en ciencia, derechos y participación.

##### 2. Marco conceptual: fundamentos teóricos y normativos

El plan integra:

- El Enfoque por Ecosistemas (la CDB): como modelo rector de gestión ambiental, fundamentado en sus 12 principios, promueve la participación social, la visión de largo plazo, y la interdependencia entre los componentes bióticos, abióticos y sociales.
- El Enfoque de Capital Natural: reconoce a la naturaleza como activo económico que debe ser mantenido y restaurado para garantizar flujos de servicios y bienestar.
- La legislación chilena, como la Ley 20.930 y el SEA, requiere adaptarse a estos nuevos paradigmas de conservación funcional y estructural.

##### 3. Marcos internacionales e instrumentos de gestión

Además de la CDB, se incorporan los ODS, la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA), el Marco de Sendai y otros acuerdos que exigen integración entre biodiversidad y desarrollo. Se sistematizan instrumentos como:

- UICN y su tipología de manejo de áreas protegidas.
- Taxonomías verdes y criterios Ambientales, Sociales y de Gobernanza (ASG), que permiten canalizar inversiones sostenibles.
- Normas ISO 37120, 37122, 37123, orientadas a ciudades resilientes y sostenibles.

##### 4. Diagnóstico territorial funcional

Se identifican y mapean cuatro funciones ecosistémicas:

- Secuestro de carbono: se concentra en la península y laderas vegetadas, con posibilidad de restauración en zonas urbanas.
- Polinización: basada en especies como *Nolana* spp., es dependiente de la camanchaca y topografía.
- Hábitat y refugio: clave para especies amenazadas como el pingüino de Humboldt; requiere mantener corredores ecológicos.
- Dimensión cultural: arqueología, ecoturismo y memoria territorial; se enfatiza compatibilidad con proyectos industriales.

##### 5. Zonificación ecosistémica

Basada en un enfoque funcional, se proponen cinco categorías de fragilidad que orientan el uso del suelo:

- Alta prioridad: conservación estricta y restauración.
- Media-alta: uso condicionado y con mitigación.
- Media: desarrollo con compensación ambiental.
- Media-baja: desarrollo monitoreado.
- Fragilidad mínima: preferente para infraestructura industrial con control ambiental.

##### 6. Compatibilidad con la industria del hidrógeno verde

La propuesta busca zonas donde la instalación de infraestructura de H<sub>2</sub>V pueda evitar impactos severos y maximizar sinergias:

- Incentiva restaurar áreas degradadas urbanas.
- Establece buffers ecológicos en torno a enclaves de biodiversidad.
- Propone evitar SPC (sitios potencialmente contaminantes) y áreas de riesgo geológico como tsunamis.

## 7. Propuesta de gobernanza y articulación institucional

Se promueve una gobernanza multinivel:

- Comité de Gestión Territorial con representación pública, privada y ciudadana.
- Uso de plataformas de datos abiertos para monitoreo ambiental.
- Enlace con bancos de desarrollo e inversionistas verdes.
- Inclusión de organizaciones comunitarias.

### Conclusiones y recomendaciones

- El desarrollo industrial en Mejillones debe ajustarse a una planificación normativa funcional basada en el Enfoque por Ecosistemas de la CDB.
- La actualización del Plan Regulador Comunal puede y debe integrar la zonificación ecosistémica propuesta, ajustando distintas categorías normativas de la Ley de Urbanismo y Construcciones para facilitar esta implementación.
- La evaluación de impacto ambiental puede y debe aplicar e implementar el Enfoque por Ecosistemas de la CDB.
- La incorporación del Enfoque por Ecosistemas, criterios ASG y categorías UICN al diseño de políticas públicas y proyectos privados, son altamente recomendadas y crecientemente requeridas para viabilizar proyectos y reducir riesgos regulatorios, sociales y ambientales.

### Hoja de ruta: plan de acción potencial

1. Instalación del Comité de Gobernanza Territorial en coordinación con el municipio y el SEA.
2. Revisión técnica y jurídica del Plan Regulador Comunal, integrando la zonificación funcional.
3. Capacitación multisectorial en enfoque ecosistémico y metodologías de capital natural.
4. Firma de convenios con universidades y centros de investigación para asegurar monitoreo y generación de datos.
5. Diseño de mecanismos de compensación y financiamiento verde, incluyendo bonos de carbono y pagos por servicios ecosistémicos.
6. Establecimiento de pilotos demostrativos de restauración ecológica y proyectos de H<sub>2</sub>V compatibles.
7. Actualización normativa local, incluyendo ordenanzas que protejan áreas de alta fragilidad y patrimonio cultural.

## 3.3 DIMENSIÓN CADENA DE VALOR CENTRAL DE LA INDUSTRIA H<sub>2</sub>V

El desarrollo del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) como industria emergente depende no solo de la disponibilidad de recursos energéticos renovables, sino también de la capacidad de articular una cadena de valor integrada que conecte generación, transformación, logística y usos finales. En este sentido, el H<sub>2</sub>V debe entenderse como un sistema industrial complejo en el que convergen múltiples eslabones tecnológicos, productivos y comerciales, cuya coordinación resulta determinante para asegurar viabilidad técnica, eficiencia económica y competitividad internacional. La configuración de esta cadena de valor constituye, por tanto, uno de los elementos centrales para transformar el potencial energético en una industria capaz de generar valor económico y encadenamientos productivos sostenibles.

En términos generales, la cadena de valor del hidrógeno verde se estructura en torno a tres grandes segmentos: el *upstream*, asociado a la generación de energía renovable y producción de hidrógeno mediante electrólisis; el *midstream*, que comprende el almacenamiento, conversión y transporte del hidrógeno o de sus derivados -como amoníaco, metanol o combustibles sintéticos-; y el *downstream*, vinculado a su utilización en sectores industriales, energéticos o de movilidad. Cada uno de estos eslabones implica desafíos tecnológicos, regulatorios y de inversión específicos, así como la necesidad de desarrollar infraestructura habilitante, estándares de seguridad, sistemas de certificación y mecanismos de articulación entre actores públicos y privados.

Desde una perspectiva estratégica, la consolidación de esta cadena de valor no solo determina la factibilidad de los proyectos individuales, sino que también define el posicionamiento de los países en la economía global del hidrógeno. En el caso de Chile, el desafío radica en avanzar desde una ventaja comparativa basada en recursos naturales hacia la construcción de una plataforma industrial capaz de capturar mayor valor agregado.

Esto supone fortalecer capacidades locales en ingeniería, manufactura, servicios especializados, operación y mantenimiento, así como promover encadenamientos productivos que integren a proveedores nacionales en las distintas etapas del proceso.

En este contexto, la dimensión de la cadena de valor central permite analizar los sectores y actividades que participan directamente en la producción, transformación y comercialización del hidrógeno verde y sus derivados, identificando los principales cuellos de botella, oportunidades de innovación y modelos de negocio emergentes. Asimismo, esta dimensión examina los factores que condicionan la escalabilidad de la industria -infraestructura logística, mercados de demanda, certificación internacional, financiamiento y desarrollo de talento-, con el objetivo de comprender cómo estos elementos interactúan para configurar un ecosistema productivo competitivo y sostenible en el largo plazo.



## TRANSICIÓN ENERGÉTICA GLOBAL

### FRANCISCO BELMAR

Profesor Adjunto

Departamento Ingeniería en Minería

Pontificia Universidad Católica de Chile

La transición energética global no es un proceso lineal ni monolítico. Por el contrario, se trata de una transformación compleja que requiere la coexistencia de múltiples soluciones tecnológicas, adaptadas a contextos específicos, usos finales diferenciados y realidades territoriales diversas. En este escenario, el hidrógeno no debe entenderse como la solución única al desafío de la descarbonización, sino como una herramienta más dentro de un portafolio amplio de opciones bajas en emisiones, cuyo valor real emerge cuando se analiza con rigurosidad dónde es efectivamente competitivo frente a otras alternativas.

Durante los últimos años, buena parte del debate público y técnico se ha centrado en comparar tecnologías -hidrógeno versus baterías, hidrógeno versus biocombustibles- muchas veces desde una lógica binaria que poco contribuye a acelerar la transición. Este enfoque no solo genera desgaste innecesario, sino que además desvía la atención del problema central: identificar los casos de uso concretos donde cada tecnología presenta ventajas relativas claras, considerando variables técnicas, económicas, operacionales y sistémicas.

En este contexto, el transporte logístico pesado -particularmente el transporte de carga por camión de larga distancia- aparece como uno de los segmentos donde el hidrógeno puede jugar un rol relevante. Y Chile, dadas sus características geográficas, productivas y energéticas, reúne condiciones singulares para desarrollar tempranamente esta industria.

Chile es un país largo y angosto, con más de 4.300 kilómetros de extensión norte-sur y una infraestructura logística fuertemente dependiente del transporte terrestre. A diferencia de otras economías donde el transporte ferroviario juega un rol predominante, en Chile los camiones son la columna vertebral de la conectividad económica, tanto para el abastecimiento interno como para la articulación de cadenas de exportación.

Esta realidad impone desafíos específicos. Una fracción relevante del transporte de carga debe recorrer largas distancias, muchas veces superiores a los 800 ó 1.000 kilómetros, conectando centros productivos con puertos, faenas mineras con plantas de procesamiento, o regiones extremas con los principales polos de consumo. En estos trayectos, las limitaciones actuales de las baterías eléctricas se vuelven evidentes: tiempos de carga prolongados, pérdida de carga útil por peso de las baterías y restricciones de autonomía que afectan la operación logística<sup>1</sup>.

Es precisamente en este tipo de aplicaciones donde el hidrógeno comienza a mostrar ventajas comparativas. Los camiones a hidrógeno permiten tiempos de repostaje similares al diésel y autonomías comparables o superiores, manteniendo una operación continua compatible con las exigencias del transporte de larga distancia. Esto no implica que el hidrógeno reemplace al transporte eléctrico a baterías en todos los segmentos, sino que ambas tecnologías pueden coexistir, atendiendo nichos distintos dentro del mismo sector.

Más allá del caso de uso, el potencial del hidrógeno en el transporte logístico chileno está estrechamente vinculado a la capacidad del país para producir hidrógeno a costos competitivos. En este ámbito, Chile presenta ventajas estructurales ampliamente reconocidas a nivel internacional, particularmente en la zona norte del país.

El Desierto de Atacama cuenta con uno de los mayores niveles de radiación solar del mundo, lo que permite factores de planta fotovoltaicos significativamente superiores al promedio global. Esto se traduce en costos de generación eléctrica renovable bajos y estables, un insumo crítico para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis. Diversos estudios proyectan que, bajo escenarios de madurez tecnológica y economías de escala, Chile podría situarse entre los productores de hidrógeno más competitivos del mundo en términos de costo<sup>2</sup>.

Esta ventaja adquiere especial relevancia cuando se analiza el transporte de carga en el norte de Chile. Se trata de una macrozona altamente dependiente de la logística terrestre, con grandes volúmenes de carga asociados a la minería, la energía y la industria, y con distancias extensas entre centros productivos, puertos y ciudades. En este contexto, producir hidrógeno localmente para abastecer flotas de camiones no solo reduce emisiones, sino que también puede disminuir la dependencia de combustibles importados y mejorar la resiliencia energética del sistema.

Uno de los elementos más atractivos del desarrollo del hidrógeno en el transporte logístico chileno es su potencial de integración con industrias ya existentes, particularmente la minería. Chile es el principal productor de cobre del mundo, y esta industria no solo es intensiva en energía, sino también en transporte: transporte de insumos, de mineral, de concentrado y de productos finales hacia los puertos.

La introducción progresiva de camiones a hidrógeno en estas cadenas logísticas permite abordar la descarbonización desde una perspectiva sistémica. No se trata únicamente de reducir emisiones en el transporte terrestre, sino de articular un ecosistema energético-industrial donde la producción de hidrógeno pueda servir múltiples usos: movilidad pesada, procesos térmicos, e incluso la producción de combustibles sintéticos para el transporte marítimo.

En este sentido, el hidrógeno abre la puerta a pensar la descarbonización del cobre más allá de la faena minera. El transporte marítimo de concentrado o de cobre refinado, por ejemplo, podría en el futuro incorporar combustibles derivados del hidrógeno, como amoníaco o metanol, generando una continuidad entre la logística terrestre y marítima. Estas sinergias aumentan la escala de demanda potencial y mejoran las condiciones económicas para el despliegue de infraestructura. Es innegable que, en la actualidad, el hidrógeno sigue siendo más costoso que el diésel. Sin embargo, esta comparación suele omitir un elemento fundamental: las externalidades asociadas al uso de combustibles fósiles. El diésel no internaliza adecuadamente los costos ambientales, sanitarios y climáticos que genera su combustión, lo que distorsiona las señales económicas y retrasa la adopción de alternativas más limpias.

Incorporar progresivamente estas externalidades, ya sea mediante impuestos al carbono, estándares de emisiones o mecanismos regulatorios, no busca penalizar arbitrariamente al diésel, sino corregir una falla de mercado histórica. En ese escenario, el hidrógeno comienza a mostrar una competitividad relativa mucho mayor, especialmente en aplicaciones donde las

alternativas eléctricas no son viables técnica u operacionalmente. El desarrollo del hidrógeno en el transporte logístico no ocurrirá de manera inmediata ni masiva. Requiere inversión en infraestructura de producción, almacenamiento y repostaje, adaptación de flotas, capacitación de capital humano y marcos regulatorios adecuados. Sin embargo, esto no debe entenderse como una barrera, sino como un proceso natural de aprendizaje y escalamiento.

Chile tiene experiencia en este tipo de transiciones graduales. El despliegue de energías renovables no convencionales en la última década siguió una trayectoria similar: pilotos iniciales, altos costos relativos, escepticismo y, finalmente, una rápida reducción de costos acompañada de adopción masiva. El hidrógeno, en particular en el transporte pesado, puede seguir una lógica análoga si se focaliza correctamente en los casos de uso más promisorios desde el inicio.

Desarrollar el uso del hidrógeno en el transporte logístico pesado en Chile no es una apuesta ideológica ni una carrera por imponer una tecnología sobre otra. Es, ante todo, una oportunidad estratégica basada en las características reales del país: su geografía, su matriz productiva, su potencial energético y la relevancia estructural del transporte por camión.

Entender al hidrógeno como parte de un portafolio de soluciones, y no como un fin en sí mismo, permite enfocar los esfuerzos donde realmente agrega valor. En el caso chileno, los trayectos de larga distancia, la integración con la minería y la posibilidad de producir hidrógeno a costos competitivos configuran un escenario donde esta tecnología puede tener un rol relevante y sostenible en el tiempo.

La experiencia internacional muestra que los avances más significativos en hidrógeno para transporte pesado no han surgido de esperar que el mercado resuelva espontáneamente el dilema del "huevo o la gallina", sino de esquemas deliberados de desarrollo simultáneo de oferta y demanda. En regiones como Renania del Norte-Westfalia, en Alemania, el despliegue de corredores logísticos de hidrógeno se ha basado en la existencia de demandas ancla industriales y de transporte previamente comprometidos, junto con inversión pública en infraestructura compartida, reduciendo el riesgo para productores y operadores de flotas<sup>3</sup>. De forma similar, en California, la combinación de regulación ambiental estricta, subsidios a la producción y mandatos de flotas cero emisiones han creado una señal de demanda suficientemente robusta para gatillar inversiones privadas en producción y estaciones de repostaje, especialmente en torno a puertos y corredores logísticos estratégicos<sup>4</sup>.



## SECTORES ENERGÉTICOS Y DERIVADOS H<sub>2</sub>V

### ELODIE BLANCO

Profesor Asistente

Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción

Pontificia Universidad Católica de Chile

Uno de los aspectos clave para el desarrollo del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) en Chile es su uso final. Actualmente, el principal destino del hidrógeno a nivel global es la producción de amoníaco, un insumo esencial para la fabricación de fertilizantes. Esta realidad explica la alta concentración de proyectos en evaluación orientados a la producción de amoníaco verde, especialmente desde que se identificó el alto potencial de Chile para generar H<sub>2</sub>V a partir de fuentes renovables. Proyectos como el HNH Energy en Magallanes y el proyecto Volta en Mejillones son ejemplos de esta tendencia, con capacidades proyectadas de hasta 1,3 millones de toneladas anuales de amoníaco verde, utilizando energía solar o eólica y agua desalinizada.

Por otra parte, se proyecta una expansión significativa del mercado del H<sub>2</sub>V como vector energético. El hidrógeno posee una alta densidad energética: 1 kg. de H<sub>2</sub> puede generar aproximadamente tres veces más energía que 1 kg. de diésel, lo que lo posiciona como un candidato prometedor para reemplazar combustibles fósiles en sectores difíciles de electrificar. Esta visión fue anticipada por Julio Verne en “La isla misteriosa”, donde profetizó: “Sí, mis amigos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de lo que está formada, usados por separado o en forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] El agua será el carbón del futuro”.

En el ámbito energético, el H<sub>2</sub>V puede utilizarse para almacenar excedentes de electricidad generados durante las horas de mayor radiación solar, permitiendo su posterior conversión en electricidad mediante celdas de combustible. Asimismo, el H<sub>2</sub>V puede emplearse como insumo para la síntesis de combustibles sintéticos, como e-metanol, e-gasolina o e-diésel, mediante la combinación de H<sub>2</sub>V con CO<sub>2</sub> capturado. El proyecto Haru Oni en Magallanes es pionero en este ámbito, produciendo

e-combustibles para exportación a Europa y Estados Unidos, en colaboración con empresas como Porsche y Siemens Energy.

#### Almacenamiento de H<sub>2</sub>V y/o derivados

El almacenamiento del H<sub>2</sub>V constituye un desafío técnico fundamental para su despliegue a gran escala. Dado que el hidrógeno es el elemento más ligero y pequeño de la tabla periódica, su confinamiento implica riesgos asociados a fugas, fragilización de materiales y reacciones químicas no deseadas. Por ejemplo, su carácter reductor puede inducir fragilidad y formación de ampollas en cilindros de acero, lo que exige el uso de materiales avanzados y recubrimientos especializados.

Actualmente, la tecnología más extendida es el almacenamiento como gas comprimido, aunque también se emplea el almacenamiento criogénico como líquido, que requiere temperaturas cercanas a los -253°C y presenta pérdidas por evaporación. En los últimos años, han emergido alternativas como los líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHC), que permiten transportar el hidrógeno de forma más segura y eficiente a largas distancias. Esta tecnología requiere infraestructura específica en los puertos de exportación e importación, incluyendo plantas de hidrogenación y deshidrogenación. Japón ha sido pionero en demostrar la factibilidad técnica de esta solución.

Otra estrategia que se encuentra todavía en vía de investigación es el uso de materiales porosos para confinar efectivamente el H<sub>2</sub>. En un trabajo reciente, hemos observado que llenando un tanque con carbono activado era posible almacenar 4,2 veces más de H<sub>2</sub>V que con un tanque vacío. Ese método tiene un alto potencial de aplicación, pero para poder aplicarse a mayor escala -un desafío técnico al cual nos enfrentamos actualmente- se debe optimizar la evacuación del calor generado durante ese proceso.

Finalmente, existe una opción de almacenamiento en sitio, que es el almacenamiento subterráneo en cavernas de sal. Estudios recientes, como el desarrollado por la Universidad de Chile en el Salar de Atacama, han demostrado que las formaciones salinas de la Región de Antofagasta presentan condiciones geológicas favorables para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Esta tecnología, ya probada en países como Alemania, ofrece ventajas en términos de capacidad, seguridad y costos operacionales a largo plazo, sobre todo para almacenar el H<sub>2</sub>V previo a su exportación.

El almacenamiento sigue siendo uno de los principales cuellos de botella para la masificación del H<sub>2</sub>V. Según estudios técnicos, los costos asociados al almacenamiento y transporte pueden representar más del 50% del costo total del hidrógeno verde. Esta barrera económica limita su competitividad frente a otras fuentes energéticas. Aunque se proyecta una reducción de costos hacia 2030 gracias a avances tecnológicos y economías de escala, es fundamental acelerar la inversión en investigación y desarrollo, así como en infraestructura, para garantizar un despliegue eficiente, seguro y sostenible del H<sub>2</sub>V en Chile.



## FELIPE GIVOVICH

Socio principal  
QA Consultores

# SI NO ES EN MEJILLONES, EN NINGUNA PARTE

El ajuste de expectativas en el mercado del hidrógeno verde ha sido drástico. Las condiciones de mercado actuales no son compatibles con “premios” especiales y varias de las empresas que estaban desarrollando proyectos de hidrógeno verde han abandonado o suspendido sus proyectos. Las decisiones recientes de empresas como Total Energies, Exxon, Equinor, British Petroleum, AES Andes y Shell, junto a la alerta que han levantado varios de los fabricantes de electrolizadores hacen evidente que, en las condiciones actuales, el hidrógeno verde no es garantía de rentabilidad.

Como cualquier negocio de gran escala, un proyecto de hidrógeno o amoníaco verde requiere sortear varios obstáculos. Permisos, demanda y financiamiento son los centrales y, en todos estos, el hidrógeno verde ha enfrentado más problemas de los previstos.

Tratándose de permisos, la disposición favorable que enfrentaron los primeros proyectos en Chile y el mundo se ha diluido por completo. Hoy, las renovables son percibidas como cualquier energía “tradicional” y son el nuevo blanco de la “industria de oposición ambiental”. Proyectos eólicos y fotovoltaicos, antes celebrados, hoy son fuente inagotable de sospechas y posibles riesgos, que nunca son sopesados con los evidentes beneficios en las emisiones de gases de efecto invernadero.

En cuanto a la demanda, los problemas son aún mayores. A excepción de algunos proyectos en Japón, no existen infraestructuras o compromisos que permitan anticipar las demandas a firme que se preveían hace unos años, y sin ese compromiso, el financiamiento parece una quimera.

Pero no todo es negativo. El hidrógeno verde, en sus distintos formatos, es la única fuente capaz de reemplazar a los combustibles fósiles en actividades alejadas de la red eléctrica de alta demanda energética. En este contexto, el cumplimiento

de largo plazo de las metas de emisiones pasa por el desarrollo de la industria. Esta condición no ha cambiado. No será tan rápido ni tan intenso como se preveía hace unos años, pero la necesidad se mantiene.

En este marco, Chile, y Mejillones en particular, siguen presentando atributos únicos. El costo nivelado de la energía solar en el norte de Chile es de los más bajos del mundo. Además, Mejillones cuenta con una reconocida vocación industrial y una infraestructura portuaria consolidada. Se agrega a lo anterior, el acceso directo al mercado de la gran minería que, tarde o temprano, se verá obligada a dar el paso e incorporar el hidrógeno verde para reemplazar el combustible fósil en alguno de sus procesos productivos.

En este contexto, la aprobación del proyecto Volta en diciembre de 2025 es una excelente noticia. Es el primer proyecto de escala industrial que cuenta con permisos para comenzar su construcción que, si todo transcurre como se preveía, debiese iniciar en el año 2027. Con una escala amplia, pero “humana”, parece adecuarse a las necesidades del mercado internacional que, aunque mucho más despacio de lo previsto, requerirá de proyectos eficientes como los que permiten las condiciones del Norte Grande.

¿Qué más puede hacer Mejillones? Lo único que controlamos como región o país es facilitar el desarrollo de los negocios tramitando permisos de manera eficiente: cuidando del medioambiente, pero también resguardando que los plazos y costos no se extiendan más allá de lo razonable. A partir de ello, Mejillones y el Norte Grande estarán listos para todo: hidrógeno verde cuando la demanda internacional se consolide, o cualquier proyecto que requiera fuentes renovables de bajo costo.



## MEJILLONES FRENTE AL HIDRÓGENO VERDE: APOSTAR POR TECNOLOGÍA AVANZADA, EFICIENCIA E INTEGRACIÓN TÉRMICA

### FELIPE HUERTA

Profesor Asistente

Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos  
Pontificia Universidad Católica de Chile

Todas las vías de producción de hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) requieren un suministro de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables a un electrolizador para convertir agua en H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Las energías renovables con mayor participación en la matriz energética nacional y menor intensidad de misiones en ciclo de vida son las energías solar y eólica. Sin embargo, presentan el desafío de la intermitencia en energética, pues sólo hay energía solar cuando hay sol y energía eólica cuando hay viento. Por ello, toda planta de H<sub>2</sub>V y derivados necesita una tecnología de almacenamiento de energía que permita su operación continua. Sin almacenamiento de energía, existirían períodos sin generación de hidrógeno, subutilizando la infraestructura instalada y tensionando financieramente la planta. A esto se suma el reto del almacenamiento del H<sub>2</sub>, que por su baja densidad de 82,4 g. por m<sup>3</sup> a 1 atm. y 25°C requiere altas presiones de entre 250 a 450 bar para su almacenamiento en estado gaseoso.

En Chile, la publicación de la Estrategia Nacional de H<sub>2</sub>V en 2020 produjo un gran interés por masificar su producción. Dentro de los múltiples proyectos que se encuentran en distintas fases de tramitación, los de amoníaco verde han llegado a la decisión final de inversión por su rentabilidad económica. La Región de Antofagasta, y, en particular el Puerto de Mejillones, cuentan con una ventaja competitiva a nivel mundial al poseer alta radiación solar y una industria madura de minería. Un ejemplo es el proyecto Volta MAE en Mejillones, que busca producir 600 kilotoneladas de amoníaco verde al año apoyado por un parque solar de 600 MW con una inversión de USD 2.500 millones<sup>1</sup>. Este proyecto actualmente se encuentra ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Chile.

Por una parte, la escala estratégica del proyecto Volta MAE ayudará a posicionar a Chile en la economía del hidrógeno. Por otra, las tecnologías propuestas para la electrólisis, almacenamiento de energía y almacenamiento de hidrógeno son conservadoras, de corriente principal y no generan un valor agregado en términos de propiedad intelectual o industrial. Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) incluidos en el proyecto no siempre maximizan eficiencia ni integración térmica a escala de complejo químico. Estos electrolizadores alcanzan eficiencias de entre un 60%-70%, y su costo de capital es alto por la necesidad de incluir catalizadores de platino en los electrodos porosos de los electrolizadores. Una alternativa mucho más riesgosa, ambiciosa y potencialmente transformadora sería utilizar un electrolizador de óxido sólido (SOEC, sus siglas en inglés).

Los electrolizadores de óxido sólido (SOEC) operan a alta temperatura y, cuando hay calor residual disponible, logran eficiencias de entre un 80% a 90%. Además, los electrodos de la celda son cerámicos de un costo mucho menor que los electrodos de un electrolizador PEM. La principal barrera es su nivel de desarrollo tecnológico temprano (TRL-8), que está limitado por la necesidad de aumentar la vida útil de la planta. No obstante, se espera que muy pronto la tecnología madure. Los casos de éxito de los SOEC a escala de demostración industrial se multiplican por el mundo: el proyecto GrInHy2.0 en Salzgitter, Alemania, consiste en integrar un SOEC de 720 kW acoplado al calor residual de una planta siderúrgica para producir H<sub>2</sub>V para procesos de recocido<sup>2</sup>. La eficiencia eléctrica de esta planta alcanzó 84% LHV.

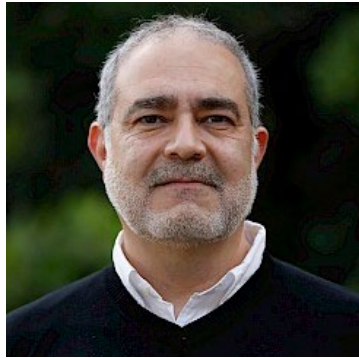
Más recientemente, la integración de un SOEC en una refinería con el arranque del proyecto MultiPLHY de 2,6 MW de potencia en Rotterdam confirma la tesis de electrólisis asistida por vapor/calor industrial<sup>3</sup>. El sistema opera a 850°C, consta de doce módulos y produce más de 60 kg. H<sub>2</sub>/h con eficiencias presentes y proyectadas de 84% y 89%, respectivamente. Para Mejillones, existen fuentes térmicas dentro de plantas Haber-Bosch (síntesis de amoníaco), plantas de ácido nítrico/amonio (ENAEX) y ácido sulfúrico en metalurgia. Estas fuentes podrían proveer vapor y agua caliente para precalentar o evaporar la corriente de agua que ingresa al SOEC, reduciendo consumo eléctrico y OPEX.

Otra oportunidad de innovación tecnológica se encuentra en las tecnologías de almacenamiento de energía. El proyecto Volta MAE H<sub>2</sub> incluye un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS). Los BESS de ion litio han sido la solución dominante por madurez tecnológica y bajo costo. Sin embargo, la instalación de grandes baterías en climas desérticos requiere una mayor refrigeración, un manejo correcto del polvo y una mitigación de riesgos por operación a altas temperaturas. Por esta razón, es importante diversificar el portafolio de tecnologías de almacenamiento de energía a nivel nacional. Este es un excelente ejemplo de cómo la industria del hidrógeno verde puede impulsar el desarrollo tecnológico en el área de almacenamiento de energía. Esto es muy relevante considerando la magnitud de los vertimientos de energía, que solo en enero 2025 alcanzaron los 710,5 GWh, equivalentes a 23,1% de la generación renovable de ese mes.

Una opción que actualmente tiene un menor impacto ambiental, pero actualmente un mayor costo y menor eficiencia, es el almacenamiento de energía por aire líquido (LAES). Se ha postulado recientemente que la integración de esta tecnología a fuentes adicionales de frío y calor puede elevar su eficiencia desde un 50% hasta un 90%<sup>4</sup>. En particular, la reutilización de las temperaturas criogénicas en la unidad de separación de aire necesaria para la síntesis de amoníaco tiene el potencial de reducir los costos de operación e inversión de plantas LAES en un 38% y 11,3%, respectivamente<sup>5</sup>.

En cualquier planta y cadena de suministro de H<sub>2</sub>V, el almacenamiento de hidrógeno es una de las etapas más desafiantes y existen múltiples alternativas al almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido. El hidrógeno se puede almacenar como H<sub>2</sub> líquido criogénico, donde alcanza una densidad de 886 veces mayor que su almacenamiento gaseoso a la misma presión. Esto requiere temperaturas criogénicas de -252.3°C y un complejo ciclo de licuefacción. Sin embargo, esta opción se vuelve más competitiva en comparación al hidrógeno comprimido en la medida que la escala del tanque de almacenamiento aumenta. Las tecnologías de almacenamiento físico de hidrógeno en hidruros metálicos o adsorbentes porosos permiten aumentar la densidad volumétrica de hidrógeno en comparación al almacenamiento comprimido a la misma presión. Estas tecnologías son más económicas y simples que el H<sub>2</sub> líquido criogénico, pero la mejora en densidad de energía es más modesta.

Considerando todas estas oportunidades de innovación tecnológica, Chile enfrenta no solo un desafío, sino una responsabilidad histórica: transformar su potencial energético en propiedad intelectual y soluciones industriales propias. No existe una única respuesta al complejo problema del hidrógeno verde y su infraestructura; la combinación óptima de tecnologías dependerá de las sinergias locales entre calor residual, recursos naturales y capacidades industriales. Esta complejidad representa una oportunidad única para la investigación interdisciplinaria, el desarrollo tecnológico y la colaboración público-privada. Con una inversión decidida en ciencia aplicada, vínculos sólidos entre universidades e industria, y un Estado que actúe como catalizador, Chile puede construir la mitad del camino hacia el liderazgo global en hidrógeno verde. La otra mitad depende de las voluntades: trabajadores, estudiantes, académicos, empresarios y autoridades. Si logramos alinear estos esfuerzos, Mejillones no será solo un punto de producción, sino una plataforma de innovación, donde la ciencia y la ingeniería chilena se conviertan en motores de una transición energética justa, soberana y sostenible.



## EL AMONIACO Y EL METANOL VERDE COMO VECTORES DEL HIDRÓGENO: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA MEJILLONES

### MAURICIO ISAACS

Profesor Titular

Facultad de Química y Farmacia

Pontificia Universidad Católica de Chile

Director

Instituto Milenio MIGA

El hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) se ha consolidado como una de las piezas fundamentales de la transición energética global. Su capacidad para almacenar energía proveniente de fuentes renovables y su versatilidad para descarbonizar industrias intensivas en emisiones lo posicionan como un actor clave para alcanzar el carbono neutralidad. Sin embargo, su almacenamiento y transporte representan un desafío técnico y económico relevante. Debido a su baja densidad y alta reactividad, el hidrógeno requiere de infraestructuras costosas y exigentes para su manejo seguro.

En este contexto, los vectores químicos del hidrógeno, tales como el amoníaco (NH<sub>3</sub>) y el metanol (CH<sub>3</sub>OH), han adquirido protagonismo como alternativas para almacenar y transportar el hidrógeno de manera más eficiente y estable. En este texto se abordan ambas opciones, de manera general, con especial énfasis en su aplicabilidad al contexto territorial de Mejillones, una zona portuaria estratégica para el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados.

El amoníaco verde se obtiene a partir de hidrógeno producido mediante electrólisis y nitrógeno capturado del aire, utilizando energía renovable. Este proceso, potencialmente conocido como Haber-Bosch verde, transforma una tecnología centenaria en un componente esencial de la nueva economía del hidrógeno.

A diferencia del hidrógeno puro, el amoníaco posee una alta densidad energética volumétrica, lo que permite transportarlo y almacenarlo de manera más eficiente. Puede mantenerse en estado líquido a -33°C o a presiones moderadas, y su manejo industrial está ampliamente dominado debido a su uso histórico en la producción de fertilizantes. Estas condiciones hacen que la inversión inicial para su transporte sea considerablemente menor que la requerida para el hidrógeno líquido o comprimido.

Además, el amoníaco puede transportarse en buques diseñados para este propósito, aprovechando la infraestructura portuaria existente. Esto resulta especialmente atractivo para regiones como Mejillones, que ya dispone de instalaciones industriales y portuarias de gran escala, además de acceso directo a fuentes solares de alta radiación. Así, la zona podría transformarse en un *hub* energético internacional, dedicado a la producción y exportación de amoníaco verde hacia Asia y Europa.

No obstante, el amoníaco también presenta desventajas relevantes que deben considerarse en su adopción. En primer lugar, se trata de un compuesto tóxico y corrosivo, cuya manipulación requiere altos estándares de seguridad para evitar fugas o exposición, especialmente en zonas portuarias o urbanas cercanas. Asimismo, el proceso de reconversión del amoníaco a hidrógeno (mediante cracking, electrólisis o reformado) demanda una cantidad considerable de energía, lo que puede reducir la eficiencia global del ciclo. Finalmente, su olor penetrante y riesgo ambiental en caso de derrames suponen desafíos regulatorios y de aceptación social que deben ser abordados con protocolos estrictos. Aun así, las ventajas logísticas y la madurez tecnológica del amoníaco verde superan sus limitaciones en contextos de exportación masiva. Su escalabilidad, su compatibilidad con infraestructura existente y su capacidad para integrarse en múltiples aplicaciones energéticas lo consolidan como el vector más prometedor para el almacenamiento y transporte de hidrógeno verde a gran escala, especialmente en zonas industriales costeras como Mejillones.

El metanol verde (CH<sub>3</sub>OH) es otro de los vectores químicos propuestos para almacenar y transportar hidrógeno. Se produce combinando hidrógeno verde con dióxido de carbono capturado (CO<sub>2</sub>) en un proceso catalítico. De esta forma, permite

reutilizar CO<sub>2</sub> residual de procesos industriales, ofreciendo un doble beneficio ambiental: la captura de carbono y la creación de un combustible líquido limpio.

A primera vista, el metanol presenta ventajas operativas relevantes. Es líquido a temperatura ambiente, lo que facilita su manipulación, almacenamiento y transporte sin necesidad de presiones ni temperaturas extremas. Su infraestructura logística ya existe a escala global, al igual que la del NH<sub>3</sub>, ya que se emplea como materia prima en la industria química. En comparación con el amoníaco, el metanol presenta menores riesgos de toxicidad directa y mayor compatibilidad con motores y sistemas de combustión existentes, lo que facilita su adopción en el corto plazo.

Sin embargo, el metanol también presenta desventajas significativas cuando se le considera como vector de almacenamiento de hidrógeno. Su contenido de hidrógeno por unidad de masa es menor que el del amoníaco, reduciendo su eficiencia en términos de densidad energética. Además, el metanol contiene carbono en su estructura, lo que implica que, al ser utilizado como combustible, libera nuevamente CO<sub>2</sub>. Esto limita su potencial de descarbonización total frente a vectores libres de carbono, como el amoníaco.

Otra limitación importante radica en la dependencia de una fuente estable de CO<sub>2</sub> capturable para su síntesis. En zonas como Mejillones, donde la industria minera y energética está en proceso de descarbonización, la disponibilidad de CO<sub>2</sub> residual podría disminuir, afectando la sostenibilidad del proceso. Finalmente, la eficiencia global del ciclo metanol-hidrógeno aún se encuentra por debajo de los umbrales comerciales esperados para la próxima década, lo que restringe su competitividad como vector de largo plazo.

Desde una perspectiva territorial, el metanol verde podría complementar al amoníaco en etapas iniciales, especialmente en el transporte marítimo o en aplicaciones industriales donde su compatibilidad técnica ofrezca ventajas operativas. Sin embargo, su menor densidad energética y su naturaleza carbonada limitan su rol estratégico en la descarbonización profunda y en proyectos de exportación de hidrógeno verde desde Chile.

El desafío del almacenamiento y transporte del hidrógeno verde no se limita a una cuestión técnica, sino que representa una decisión estratégica de desarrollo territorial e industrial. En este escenario, tanto el amoníaco como el metanol verde son alternativas válidas y complementarias, pero con alcances distintos.

El amoníaco verde se consolida como un vector de alta densidad energética, maduro tecnológicamente y adaptable a las cadenas logísticas globales. Sus desventajas (toxicidad, corrosividad y alto consumo energético en su reconversión) son superables mediante estándares industriales y regulaciones robustas, permitiendo que se mantenga como la opción más viable y escalable a largo plazo.

Por su parte, el metanol verde ofrece ventajas de manipulación y compatibilidad con la infraestructura actual, pero su contenido de carbono y menor densidad lo relegan a un papel transitorio o complementario.

En definitiva, para que Mejillones se consolide como un *hub* internacional del hidrógeno verde, deberá apostar por soluciones de almacenamiento seguras y sostenibles, donde el amoníaco verde ocupe el eje central de la estrategia territorial y exportadora, apoyado por vectores secundarios como el metanol en la etapa de transición.



## PRODUCCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE: EL DESAFÍO DE PASAR DEL POTENCIAL A LA REALIDAD EN MEJILLONES

### PATRICIO LILLO

Director

Unidad de Tecnologías del Hidrógeno

Profesor Docente Asociado

Departamento de Ingeniería de Minería

Pontificia Universidad Católica de Chile

Durante los últimos años, Chile ha avanzado con decisión en posicionarse como un país líder en hidrógeno verde, formulando tempranamente una estrategia nacional y promoviendo proyectos piloto a lo largo del territorio. Sin embargo, el tránsito desde el anuncio de metas hasta la consolidación de una industria requiere hoy dar un paso mayor: transformar ese potencial en capacidad instalada, en infraestructura, conocimiento y acuerdos institucionales que permitan que el hidrógeno se produzca, acondicione y use en condiciones de competitividad global.

Mejillones es, sin duda, uno de los territorios donde este desafío se vuelve más concreto. Su posición geográfica, disponibilidad solar y red portuaria lo convierten en un nodo natural para la producción y exportación de hidrógeno verde y sus derivados. Pero justamente allí se evidencia el tipo de problemas estructurales que deben resolverse para que la industria avance: la falta de infraestructura habilitante, las demoras regulatorias y la desafiante coordinación entre el desarrollo energético y el ordenamiento territorial.

En este contexto, la producción y almacenamiento de H<sub>2</sub> y derivados (amoníaco) emerge como pieza. Si la producción depende de la radiación solar o eólica, el acondicionamiento y almacenamiento depende del territorio, su infraestructura y su capacidad logística. En Mejillones, la cercanía entre plantas de generación renovable, puertos industriales, redes eléctricas y el clúster minero otorga ventajas comparativas evidentes, pero también plantea exigencias de planificación integrada. Los proyectos no pueden avanzar de manera aislada; requieren una visión coordinada que alinee a productores, autoridades locales y comunidades bajo una misma estrategia territorial.

Adicionalmente, otro de los principales retos es la disponibilidad de agua y el tratamiento de sus fuentes. En este sentido, la desalación y el reúso de aguas industriales deben entenderse no solo como soluciones técnicas, sino como parte del pacto social y ambiental que sostendrá la legitimidad del sector. La producción de hidrógeno verde y derivados no puede verse como un enclave extractivo de nueva generación, sino como un sistema que comparte infraestructura, empleo y conocimiento con las comunidades del entorno.

La experiencia internacional demuestra que las regiones que logran desarrollar un ecosistema de hidrógeno verde sólido son aquellas que integran desde el inicio a la academia, la industria y el Estado, priorizando una hoja de ruta común. En Chile, esto implica fortalecer la articulación regional y asegurar que los instrumentos de financiamiento y permisos sean coherentes con la realidad de territorios como Mejillones. No se trata solo de atraer inversión, sino de generar capacidades locales que aseguren continuidad operacional, mantenimiento especializado y formación técnica.

Otro aspecto esencial es el escalamiento industrial. Los años que vienen serán decisivos para activar la demanda interna y consolidar los primeros polos productivos. El hidrógeno verde puede ser el motor de una nueva base industrial, donde se produzcan combustibles sintéticos, fertilizantes o explosivos, aprovechando las ventajas logísticas del norte de Chile. Pero para que eso ocurra, se requiere una política industrial explícita que priorice el acondicionamiento, la infraestructura portuaria y las tecnologías de transporte (como amoníaco o metanol), con reglas claras de trazabilidad y certificación de origen.

Finalmente, el desarrollo del hidrógeno en Mejillones debe concebirse como una oportunidad para repensar la relación entre energía y territorio. No basta con instalar plantas o electrolizadores: se trata de construir un nuevo modelo de desarrollo regional que vincule innovación tecnológica, empleo calificado y sostenibilidad ambiental. La colaboración entre actores públicos y privados, junto con la investigación aplicada, permitirá reducir incertidumbres y avanzar con legitimidad social. Chile tiene la oportunidad real de transformarse en un exportador de energías limpias, pero también en un país que aprende a industrializar de manera sustentable. Mejillones, por su historia y su posición estratégica, puede ser el lugar donde esa transición se haga visible.



## MEJILLONES: EL PUNTO DE INFLEXIÓN PARA HABILITAR EL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE

### NAHUEL MICONE

Gerente Transición Energética  
Techint Ingeniería y Construcción  
Profesor Adjunto  
Universidad Nacional de Lomas de Zamora

#### Un nodo estratégico en la transición energética

La Región de Antofagasta, Mejillones reúne condiciones únicas: ubicación portuaria, infraestructura de soporte para llevar a cabo grandes proyectos, experiencia local en la ejecución de éstos, cercanía a grandes consumidores mineros y disponibilidad de suelo industrial con una excelente capacidad de generación de energía renovable. Sin embargo, el ritmo de materialización del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V), el amoníaco verde (NH<sub>3</sub>V) y otros e-fuels no dependerá solo de la abundancia y calidad de la generación renovable, sino de dos habilitadores críticos: transmisión eléctrica robusta y soluciones de almacenamiento que integren producción, consumo y exportación. Chile fijó metas ambiciosas (5 GW de electrólisis bajo desarrollo hacia 2025 y liderazgo exportador al 2040), pero persisten brechas de red y de infraestructura logística que condicionan el despliegue territorial<sup>1-2-3</sup>.

#### Contexto local: proyectos y presión sobre la red

Un ejemplo concreto de proyectos avanzados en su desarrollo conceptual y aprobación social y ambiental es el proyecto Volta (Mejillones) que, de hecho, obtuvo aprobación ambiental como la primera iniciativa de amoníaco verde a escala industrial en Chile (620 kt/año de NH<sub>3</sub>V, en dos fases) con conexión prevista a la Subestación Los Changos y parque FV de ~600 MW, más ducto al puerto para despacho del producto<sup>4-5-6-7</sup>. En paralelo, la planificación del Coordinador Eléctrico ha detallado obras prioritarias en el eje Kimal-Los Changos (2×500 kV) y necesidad de equipos de compensación y control de flujo en corredores 220 kV que son esenciales para evitar *curtailment* y sincronizar ventanas de conexión de proyectos P2X en el norte, incluyendo obviamente el antes mencionado<sup>8</sup>. Todo esto es un claro ejemplo de que las condiciones están dadas para avanzar explotando todo el potencial de la región, pero no pueden pasarse por alto los aspectos técnicos que garanticen robustez en la transmisión.

#### Transmisión y almacenamiento: la columna vertebral del hidrógeno

La experiencia internacional indica que la infraestructura define la viabilidad de los proyectos. Refuerzos de red, control de flujo y compensación reactiva en los corredores 220/500 kV del norte de Chile son críticos para mantener estabilidad y calidad de suministro<sup>9</sup>.

Es de notar que los proyectos BESS de gran escala han empezado a acelerarse y que varias nuevas iniciativas han iniciado su tramitación ambiental con montos récord. En el entorno de Los Changos (Mejillones) ingresó y obtuvo aprobación un proyecto *stand-alone* de 225 MW/1.125 MWh conectado al SEN para aportar flexibilidad y suficiencia energética<sup>10-11</sup>. Además, ENGIE ha iniciado la construcción del BESS Lile en el Complejo Térmico de Mejillones (140 MW/802 MWh), reutilizando infraestructura eléctrica existente como parte de la reconversión del complejo<sup>12</sup>.

Ahora bien, la infraestructura eléctrica es un habilitador para reducir el vertimiento y dar estabilidad al sistema, pero no es la única herramienta. La producción de hidrógeno y amoníaco verdes puede convertirse en una solución complementaria para absorber excedentes renovables, reduciendo *curtailment* y transformando energía eléctrica en moléculas con valor agregado.

El NH<sub>3</sub> no solo tiene potencial como vector energético para exportación, sino también como combustible directo para transporte marítimo, alineado con las metas de descarbonización global. Las proyecciones internacionales confirman que el amoníaco será uno de los principales carriers en el comercio intercontinental de energía limpia.

Prueba de este avance son los proyectos que ya operan en mercados desarrollados:

- Europa puso en marcha la primera unidad industrial de craqueo de amoníaco a hidrógeno (30 t/d) en el Puerto de Amberes, Brujas, lo que demuestra la viabilidad técnica para reconvertir NH<sub>3</sub> en H<sub>2</sub> en *hubs* portuarios<sup>13-14</sup>.
- China, por su parte, completó el primer abastecimiento comercial con amoníaco ecológico para uso marítimo en Dalian, impulsando la adopción del NH<sub>3</sub> como combustible en la industria naval<sup>15-16</sup>.

Estas experiencias internacionales refuerzan la idea de que Mejillones puede posicionarse como un nodo estratégico no solo para producir moléculas verdes, sino para integrarlas en cadenas logísticas globales, aprovechando su infraestructura portuaria y su cercanía a polos industriales.

#### Proyectos *offgrid* y la realidad de la operación flexible

En emplazamientos remotos, los esquemas *offgrid* evitan costosas interconexiones a gran escala, pero exigen un diseño eléctrico complejo: *grid-forming* inverters, BESS y control avanzado para garantizar frecuencia, tensión y niveles de cortocircuito adecuados<sup>17-18</sup>. La integración de electrolizadores con energía renovable variable conlleva *trade-offs* entre eficiencia, degradación y costos. La literatura muestra que electrolizadores PEM presentan mejor respuesta dinámica que ALK y mayor tolerancia a rampas, pero la operación con perfiles fluctuantes podría incrementar la degradación por uso<sup>19-20-21-22</sup>.

A su vez, la síntesis de amoníaco convencional fue diseñada para operar de forma continua e inflexible. Nuevos enfoques de control predictivo (NMPC) demuestran que se pueden gestionar cambios de carga del 50-100% manteniendo variables críticas en límites seguros<sup>23</sup>. Estudios de *envelope* operativo para *power-to-ammonia* identifican ventanas de flexibilidad aún más amplias<sup>24</sup>. La comunidad técnica explora incluso reactores politrópicos de respuesta rápida que manejan rampas significativas<sup>25</sup>. De forma complementaria, algunos análisis de flexibilidad integral han confirmado que la capacidad de modular este tipo de planta reduce necesidades de almacenamiento de hidrógeno presurizado<sup>26</sup>.

Por último, es de notar que para acoplar mejor la variabilidad renovable a plantas de e-amoníaco, integrar almacenamiento por bombeo (pump-hydro) con BESS y electrolizadores puede estabilizar operación y reducir costos de respaldo. Aprovechar la geografía local con este propósito podría ser un aspecto recomendable a estudiar.

#### Otros atributos relevantes locales

Más allá de los aspectos técnicos, queda claro que avanzar primero donde existe aceptación social e infraestructura habilitante reduce riesgos. La huella hídrica y la reinversión local son aspectos que incrementan la bancabilidad (e incluso serán aspectos claves a la hora de conseguir financiamiento). En estos sentidos, es relevante resaltar que:

1) Antofagasta y Mejillones alcanzaron el abastecimiento urbano e industrial con agua desalada tras la expansión de la Planta Desaladora Norte (1.436 l/s)<sup>27-28-29</sup>. Si bien ello no implica que todas las faenas mineras del norte ya operan exclusivamente con agua desalada, la tendencia es incorporar desalación y tratamiento de efluentes urbanos como fuente principal en nuevos proyectos mineros y otros, incluyendo los de hidrógeno y amoníaco verde. La experiencia local en estos tópicos es altamente importante.

2) Estas regiones son industrialmente desarrolladas, donde la instalación de una planta de e-fuels se visualiza por todo el ecosistema como una oportunidad para generación de nuevas fuentes de trabajo y el desarrollo de las comunidades locales. La reinversión local temporal (durante la construcción) y permanente (durante operación y posible *offtake* local) tendrá un impacto positivo muy grande.

### Presencia local y experiencia global de Techint Ingeniería y Construcción

Techint E&C es una empresa líder en ingeniería, gestión de procura y construcción, con más de 80 años de experiencia y presencia en 13 países. Brinda soluciones integrales ejecutando proyectos desde su ingeniería (conceptual, básica, detalle, soporte a gestion permisos, estudios de factibilidad), Procura y Construcción (EPC), así como servicios de operación y mantenimiento, para los sectores de, energía, agua, minería, oil & gas (*upstream* y *downstream*), plantas petroquímicas e industriales, y obras civiles de infraestructura, con capacidad en Chile de ejecutar proyectos industriales por sobre los USD 2.500 millones y más de 15.000 personas directas contratadas en su ejecución.

La compañía forma parte del Grupo Techint, un holding industrial multisectorial (con foco en energía - Tecpetrol, siderurgia - Tenaris & Ternium, desarrollo de tecnologías - Tenova e ingeniería y construcción - Techintr E&C) de alcance global con más de 89.000 colaboradores e ingresos de más de USD 36.000 millones, lo que le permite operar bajo los más altos estándares de seguridad, calidad y cuidado del medio ambiente. En este marco, Techint E&C cuenta con 5 certificaciones ISO, posicionándose entre las pocas empresas a nivel mundial certificadas simultáneamente bajo cinco normas internacionales.

A nivel global, Techint E&C ha completado con éxito más de 3.500 proyectos y cuenta actualmente con un equipo de más de 18.000 personas distribuidas en proyectos, sedes y centros de ingeniería ubicados en Europa. Asia y América. Además, dispone de parques de máquinas y centros logísticos propios en Chile, Argentina, México y Ecuador, desde donde gestiona el acondicionamiento, la relocalización y la operación de su flota de equipos y materiales para los distintos proyectos.

### Experiencia en Chile y la región

En Chile, Techint E&C ha acompañado el desarrollo de sectores clave de la región, especialmente proyectos de agua y minería. A lo largo de los años, su participación ha sido fundamental para que las principales compañías mineras del país cuenten con sistemas críticos para sus operaciones, como suministro de agua industrial, infraestructura para desalinización y transporte y exportación de concentrado de cobre, y depósitos de relaves en tranques.

Frente al estrés hídrico que impacta a la actividad minera, la compañía desarrolla soluciones innovadoras orientadas a una minería más sustentable, entre ellas sistemas de desalinización de agua de mar como fuente alternativa para las operaciones. Techint E&C opera en la región en proyectos de desalinización y sistemas de impulsión de agua, y también brinda servicios de operación y mantenimiento para plantas de procesamiento de minerales.

Actualmente, la empresa se encuentra finalizando la construcción de dos megaproyectos, los más grandes de su historia en Chile, ambos vinculados a la provisión de agua de mar desalada en reemplazo del uso de agua continental para una capacidad total que permitirá abastecer alrededor de 3.600 litros/segundo a grandes mineras del norte de Chile. Estos sistemas desalinizan y transportan el agua desde la costa hasta las faenas mineras, a más de 4.500 metros sobre el nivel del mar, contribuyendo de manera directa a la sustentabilidad de la industria.

### Participación en proyectos de transición energética

En línea con los desafíos globales, Techint E&C creó una Gerencia de Transición Energética, desde la cual lidera el desarrollo de diversos proyectos en Latinoamérica, específicamente en Chile, Argentina, Brasil, Uruguay y México; y en Europa, en España e Italia. Estas iniciativas incluyen proyectos de generación de energía renovable, producción de hidrógeno de bajo carbono, captura y acondicionamiento de CO<sub>2</sub>, producción de e-fuels (como e-metanol, e-amoniaco y e-gasolina) y de SAF y desarrollo de soluciones de almacenamiento de energía (térmica, eléctrica, etc.)

Gracias a su experiencia en proyectos de gran escala en múltiples industrias, al respaldo y la solidez del Grupo Techint, al conocimiento técnico de sus equipos y a su presencia local sostenida durante más de ocho décadas, Techint E&C se consolida como un actor clave para impulsar los proyectos necesarios para la transición energética y la construcción de un presente y un futuro más sostenibles.



## DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA PARA EL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

### RAÚL MONTANO

Industry Segment Business Development Manager, Regio Europe  
Hitachi Energy

### JORGE TAMAYO

Business Development Manager - Hydrogen, Renewable & DataCenters  
Hitachi Energy

El hidrógeno verde se ha consolidado como uno de los pilares fundamentales para la descarbonización global, ofreciendo una alternativa sostenible para sectores difíciles de electrificar y para la producción de combustibles sintéticos. Chile destaca en esta transición gracias a su excepcional potencial solar y eólico, con hitos recientes que evidencian su avance: en diciembre de 2024, el país generó un 42% de su electricidad a partir de solar y eólica, y en 2025 las renovables no convencionales alcanzaron el 50% de la capacidad instalada a nivel nacional<sup>1-2</sup>. Sobre esta base de recursos y expansión renovable, Chile persigue convertirse en un *hub* exportador de hidrógeno verde y derivados, con metas de largo plazo que contemplan hasta 300 GW de capacidad renovable para 2050 y un mercado de exportación estimado en USD 24.000 millones<sup>3</sup>; medios internacionales también lo sitúan como líder regional en hidrógeno limpio por la combinación de ambición regulatoria y ventajas naturales<sup>4</sup>.

En este contexto, el proyecto Mejillones (Volta) representa uno de los desarrollos más ambiciosos del país: integra un parque fotovoltaico de 600 MW, líneas de 220 kV para conexión interna y al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), y una planta que producirá 110.000 t/año de H<sub>2</sub> como insumo para 620.000 t/año de NH<sub>3</sub> en dos fases, apoyándose además en soluciones de respaldo y calidad de potencia en la zona de Mejillones<sup>5-6</sup>. La magnitud de este complejo plantea desafíos técnicos significativos en infraestructura eléctrica: integración de generación renovable, estabilidad y rigidez de la red, control de la calidad de potencia, y optimización de costos (CAPEX y OPEX), donde el precio y la disponibilidad de la energía eléctrica inciden de forma crítica en el LCOH del hidrógeno verde<sup>7-8</sup>.

### Contexto del Proyecto Mejillones

El proyecto Volta, ubicado en la zona industrial de Mejillones integra generación renovable a gran escala, electrólisis y producción de derivados, con el objetivo de posicionar al país como un actor relevante en el mercado internacional de combustibles limpios<sup>9</sup>. La iniciativa contempla la instalación de un parque fotovoltaico de 600 MW sobre aproximadamente 900 hectáreas, diseñado para suministrar energía a los electrolizadores.

Estos equipos permitirán producir cerca de 110.000 toneladas de hidrógeno verde al año, utilizando agua desalinizada o tratada proveniente de la bahía local. El hidrógeno será el insumo principal para la fabricación de 620.000 toneladas anuales de amoníaco, distribuidas en dos fases de 310.000 toneladas cada una, lo que refuerza la relevancia del proyecto en la cadena de valor de combustibles sostenibles<sup>5-7</sup>. En cuanto a la infraestructura eléctrica, el diseño considera dos líneas de transmisión de 220 kV: una para conectar el parque fotovoltaico con la planta y otra para enlazar la instalación con la Subestación Los Changos, perteneciente al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Además, se proyecta la construcción de una subestación elevadora 220/30 kV en el sitio, que permitirá adecuar los niveles de tensión y garantizar la operación segura del complejo<sup>7</sup>. Este esquema confirma que el proyecto no funcionará como una microrred aislada, sino que estará parcialmente conectado al SEN, lo que les otorga flexibilidad operativa y resiliencia frente a variaciones en la generación renovable.

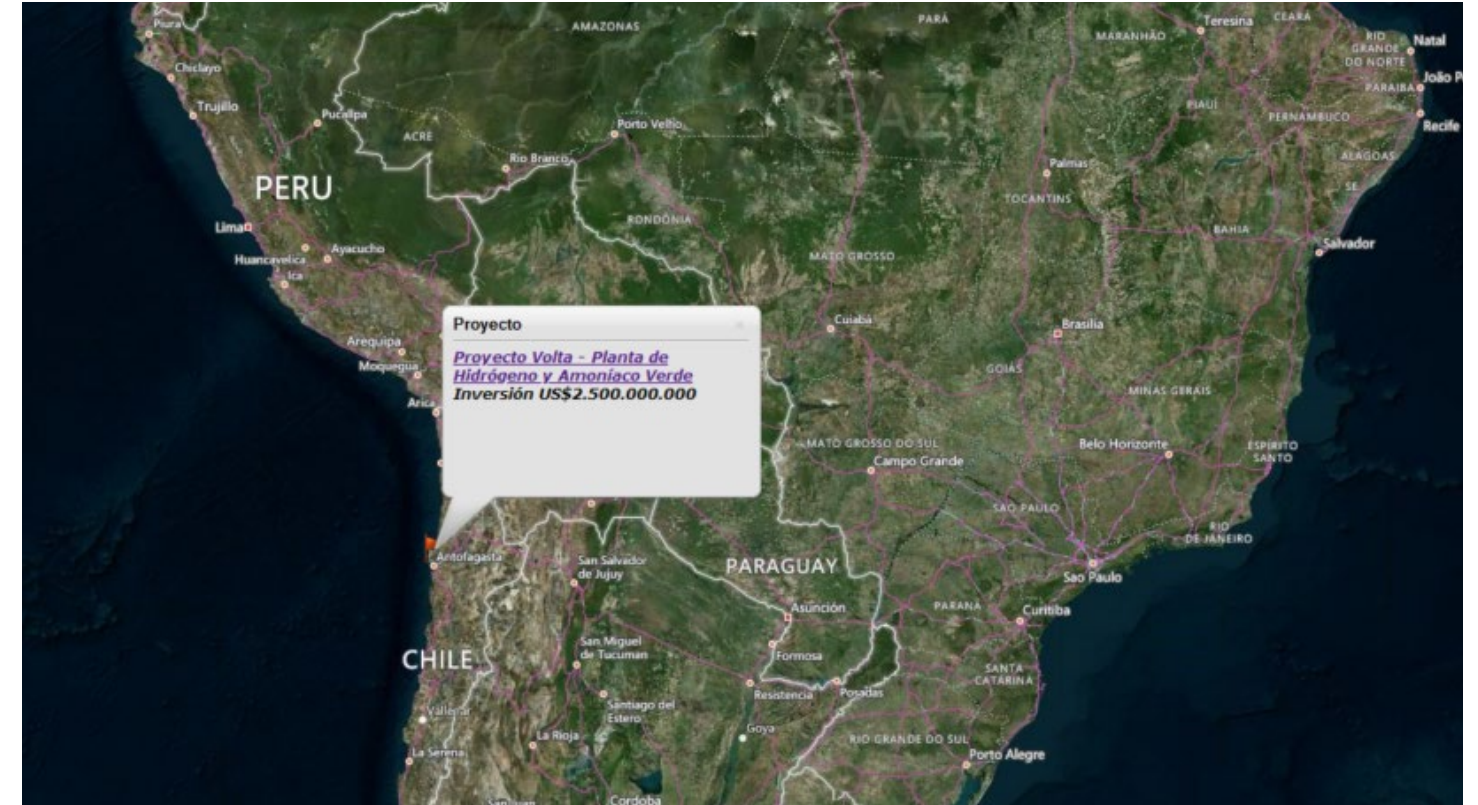


Figura 1: Ubicación geográfica del proyecto Volta.<sup>9</sup>

Para reforzar la estabilidad del sistema, se prevé la incorporación de soluciones de almacenamiento energético en la zona, como el proyecto BESS Lile de 140 MW/802 MWh, que aportará respaldo y contribuirá a la gestión de la intermitencia solar<sup>6</sup>. Sin embargo, esta conexión con la red nacional también implica desafíos técnicos relacionados con la rigidez del SEN, el control de flujos bidireccionales y la calidad de potencia, aspectos que se abordarán en las siguientes secciones.

### Retos técnicos en infraestructura eléctrica

La magnitud del proyecto Volta plantea desafíos significativos en la integración de la infraestructura eléctrica, tanto por la escala de generación renovable como por la necesidad de garantizar estabilidad y eficiencia operativa. Desde el diseño, la conexión parcial al SEN mediante líneas de 220 kV y la distancia entre activos (≈9,5 km. FV-planta y ≈9,8 km. planta-S/E Los Changos) obligan a una planificación fina de flujos y maniobras<sup>10-7</sup>. La alta variabilidad solar requiere control avanzado y compensación dinámica para evitar fluctuaciones de tensión y frecuencia, donde dispositivos FACTS y enfoques *grid-forming* (STATCOM/

E-STATCOM) muestran beneficios probados en redes con alta penetración renovable<sup>11-13</sup>. En términos de rigidez del SEN y control de flujos bidireccionales, la infraestructura existente debe absorber inyecciones de gran magnitud sin comprometer estabilidad transitoria, niveles de pérdidas en el sistema, ni condiciones de tensión. La incorporación de nuevas obras (líneas y subestación 220/30 kV) es esencial y debe coordinarse con planes de expansión y refuerzos en nodos críticos de Antofagasta (como Los Changos)<sup>7-10</sup>. La literatura técnica destaca que la integración de recursos basados en convertidores exige mayor capacidad de amortiguamiento de oscilaciones y soporte de inercia sintética; aquí, los STATCOM con control *grid-forming* y variantes con almacenamiento (E-STATCOM) aportan soporte de frecuencia, filtrado armónico y regulación de tensión<sup>11-12-19</sup>.

El impacto en costos es determinante. Por un lado, el CAPEX de transmisión (líneas/subestaciones) debe optimizarse mediante diseños modulares y soluciones de compensación locales; por otro, el consumo eléctrico de los electrolizadores concentra el OPEX del sistema, condicionando el LCOH. A nivel tecnológico, rangos actuales de consumo específico de electrólisis se

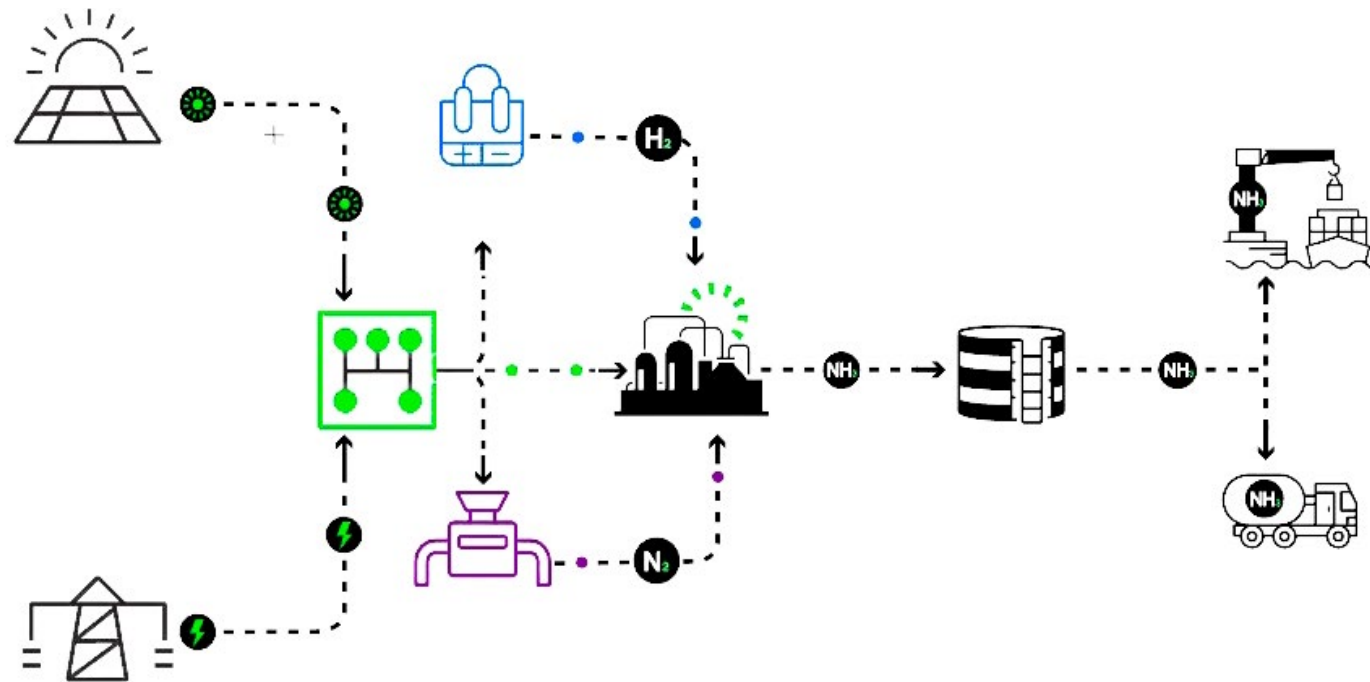


Figura 2: Imagen del proyecto Volta publicada por H2 News (26 marzo 2024).<sup>23</sup>

sitúan típicamente en 50–60 kWh/kg., mientras que iniciativas internacionales marcan objetivos  $\approx 45$  kWh/kg. hacia 2050, con implicaciones directas en eficiencia y costos<sup>17-18-20</sup>. Respecto a calidad de potencia y compensación reactiva, la operación de electrolizadores a gran escala puede inducir demandas de reactivos y armónicos, lo que exige soluciones de control rápido y filtrado activo. Estudios en parques eólicos y sistemas HVDC respaldan el uso de STATCOM/SVC y configuraciones híbridas para mitigar THD, flicker y sags, con mejoras medibles en estabilidad y regulación de tensión<sup>13-21-22</sup>.

Para contingencias y continuidad operativa, los sistemas de almacenamiento (BESS), como el proyecto Lile 140 MW/802 MWh en Mejillones, ofrecen respaldo crítico y flexibilidad para gestionar la intermitencia y desplazamiento de energía<sup>6-15</sup>. Finalmente, en el espectro de soluciones de integración, una estación HVDC *back-to-back* puede considerarse cuando se busca desacoplamiento eléctrico total, control preciso del intercambio de potencia y filtrado armónico integrado.

Sin embargo, para las distancias cortas del proyecto sugiere que el beneficio relativo frente a FACTS puede no justificar el mayor CAPEX, reservándose el *back-to-back* para escenarios con asimetrías de red severas o futuros acoples entre sistemas asíncronos<sup>13-22</sup>.

### Brechas por cerrar y oportunidades

Volta ha tenido un desarrollo sobresaliente en temas de diseño y planificación hasta ahora, sin embargo, en base a nuestra experiencia internacional en proyectos similares identificamos tres grandes desafíos, los que seguramente ya están siendo abordados, para asegurar su viabilidad técnica, económica y regulatoria, los que detallamos a continuación.

### Infraestructura eléctrica y capacidad de red

Si bien se proyectan nuevas líneas de 220 kV y una subestación elevadora, la rigidez del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en la zona norte podría requerir esfuerzos adicionales y coordinación con el Plan de Expansión de Transmisión. La gestión de grandes inyecciones renovables y flujos bidireccionales podrían requerir inversiones necesarias en compensación dinámica y control avanzado, alineadas con las mejores prácticas internacionales (p. ej. STATCOM/E-STATCOM, control *grid-forming*)<sup>7-10-12-28</sup>.

### Certificación y trazabilidad del hidrógeno verde

Chile aún no cuenta con un sistema nacional de garantías de origen (GO) con correlación temporal estricta, como el esquema europeo (por hora y en discusión 15 minutos). El Plan de Trabajo

Regulatorio 2024–2030 y el Plan de Acción H<sub>2</sub>V 2023–2030, reconocen la necesidad de estandarizar MRV y trazabilidad; además, existen propuestas técnicas (Hinicio/LBST) y estratégicas (Team Europe RH<sub>2</sub>) para un sistema de certificación compatible con mercados internacionales<sup>24-27</sup>.

### Optimización de costos y eficiencia tecnológica

El consumo eléctrico de los electrolizadores concentra el OPEX y condiciona el LCOH; modelos tecno-económicos muestran una sensibilidad de  $\approx 0,5$  €/kg. H<sub>2</sub> por cada incremento de 10 €/MWh en el precio de la electricidad. La mejora de eficiencia cuyo objetivo está por debajo de 45 kWh/kg. hacia 2050, junto con estrategias de operación flexible y almacenamiento, resulta clave para la competitividad de las plantas de hidrógeno verde<sup>8-15-17-18</sup>.

### Oportunidades estratégicas

Estos desafíos elevan la necesidad de adopción de tecnologías avanzadas y modelos de colaboración público-privada: digitalización de redes, despliegue de sistemas *grid-forming*, almacenamiento híbrido y un esquema nacional de GO alineado con EU-RED II. La experiencia internacional y el portafolio tecnológico (p. ej., STATCOM/E-STATCOM, subestaciones modulares, soluciones de monitoreo y control) ofrecen un camino concreto para ayudar en estos desafíos y apoyar una operación sustentable y globalmente competitiva en el largo plazo<sup>11-12-15-24-25</sup>.

### Conclusiones

El desarrollo del hidrógeno verde en Mejillones no es solo un desafío técnico: es una oportunidad para demostrar que la innovación y la colaboración pueden transformar la matriz energética de Chile. La magnitud del proyecto exige soluciones que combinen robustez eléctrica, flexibilidad operativa y trazabilidad confiable, pero también abre la puerta a posicionar al país como referente regional en integración de energías renovables y producción sostenible. Para lograrlo, será clave articular un ecosistema donde tecnología, regulación y experiencia global converjan. La colaboración entre desarrolladores, operadores de red, proveedores tecnológicos y autoridades permitirá acelerar la implementación de infraestructuras inteligentes, garantizar la competitividad del hidrógeno y cumplir con los estándares internacionales que aseguran acceso a mercados exigentes. Mejillones puede convertirse en un modelo de transición energética: un proyecto que no solo produce hidrógeno verde, sino que marca el camino hacia sistemas eléctricos resilientes, digitales y sostenibles.

El momento de actuar es ahora, con visión compartida y compromiso tecnológico para que esta oportunidad se traduzca en beneficios tangibles para la industria, la economía y el planeta.



## DEL POTENCIAL A LA INVERSIÓN: LA DEMANDA NACIONAL COMO PUENTE DE BANCABILIDAD PARA EL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE, CASO DE MEJILLONES

### ANDREA MORAGA

Gerente Unidad de Hidrógeno y Sostenibilidad, IIT  
Universidad de Concepción  
Directora Gerente  
Continua Soluciones SpA

La industria global del hidrógeno está transitando desde una etapa marcada por anuncios y estrategias nacionales hacia una fase de ejecución industrial. En este nuevo contexto, los proyectos que logran avanzar a decisión final de inversión (FID) comparten características comunes como: demanda asegurada mediante contratos de *offtake*, permisos avanzados, acceso a financiamiento estructurado bajo esquemas de *project finance* y modelos de negocio capaces de combinar mercados domésticos y de exportación. En Chile, pese a las ventajas comparativas asociadas a la disponibilidad de energías renovables competitivas y a su posicionamiento geográfico en mercados internacionales, el despliegue de proyectos de hidrógeno verde ha sido más gradual de lo previsto. La actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde reconoce esta brecha entre expectativas y ejecución, destacando la necesidad de desarrollar mercados domésticos que permitan reducir riesgos de inversión y consolidar capacidades industriales.

Este documento propone que la demanda nacional puede actuar como puente de bancabilidad para el desarrollo del hidrógeno verde en Chile, particularmente en polos industriales como Mejillones. A partir del análisis de la evolución del mercado global, las condiciones territoriales del norte y los instrumentos de política pública en desarrollo, se identifican modelos de despliegue y vectores de demanda capaces de habilitar proyectos en el corto y mediano plazo. Finalmente, se plantea que el desarrollo exitoso de esta industria requiere una estrategia territorial coordinada, donde distintos polos productivos del país, como Mejillones, Biobío y Magallanes, operen como hubs complementarios y colaborativos dentro del ecosistema nacional del hidrógeno.

### 1. Contexto de mercado: del “PowerPoint” a la inversión real

La industria del hidrógeno está atravesando una transición desde el optimismo fundacional hacia una etapa de ejecución estructurada. Tras varios años de anuncios de inversión y estrategias nacionales, el sector comienza a enfrentar el escrutinio propio de cualquier industria intensiva en capital. La Agencia Internacional de Energía (IEA) señala en su *Global Hydrogen Review* que la producción mundial de hidrógeno de bajas emisiones continúa siendo marginal frente al volumen total utilizado a nivel global. En 2025, ésta alcanzó aproximadamente 1 Mt., equivalente a menos del 1% de la producción mundial.

Este desfase entre anuncios y proyectos efectivamente ejecutados refleja un proceso natural de maduración del mercado. Los proyectos que logran avanzar a FID comparten características comunes: demanda asegurada mediante contratos de *offtake*, permisos avanzados y estructuras de financiamiento claras. En este contexto, la IEA estima que la producción proveniente de proyectos operacionales o con FID podría alcanzar cerca de 4 Mt. anuales hacia 2030. El sector no se está contrayendo; está filtrando iniciativas especulativas y concentrándose en proyectos económicamente viables.

Chile por su parte, posee ventajas comparativas relevantes para el desarrollo del hidrógeno verde. El potencial solar del norte y el recurso eólico del extremo sur posicionan al país entre los territorios con mayor competitividad en generación renovable. A estas condiciones naturales se suman factores institucionales y económicos que fortalecen el posicionamiento del país: estabilidad macroeconómica, amplia red de tratados de libre comercio y una industria de exportación que enfrenta crecientes presiones para avanzar en su proceso de descarbonización.

No obstante, el despliegue de proyectos sigue siendo incipiente. Diversas iniciativas han ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, pero solo una parte ha logrado avanzar hacia etapas más maduras. De los 17 proyectos de hidrógeno verde que han ingresado al sistema, solo seis cuentan con resolución de calificación ambiental favorable, acumulando una inversión aproximada de USD 954 millones y una capacidad cercana a 36 MW de electrólisis instalada. Al mismo tiempo, se estima que los proyectos actualmente en tramitación o planificación suman cerca de 8 GW de capacidad de electrólisis potencial, lo que podría representar una capacidad de producción del orden de 980 mil toneladas de hidrógeno verde equivalente por año y más de USD 30 mil millones en inversiones. Estas cifras reflejan tanto el interés industrial que existe en el país como la brecha que aún persiste entre anuncios de proyectos y decisiones finales de inversión.

Esta brecha entre anuncios e inversión efectiva ha sido reconocida por la actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, la cual subraya la necesidad de consolidar demanda interna como mecanismo para reducir riesgos de inversión y generar aprendizaje industrial. Entonces, la pregunta estratégica para Chile no es si el país puede producir hidrógeno verde competitivo, sino cómo transformar ese potencial en proyectos capaces de alcanzar decisión final de inversión.

Responder a esa pregunta implica avanzar desde la narrativa de potencial hacia la construcción de mercados reales, donde la demanda ancla, la infraestructura habilitante y la coordinación entre actores públicos y privados se convierten en los elementos centrales para la consolidación de la industria.

### 2. Estrategia de mitigación de riesgos: la demanda ancla como instrumento de bancabilidad

#### 2.1 Demanda nacional como instrumento de bancabilidad

Desde una perspectiva de negocio, la primera pregunta para cualquier proyecto es clara: ¿quién compra, ¿cuánto, a qué precio y por cuánto tiempo? La ausencia de demanda estructurada ha sido una de las principales barreras para el desarrollo del hidrógeno verde a escala industrial. En este contexto, la demanda nacional puede actuar como demanda ancla durante las primeras etapas de desarrollo.

En el caso de Mejillones, tres vectores de demanda inmediata destacan por su potencial: la minería del cobre, la industria de explosivos y la logística portuaria e industrial. Estas actividades

consumen grandes volúmenes de combustibles fósiles y presentan patrones de operación relativamente predecibles, lo que facilita la estructuración de contratos de suministro de mediano plazo. A mediano plazo (5-10 años), el crecimiento del mercado estará impulsado por derivados del hidrógeno con mercados globales consolidados, particularmente el amoníaco y otros combustibles sintéticos. Proyectos como Volta, en Mejillones, ilustran este modelo al combinar potencial exportador con aplicaciones industriales locales.

### 2.2 Instrumentos de política pública para habilitar la demanda

La actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno, reconoce que uno de los principales desafíos para el despliegue de la industria es la brecha de costos entre hidrógeno renovable y combustibles fósiles, lo que dificulta la estructuración de contratos de compra en etapas tempranas del mercado. En este contexto, distintos países han comenzado a implementar mecanismos de apoyo a la demanda, tales como contratos por diferencia, incentivos tributarios o esquemas de subsidio a la producción y consumo de hidrógeno bajo en emisiones. Chile ha comenzado a avanzar en esta dirección mediante instrumentos de apoyo público orientados a reducir la brecha de costos y acelerar la adopción industrial. Entre ellos destacan programas de financiamiento y apoyo a proyectos piloto impulsados por CORFO y el Ministerio de Energía, así como iniciativas regulatorias actualmente en discusión que buscan facilitar la estructuración de mercados domésticos para hidrógeno y sus derivados.

### 2.3 Riesgos internacionales que refuerzan la estrategia doméstica

El contexto geopolítico global refuerza la priorización de la demanda nacional como estrategia de mitigación. El riesgo logístico internacional; costos de transporte marítimo, seguros, volatilidad de rutas, afecta directamente la economía de las exportaciones. Las reglas de certificación -europeas y estadounidenses- determinan el “precio neto” del producto en destino y están sujetas a revisiones políticas. Diseñar exclusivamente para exportación expone al proyecto a variables que escapan del control del desarrollador.

En este escenario, el desarrollo de demanda nacional permite reducir la exposición a variables externas, disminuir costos logísticos y fortalecer la bancabilidad de los proyectos durante sus primeras etapas.

3. Estrategia operativa para despliegue del H<sub>2</sub>V en Mejillones

3.1 Propuesta de modelos para Mejillones

Las condiciones territoriales de Mejillones permiten visualizar distintos modelos de despliegue para el hidrógeno verde. Uno de ellos corresponde al desarrollo de *hubs* industriales integrados, donde producción de hidrógeno, síntesis de derivados, almacenamiento y exportación se desarrollan en un mismo perímetro industrial. Este modelo permite reducir costos de capital mediante infraestructura compartida.

Otro modelo relevante es la producción de derivados con demanda dual, capaz de abastecer simultáneamente mercados domésticos e internacionales. Asimismo, la reconversión de infraestructura energética existente abre oportunidades para reutilizar conexiones eléctricas, terrenos industriales y capital humano especializado. Finalmente, la proximidad al principal distrito minero del país permite imaginar corredores energéticos orientados a la descarbonización de flotas y transporte industrial.

3.2 Variables que definen la bancabilidad: el costo total para aplicaciones

El debate sobre hidrógeno verde suele centrarse en el costo nivelado de producción (LCOH). Si bien es una referencia útil, resulta insuficiente para evaluar decisiones de inversión. Lo que realmente determina la bancabilidad de un proyecto es el costo total puesto en el uso (*delivered cost*), que incorpora factores operativos, logísticos y regulatorios que inciden directamente en el riesgo del proyecto.

Algunos de los principales factores son: disponibilidad hídrica, conexión eléctrica y transmisión, compresión, almacenamiento y transporte, cronograma de permisos, seguridad y licencia social y contratos de *offtake*.

3.3. Ventaja organizacional-país: colaboración territorial como estrategia de desarrollo

Chile tiene una oportunidad estratégica en esta lógica. La firma del Acuerdo de Colaboración Nacional para el Desarrollo Territorial del Hidrógeno, suscrito en 2025 por H<sub>2</sub> Chile junto a las iniciativas regionales H<sub>2</sub> Antofagasta, H<sub>2</sub>V Biobío y H<sub>2</sub>V Magallanes, representa un paso relevante hacia una gobernanza colaborativa de la industria. Este acuerdo establece un marco de coordinación para compartir aprendizajes, fortalecer capacidades regionales y avanzar hacia una hoja de ruta común con identidad territorial.

Desde esta perspectiva, la competitividad del país no depende de concentrar el desarrollo en un único “megahub”, sino de articular una red de *hubs* especializados, donde cada región aporte su vocación productiva. La construcción de esta red territorial es la que permitirá consolidar una industria de hidrógeno robusta y sostenible en el tiempo. En ese esquema, Mejillones puede consolidarse como nodo industrial del norte minero-portuario, complementando el desarrollo de combustibles sintéticos en Magallanes y zona centro-sur, aportando con la formación de capital humano y capacidades, así como con otras aplicaciones industriales.

En específico, la Región del Biobío, aporta infraestructura de investigación y validación tecnológica. Universidades como la de Concepción y la Universidad Católica de la Santísima Concepción operan plataformas que integran producción, almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno, permitiendo validar tecnologías a escala piloto antes de su despliegue industrial. Además, la región posee una base industrial relevante, particularmente en los sectores metalmecánico, químico y de ingeniería, capaz de integrarse progresivamente a la cadena de suministro del hidrógeno. Desde esta perspectiva, el Biobío no compite con otros polos de desarrollo del hidrógeno en Chile; los habilita. Su rol es proveer capacidades tecnológicas, capital humano y servicios industriales que permitan escalar proyectos en los distintos territorios.

4. De la narrativa a la ejecución

En los últimos años, Chile ha construido una narrativa sólida en torno al hidrógeno verde. El desafío actual es transformar ese potencial en proyectos capaces de alcanzar decisión final de inversión y operación comercial. La experiencia internacional muestra que esta transición depende de la capacidad de articular demanda, infraestructura, regulación y financiamiento.

Mejillones reúne condiciones favorables para demostrar que el hidrógeno verde puede pasar de promesa a realidad industrial. Su base minera y logística, la infraestructura energética existente y la presencia de proyectos en desarrollo permiten imaginar un modelo donde la demanda nacional actúe como puente de bancabilidad mientras se consolidan los mercados de exportación.

La ventaja comparativa se convierte en ventaja competitiva cuando la demanda y la gobernanza territorial están resueltas. Chile tiene las condiciones para avanzar en esa dirección. Entonces, el desafío ya no es de narrativa, sino de ejecución: estructurar contratos, reducir riesgos y construir proyectos exitosos.



## MEJILLONES COMO VALLE DE HIDRÓGENO: ENERGÍA, MODELAMIENTO Y DESARROLLO TERRITORIAL

### AGUSTINA RAVOTTI

Hydrogen Technical Advisor and Project Manager  
Impact Hydrogen

En un mundo donde la demanda de energía continúa aumentando como resultado del crecimiento poblacional, la expansión industrial, la digitalización de la economía y el desarrollo de infraestructura tecnológica intensiva en consumo eléctrico, resulta indispensable cuestionar no solo cuánto consumimos, sino de dónde proviene esa energía. Las consecuencias del uso sostenido de combustibles fósiles son evidentes y medibles: incremento de la temperatura global, sequías prolongadas, retroceso de glaciares, alteraciones en ecosistemas y eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes. La transición energética no es una opción ideológica, sino una necesidad estructural.

En este escenario, la Región de Antofagasta ocupa una posición estratégica. Históricamente ha sido uno de los principales polos de generación eléctrica del país y continúa desempeñando un rol central en el abastecimiento energético nacional. Mejillones, en particular, representan un nodo industrial y logístico clave, vinculado a la minería y al comercio internacional<sup>1</sup>. Su infraestructura portuaria, su conexión con mercados globales y su capacidad instalada la posicionan como un territorio con alto potencial para convertirse en un centro de producción y exportación de hidrógeno verde y sus derivados.

No obstante, el desarrollo del hidrógeno verde es un proceso complejo. Se trata de un mercado aún incipiente que requiere coordinación público-privada, marcos regulatorios claros, instrumentos de planificación territorial y una articulación efectiva entre actores industriales, académicos y gubernamentales. En este sentido, la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde para la Región de Antofagasta, publicada a comienzos de 2025, constituye un avance significativo. Este instrumento reconoce la importancia de desarrollar demanda local, optimizar costos de producción, generar empleo y capital humano especializado, reducir emisiones y abordar desafíos de gobernanza y coordinación institucional.

Desde mi experiencia profesional en Impact Hydrogen<sup>2</sup>, consultora especializada en el desarrollo de cadenas de valor bajo el concepto de valle de hidrógeno sostenible, he observado que el enfoque sistémico es fundamental. Un valle de hidrógeno no se limita a instalar electrolizadores; implica integrar generación renovable, producción, almacenamiento, distribución, consumo local y potencial exportación dentro de una estrategia territorial coherente. En el caso de Mejillones, la combinación entre mercado doméstico e inserción internacional puede actuar como motor de escalabilidad y reducción progresiva de costos.

Hoy el principal desafío no es técnico, sino económico. La viabilidad del hidrógeno verde depende del diferencial de costos frente a alternativas convencionales y de la capacidad de los consumidores para absorber el sobreprecio inicial asociado a la descarbonización. En este contexto, analizar el sistema energético de manera integral es clave. Herramientas de modelamiento, como el Quick Scan<sup>3</sup> desarrollado con apoyo de RVO (Agencia Empresarial de los Países Bajos, nombre original en neerlandés: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland) para el mercado holandés, permiten evaluar hubs de hidrógeno incorporando variables técnicas y económicas: perfiles de consumo, combinación de fuentes renovables, conexión a red, subsidios al CAPEX, tasas de descuento, costos de almacenamiento e infraestructura compartida. Estos modelos permiten estimar el precio requerido de venta del hidrógeno y analizar en qué condiciones el sistema alcanza puntos de equilibrio competitivos.

Herramientas como el Quick Scan podrían ser replicadas en Mejillones. El mismo destaca la importancia de la infraestructura compartida, tal como se observa en la Figura 1, donde la producción de hidrógeno se concibe como un sistema común que abastece a múltiples consumidores. Planificar redes de distribución comunes reduce costos unitarios y minimiza impactos ambientales asociados a desarrollos fragmentados.

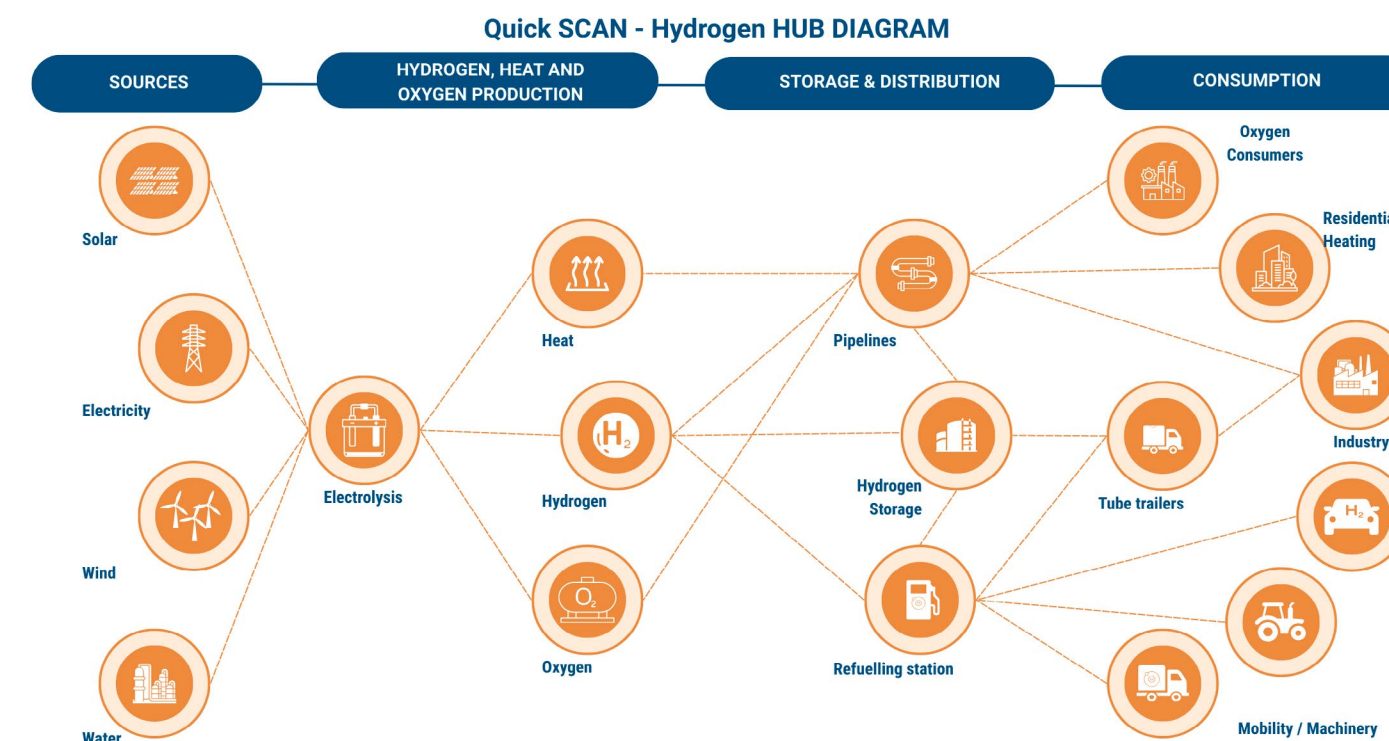


Figura 1: Hydrogen Hub Diagram on which the Quick Scan model is based<sup>4</sup>.

Asimismo, la valorización de coproductos de la electrólisis, como el oxígeno y el calor residual, mejora el desempeño energético global del sistema. Integrar estos flujos no solo fortalece el caso de negocio, sino que también incrementa la eficiencia y puede generar beneficios locales adicionales.

En paralelo, considero fundamental destacar la articulación entre academia y sector privado como pilar de una transición sólida. Durante mi doctorado en ingeniería industrial estudié la aplicabilidad del hidrógeno como combustible en procesos de fabricación de cerámica. En uno de los trabajos realizados analizamos el uso de oxígeno como enriquecedor del oxidante en sistemas de combustión con mezclas H<sub>2</sub>-gas natural (GN)<sup>4</sup>. Los resultados experimentales demostraron potenciales factores de ahorro de combustible y reducción de emisiones. Posteriormente, estos datos fueron escalados mediante modelos tecno-económicos que permitieron estimar puntos de equilibrio entre sistemas operando con 100% GN o con mezclas H<sub>2</sub>-GN. Esta integración entre evidencia experimental y modelamiento demuestra que la transición energética puede analizarse con rigor técnico y fundamentos cuantitativos. En Mejillones existen universidades y centros de investigación que ya colaboran con asociaciones como H<sub>2</sub> Antofagasta<sup>5</sup>.

Aplicar modelos basados en resultados experimentales locales puede transformarse en una práctica estratégica para optimizar el costo del hidrógeno y fortalecer la cadena de producción energética regional. La combinación de conocimiento académico, experiencia industrial y herramientas de análisis reduce incertidumbre, mejora la toma de decisiones y acelera la maduración del mercado.

En términos estratégicos, Mejillones tiene el potencial de convertirse en un valle de hidrógeno de gran escala que integre generación renovable, producción eficiente, consumo local y exportación. Para ello será necesario consolidar mecanismos de gobernanza claros, instrumentos de planificación robustos y herramientas técnicas que permitan evaluar escenarios con base en datos. El objetivo no debe ser únicamente producir hidrógeno, sino diseñar un sistema energético territorial competitivo, eficiente y socialmente sostenible. Si se construye bajo una visión colaborativa y basada en evidencia, Mejillones puede posicionarse como referente en transición energética en América Latina y como modelo replicable para otras regiones del país.



## EL POTENCIAL DEL HIDRÓGENO VERDE DE CHILE EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA GLOBAL: UNA PERSPECTIVA EUROPEA

### LUKAS ROESSLER

Ingeniero Civil | Research Scientist | PhD candidate |  
Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology  
Graz University of Technology, Austria

### MERIT BODNER

Assistant Professor Institute of Chemical Engineering  
and Environmental Technology  
Graz University of Technology, Austria

#### Contexto global: una oportunidad estratégica para Chile

A medida que la comunidad internacional acelera su transición hacia emisiones netas cero<sup>1</sup>, el hidrógeno verde ha emergido como un vector crítico para la descarbonización de sectores difíciles de abatir, como la industria pesada, el transporte de larga distancia y la industria química. La rápida alineación de políticas observada en la Unión Europea<sup>2</sup>, Japón<sup>3</sup> y otras grandes economías<sup>4</sup> está impulsando un cambio estructural en el comercio energético global y en la descarbonización industrial, en el que los combustibles y productos químicos limpios complementan a las energías renovables como parte de una estrategia diversificada de emisiones netas cero.

En este contexto, y desde la perspectiva europea, Chile ocupa una posición única. Con algunos de los recursos renovables más competitivos del mundo<sup>5</sup>, un marco institucional estable y una clara Estrategia Nacional de Hidrógeno<sup>6</sup>, Chile es ampliamente considerado como uno de los futuros exportadores más prometedores de hidrógeno verde y sus derivados. La región norte del país -en la cual se centra este documento- ofrece una combinación distintiva de potencial solar y eólico, infraestructura portuaria, abundante disponibilidad de agua de mar y capacidad industrial, que podría habilitar la producción y exportación de hidrógeno a gran escala.

Desde la mirada europea, Chile representa un socio estratégico para el desarrollo de cadenas de suministro de hidrógeno verde confiables, sostenibles y geopolíticamente estables. A medida que la Unión Europea avanza en el cumplimiento de los ambiciosos objetivos de REPowerEU -importar 10 millones de toneladas anuales de hidrógeno renovable hacia 2030-, las colaboraciones con países como Chile son consideradas

esenciales. En consecuencia, durante el 2024, la UE, Hydrogen Europe, el Banco Europeo de Inversiones y el banco alemán KfW<sup>7-10</sup> establecieron marcos y planes de desarrollo para promover el incipiente mercado de hidrógeno renovable en Chile. El más relevante es el Global Gateway Renewable Hydrogen Fund for Chile, cuyo objetivo es impulsar el potencial del país para:

- Convertirse en líder regional en hidrógeno verde y promover la cooperación Sur-Sur.
- Producir el 150% del mercado global actual de H<sub>2</sub> y el 15% de la demanda futura proyectada para 2050.
- Lograr la transición del sector minero.

#### Panorama de la demanda internacional de hidrógeno

La Unión Europea ha asumido un rol de liderazgo en el establecimiento de marcos de demanda de hidrógeno, mediante hojas de ruta nacionales y mecanismos de financiamiento que incentivan tanto la producción doméstica como las importaciones. En este contexto, la mayoría de los países de la UE y asociados cuentan con estrategias nacionales de hidrógeno<sup>11</sup>. Estrategias como las de Alemania<sup>12</sup>, Países Bajos<sup>13</sup> y Austria<sup>14</sup> han identificado el hidrógeno verde como un pilar de la descarbonización industrial, especialmente en la siderurgia, la producción de fertilizantes y los combustibles sintéticos. Sin embargo, la limitada base de recursos renovables de Europa, las restricciones de uso de suelo y la variabilidad estacional hacen indispensable la diversificación de importaciones.

La demanda europea de hidrógeno se estructura crecientemente en torno a corredores y polos industriales regionales; por ejemplo, el clúster industrial Rotterdam-Rhin<sup>15</sup>, el Corredor de Hidrógeno del Norte del Adriático<sup>16</sup> que conecta Italia, Eslovenia

y Austria, y quizás el más relevante, el SouthH<sub>2</sub>Corridor, que conecta Túnez, Italia, Austria y Alemania<sup>17</sup>. Estas iniciativas buscan integrar hidrógeno importado y derivados (como amoníaco o metanol) en redes industriales ya existentes. De forma relevante, instrumentos de política de la UE como el Banco Europeo del Hidrógeno<sup>18</sup> y el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM)<sup>19</sup> refuerzan la ventaja competitiva de las importaciones verificadas de bajo carbono.

Más allá de Europa, Japón y Corea del Sur también están ampliando sus marcos de importación. Ambos han establecido proyectos piloto tempranos con Australia y Medio Oriente, centrados en hidrógeno líquido y amoníaco como portadores. Los mercados asiáticos competirán por una parte de la misma capacidad exportadora de bajo carbono que Chile busca desarrollar. En este escenario, la ventaja de Chile radica en su estabilidad de largo plazo, su gobernanza ambiental y su proximidad a las rutas comerciales del Pacífico, lo que podría hacer particularmente atractivas sus exportaciones tanto para Europa como para Asia.

Pese a los ambiciosos planes y al creciente impulso político, el comercio global de hidrógeno sigue siendo muy limitado en escala. Según el Observatorio Europeo del Hidrógeno<sup>20</sup>, la mayor parte del hidrógeno aún se produce y consume localmente, principalmente para usos industriales como refinación y producción de amoníaco. El comercio transfronterizo dentro de Europa recién comienza a emerger, principalmente a través de proyectos piloto y mezclas a pequeña escala en gasoductos entre países vecinos. Aún no se han realizado envíos internacionales de gran volumen de hidrógeno verde, aunque sí algunos cargamentos demostrativos de amoníaco e hidrógeno licuado, como desde Australia a Japón y desde Medio Oriente a Europa.

A 2025, las rutas comerciales de hidrógeno se encuentran todavía en una fase pre-comercial, con la mayoría de los países concentrados en esquemas de certificación, planificación de infraestructura y acuerdos de compra (*offtake*), más que en exportaciones físicas. Esta brecha entre la capacidad planificada y el comercio efectivo subraya la etapa temprana del desarrollo del mercado y resalta la oportunidad estratégica para exportadores emergentes -como Chile- de alinearse tempranamente con estándares internacionales y trayectorias de crecimiento de la demanda.

En síntesis, la demanda internacional crece rápidamente, pero es altamente selectiva: los importadores priorizan proveedores que puedan garantizar competitividad de precios, sostenibilidad

verificada a lo largo de toda la cadena de valor y -cada vez más relevante para Europa- seguridad geopolítica. En este doble desafío, económico y ambiental, es donde Chile puede diferenciarse mediante planificación integrada y sistemas de certificación transparentes.

#### Referentes internacionales de oferta

Las vías tecnológicas para el transporte de hidrógeno son uno de los factores más decisivos -si no el más decisivo- en la competitividad de las cadenas internacionales de suministro de hidrógeno. Si bien el costo de la electricidad renovable y de los electrolizadores determina la viabilidad productiva, la capacidad de almacenar, mover y entregar hidrógeno de manera eficiente a largas distancias definirá, en última instancia, qué países emergerán como exportadores globales viables. Por ello, las tecnologías de transporte no son solo un asunto técnico, sino también estratégico y geopolítico en la economía emergente de la energía limpia.

A nivel global, se han consolidado dos modelos principales como soluciones predominantes para el comercio de hidrógeno a gran escala:

#### 1. Reutilización y expansión de infraestructura existente de gas natural

El modelo basado en gasoductos aprovecha la ventaja significativa de redes de transmisión ya existentes, particularmente entre regiones interconectadas por sistemas de gas natural. La reconversión de gasoductos permite una vía potencialmente más rápida y de menor costo para escalar el transporte de hidrógeno, capitalizando derechos de paso, estaciones compresoras e interconexiones portuarias ya instaladas. No obstante, deben abordarse desafíos técnicos y de materiales, como la fragilización, las fugas y la necesidad de reacondicionamiento de ductos. Aunque estos desafíos son técnicamente resolubles, la intensidad energética y los costos de materiales asociados a la conversión siguen siendo barreras relevantes para la competitividad en el corto plazo<sup>21</sup>.

En consecuencia, este enfoque favorece actualmente a regiones con redes densas y distancias de transporte relativamente cortas, como los corredores intra europeos o entre el norte de África y Europa, más que a cadenas de suministro intercontinentales.

El norte de África representa hoy la principal alternativa para el desarrollo de gasoductos de hidrógeno hacia Europa,

posicionándose como proveedor bajo la política de Vecindad Sur de la UE<sup>22</sup>. En línea con estas políticas, se han tomado acciones a nivel nacional: el rey de Marruecos ha destinado un millón de hectáreas para la producción de hidrógeno limpio<sup>23</sup>, en Egipto, bajo su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 19 empresas internacionales han firmado memorandos de entendimiento<sup>24</sup>, y Túnez planea producir 8,3 millones de toneladas de hidrógeno verde hacia 2050<sup>25</sup>. Sin embargo, pese a contar con infraestructura de gas natural, abundantes recursos renovables y proximidad a Europa, el despliegue de infraestructura productiva se ha mantenido, hasta ahora, en el plano de políticas y acuerdos, sin proyectos operativos en funcionamiento.

España y Portugal, aunque no podrán cubrir la totalidad de la demanda, han integrado con éxito la producción de hidrógeno renovable con infraestructura portuaria, formando “valles del hidrógeno” listos para la exportación. Actualmente lideran en la UE con más de 400 proyectos de desarrollo de hidrógeno<sup>26</sup>, que representan más de EUR 33.000 millones en inversión planificada. Estos proyectos apuntan a una capacidad total de electrólisis instalada de 13,3 GW para 2030. Sin embargo, problemas de conexión, puntos de transmisión y congestión de redes han retrasado su despliegue: solo 145 MW alcanzarán decisión final de inversión hacia fines de 2025 y 1,8 GW hacia fines de 2026, según datos de octubre de 2025<sup>27</sup>.

## 2. Licuefacción del hidrógeno o conversión en portadores químicos

En contraste, las tecnologías de hidrógeno líquido y portadores químicos ofrecen la flexibilidad de transportar hidrógeno a través de océanos, habilitando el comercio entre continentes con perfiles energéticos complementarios. El hidrógeno puede licuarse a temperaturas criogénicas o transformarse en compuestos estables como amoníaco, metanol o portadores orgánicos líquidos (LOHC), que ya forman parte de mercados globales consolidados. Aunque estas rutas implican penalidades energéticas y costos de conversión, ofrecen escalabilidad, compatibilidad con infraestructura portuaria existente y acceso a múltiples aplicaciones finales en generación eléctrica, movilidad e industria química.

En este ámbito, Australia ha construido alianzas tempranas con Japón y Corea, aprovechando su potencial renovable a gran escala y claros incentivos de inversión. No obstante, hasta la fecha, este mercado depende casi exclusivamente de hidrógeno derivado del carbón. Con una producción nacional cercana a

500.000 toneladas anuales<sup>28</sup>, prácticamente en su totalidad de origen fósil, la mayor planta de hidrógeno verde produce solo 175 toneladas por año<sup>29</sup>. La cooperación público-privada -particularmente con Japón- ofrece una ventaja comparativa en producción y exportación de H<sub>2</sub>. Empresas líderes en electrólisis, como Hysata, reportan consumos energéticos de 40,4 kWh/kgH<sub>2</sub> y eficiencias del 95%<sup>30</sup>, y existen alternativas ya implementadas de almacenamiento y transporte líquido, como el proceso Direct MCH de ENEOS<sup>31</sup>, con un sistema operativo de 150 kW para conversión de hidrógeno en LOHCs. Esto otorga una ventaja potencial al escenario australiano, siempre que los proyectos prometidos efectivamente se implementen. Sin embargo, recientes cancelaciones y retrasos de proyectos emblemáticos plantean riesgos a esta aparente ventaja<sup>32</sup>.

La situación del hidrógeno en Australia será, de manera natural, el principal referente comparativo para un eventual despliegue del hidrógeno en Chile, dada su posición geográfica en el Pacífico, su potencial renovable y la similitud de sus industrias (por ejemplo, minería de cobre y níquel).

Ambos modelos evolucionan rápidamente, respaldados por importantes inversiones públicas y privadas. La iniciativa europea Hydrogen Backbone proyecta una red de 40.000 kms. de gasoductos reconvertidos hacia 2040, conectando regiones industriales clave y terminales de importación. Paralelamente, países como Japón, Corea y Alemania están liderando el uso de amoníaco y metanol como portadores energéticos e insumos industriales, demostrando cómo los derivados del hidrógeno pueden servir como puente transitorio hacia su uso pleno.

En comparación con estos referentes internacionales, la principal desventaja de Chile es la ausencia de infraestructura existente para la producción y el transporte de hidrógeno. Sin embargo, su extensa red portuaria, junto con instalaciones de desalinización ya establecidas y una sólida base industrial -especialmente en minería y producción de amoníaco (por ejemplo, Codelco y Enaex)- proporcionan una base sólida para desarrollar estas tecnologías. Esta combinación otorga a Chile una ventaja comparativa para iniciar el desarrollo de una economía del hidrógeno, habilitando su posicionamiento como uno de los principales productores y exportadores mundiales de hidrógeno limpio.

## 3. Modelos de exportación y habilitadores tecnoeconómicos

Como se ejemplificó en la sección anterior, se consideran generalmente dos modelos principales de exportación, cada uno con implicancias tecno-económicas diferenciadas:

### Exportación directa de hidrógeno

El envío de hidrógeno comprimido o licuado representa el concepto más directo, pero sigue siendo intensivo en capital debido a los desafíos de licuefacción y almacenamiento. Las altas variaciones de temperatura en las zonas desérticas del país complicarían aún más el almacenamiento de H<sub>2</sub> licuado (-253°C). La elevada penalidad energética -aproximadamente 13 kWh/kgH<sub>2</sub>, cerca del 30% de la energía contenida en el propio hidrógeno (33 kWh/kg)<sup>33</sup> y la limitada infraestructura global hacen que este modelo sea menos atractivo en el corto plazo. Además, esta vía no se alinea con la desventaja geográfica de Chile, dado que el transporte por ductos es más adecuado para distancias cortas (por ejemplo, norte de África hacia Europa)<sup>34</sup>.

### Portadores líquidos (amoníaco, metanol, combustibles sintéticos)

La conversión del hidrógeno en amoníaco o e-fuels permitiría a Chile capitalizar su infraestructura marítima existente y su industria química (Enaex), accediendo a mercados globales de *commodities* ya establecidos. Este enfoque se alinea con la actual estructura de demanda europea, ya que muchas refinerías y puertos de la UE están equipados para el manejo de amoníaco y la mezcla de metanol<sup>35</sup>. De manera ventajosa, Chile ya cuenta con *know-how* en LOHCs y e-fuels, gracias a la planta Haru Oni en la Patagonia, un proyecto emblemático conjunto entre HIF, Porsche, Enel, ExxonMobil y ENAP, que opera la primera planta del mundo de producción de e-fuels a partir de hidrógeno limpio<sup>36</sup>. Aprovechar esta experiencia podría posicionar a Chile como un exportador marítimo global de hidrógeno.

## 4. Conclusiones: hacia una alianza Chile-Europa en hidrógeno

Desde una perspectiva internacional, la emergencia de Chile como productor y exportador de hidrógeno verde no solo es plausible, sino estratégica. La agenda global de descarbonización depende de la cooperación interregional entre economías ricas en recursos renovables y centros industriales. En este contexto, la necesidad europea de suministros seguros y certificados de combustibles verdes y materiales sostenibles se alinea de forma natural con el potencial renovable, la industria y la

estrategia energética exportadora de Chile. Donde Europa enfrenta restricciones de suelo y recursos, Chile ofrece escala, abundancia solar y eólica, y una sólida base minera capaz de anclar cadenas de valor asociadas al hidrógeno.

No obstante, pese a la retórica ambiciosa que rodea al hidrógeno, la realidad del despliegue global sigue siendo incipiente. Numerosas estrategias y compromisos se han firmado en todo el mundo, pero pocas instalaciones a gran escala están operativas y aún no se ha materializado un comercio global consistente de hidrógeno. Hoy, la mayor parte del hidrógeno sigue produciéndose y consumiéndose a nivel doméstico.

Si bien persisten desafíos técnicos y logísticos, ya se han iniciado iniciativas concretas orientadas al desarrollo industrial colaborativo y al comercio entre Chile y la UE. En particular, los marcos de política pública y los instrumentos financieros avanzan rápidamente, y los compromisos de asociación esperan su implementación efectiva en terreno.

En este sentido, el sector del hidrógeno está transitando desde una fase de entusiasmo público hacia una de validación técnica. La cautela de los inversionistas y el escepticismo público aumentan, especialmente a medida que las estimaciones iniciales de costos se enfrentan a las realidades del mercado y a las restricciones de las redes eléctricas. Mantener el impulso sobre la base de hitos realistas y técnicamente sólidos será esencial para evitar retrocesos de credibilidad como los experimentados en transiciones energéticas anteriores, por ejemplo, en el biodiésel o la energía nuclear. El éxito de la economía del hidrógeno no dependerá del financiamiento público o de las asociaciones, sino de un despliegue basado en evidencia.



## UNA VISIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSFORMACIÓN DE LA MATRIZ PRODUCTIVA EN ANTOFAGASTA

### JORGE TABOADA

Director Ejecutivo  
Solar Ammonia Chile SpA  
Vicepresidente  
H<sub>2</sub> Antofagasta

Durante las últimas dos décadas, la comuna de Mejillones se ha consolidado como el polo portuario, energético e industrial más relevante del país, desempeñando un rol estratégico en el abastecimiento de la gran minería de la Región de Antofagasta. Hoy la comuna enfrenta una coyuntura sin precedentes: el retiro programado de las centrales a carbón, en conjunto con la emergencia de la industria del hidrógeno verde y sus derivados, abre un escenario de transformación que podría redefinir la matriz productiva regional en el largo plazo.

El propósito de este ensayo es contribuir con una visión estratégica del escenario mencionado. En primer lugar, se analizan los desafíos y oportunidades asociados a la desconexión de las centrales termoeléctricas, tanto desde la perspectiva de la infraestructura como en relación con los objetivos regionales de descarbonización. En segundo término, se examinan las oportunidades de diversificación productiva vinculadas al desarrollo de la industria del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V), cuyo despliegue promete dinamizar nuevos encadenamientos industriales de alto valor agregado. Finalmente, se propone la creación de un Parque Industrial planificado como una palanca estratégica para articular estos procesos, promover el uso eficiente de infraestructura habilitante e impulsar la competitividad regional.

La articulación de estas dinámicas -reconversión energética, diversificación productiva y ordenamiento territorial- constituye una oportunidad única para avanzar hacia una matriz productiva más sostenible, capaz de aportar de manera efectiva al desarrollo local mediante una participación comunitaria incidente, que asegure la incorporación oportuna de sus visiones y necesidades en los procesos de planificación.

### Infraestructura y reconversión industrial en Mejillones

Mejillones cuenta hoy con un puerto de uso público y 9 terminales portuarios privados, en una bahía con excelentes condiciones para las operaciones marítimas. Tres de estos terminales portuarios se construyeron originalmente para atender la descarga de carbón requerido por las centrales termoeléctricas. Existen actualmente además 8 centrales térmicas de generación eléctrica con una capacidad instalada total de 3.700 MW, de las cuales 5 utilizan carbón como combustible y 3 utilizan gas natural, estas últimas alimentadas por un terminal de importación y regasificación de gas natural licuado. Cada una de las centrales termoeléctricas cuenta con aducciones de agua de mar de gran capacidad para los circuitos de enfriamiento de sus procesos térmicos, además de pequeñas plantas desaladoras para sus propios consumos de agua potable y de procesos. Forman parte de este polo energético también 22 líneas de transmisión eléctrica en alta tensión y tres subestaciones eléctricas del Sistema Interconectado Nacional.

Según el Plan de Descarbonización de la Industria Energética<sup>1</sup>, se estima que para 2026 existirán en Mejillones cuatro centrales a carbón susceptibles de retiro o reconversión, acumulando 1.624 MW de potencia instalada. Tras 2030, otra central de 550 MW quedaría disponibles para ser retirada o reconvertida. Si bien el retiro progresivo de estas centrales representa un desafío complejo para las empresas operadoras y para la cadena de proveedores asociada, los beneficios para la comuna y la región son significativos: reducción relevante de las emisiones de CO<sub>2</sub>, mejora en la calidad del aire, disminución del impacto sobre la bahía y contribución directa al cumplimiento de las metas nacionales de descarbonización. Este proceso requiere, no obstante, una adaptación sistémica del sector eléctrico, del mercado laboral y de los servicios vinculados a la operación de estas plantas.

Desde la perspectiva del desarrollo productivo regional, la desconexión de estas instalaciones abre una oportunidad sin precedentes: la reutilización de activos estratégicos -terminales portuarios, infraestructura de captación de agua de mar, plantas desaladoras y espacios industriales con conexión eléctrica robusta- para ser aprovechados por la naciente industria del hidrógeno verde, otras actividades industriales intensivas en infraestructura o sectores emergentes como los Data Centers. Este potencial de reutilización constituye un elemento habilitante para facilitar la transición hacia nuevas actividades productivas de mayor sofisticación tecnológica.

### Hidrógeno verde y diversificación productiva regional

La ubicación estratégica de Mejillones, la infraestructura industrial existente y la disponibilidad de energías renovables en el norte de Chile la posicionan como una de las localidades más competitivas a nivel internacional para el desarrollo de plantas de producción de hidrógeno verde y derivados. Actualmente, diversos proyectos han manifestado preferencia por instalarse en la comuna, lo que confirma su atractivo logístico y energético.

El despliegue del H<sub>2</sub>V abre oportunidades de diversificación productiva en múltiples niveles, tal como lo declara el Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030<sup>2</sup>. La cadena de valor asociada involucra tecnologías y procesos químicos avanzados, infraestructura logística, desalinización y tratamiento de agua, diversos servicios especializados, etc. Un análisis prospectivo permitirá identificar áreas de innovación, potenciales encadenamientos aguas arriba y aguas abajo, así como nichos productivos emergentes en los cuales la región podría generar capacidades propias. Este tipo de análisis es coherente con la línea de acción 6.14 del citado Plan de Acción, orientada a fortalecer encadenamientos productivos locales.

A modo ilustrativo, la producción de hidrógeno verde, amoníaco y combustibles sintéticos puede constituir la base de un nuevo polo "hidroquímico" bajo en carbono, orientado a la producción de fertilizantes, explosivos u otros insumos químicos para la industria minera regional y mercados de exportación. Asimismo, el enfoque de economía circular puede adquirir un rol relevante: la región podría albergar plantas de reciclaje de módulos fotovoltaicos, reutilizar salmueras de plantas desaladoras o articular soluciones para residuos industriales de la minería. Este emergente complejo hidroquímico-industrial podría de este modo fortalecer la competitividad de la minería regional al proveer insumos descarbonizados y nuevas soluciones tecnológicas.

### Un Parque Industrial como palanca de una nueva matriz productiva regional

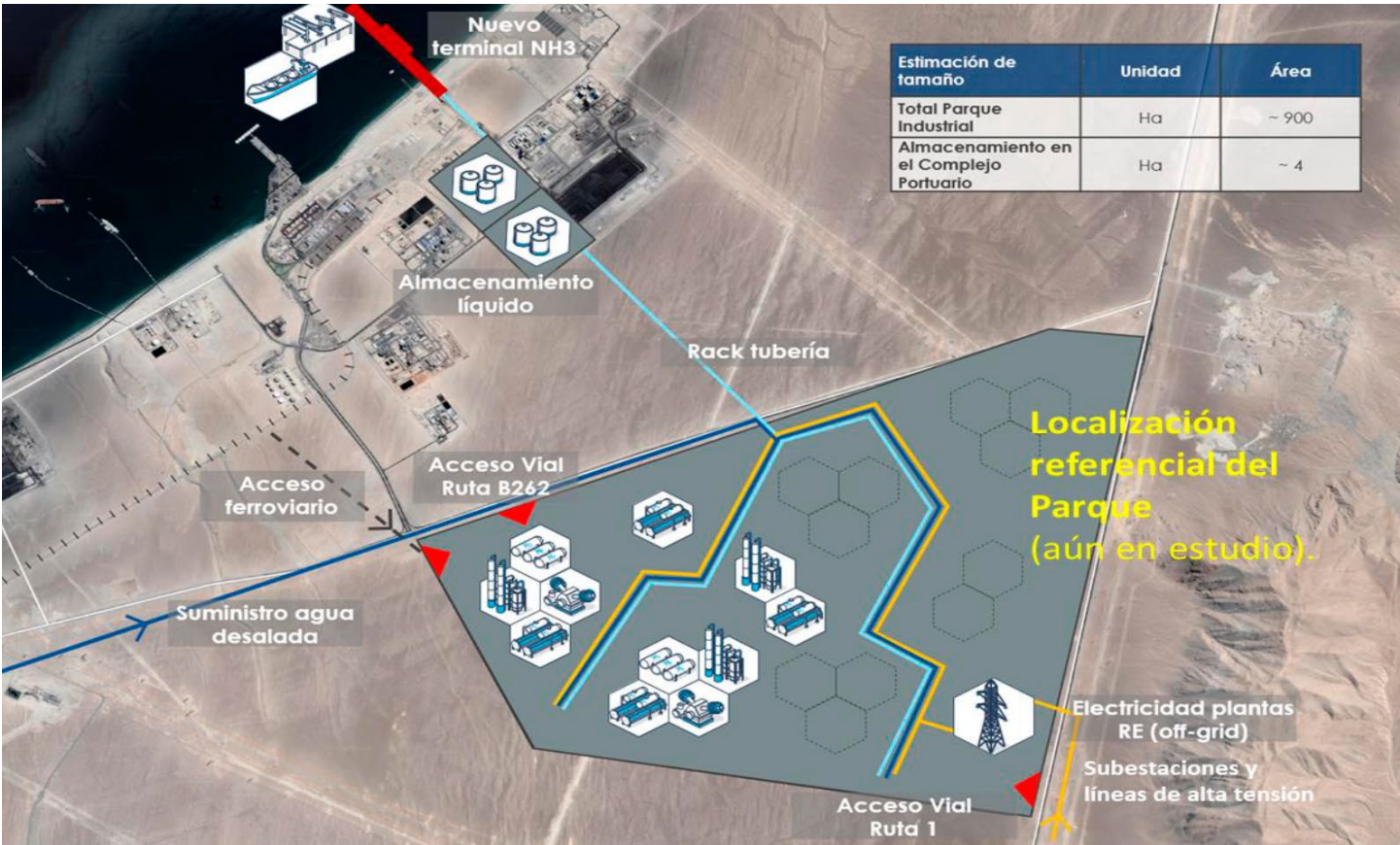
La convergencia entre la disponibilidad de infraestructura asociada a la desconexión de las centrales a carbón y el dinamismo de la industria del H<sub>2</sub>V crea condiciones propicias para una transformación estructural de la matriz productiva regional. No obstante, este proceso requiere una planificación adecuada y una colaboración público-privada robusta que permita articular intereses públicos, privados y comunitarios.

Una medida estratégica para habilitar esta transformación es el desarrollo de un Parque Industrial planificado, tal como se propone en el estudio "Solar NH<sub>3</sub>-Pool Chile: Conceptos para el desarrollo de un parque industrial sostenible de hidrógeno y amoníaco verde en la Región de Antofagasta"<sup>3</sup>. Este instrumento permitiría superar fallas de coordinación, reducir costos de inversión mediante el uso compartido de infraestructura y ordenar territorialmente el crecimiento industrial. En la figura adjunta se presenta un esquema del Plan Maestro de un Parque Industrial, diseñado con visión de largo plazo para viabilizar un desarrollo planificado.

### Plan Maestro del Parque Industrial Mejillones (propuesta conceptual)

#### Entre los beneficios del Parque Industrial propuesto se pueden destacar los siguientes:

- Uso eficiente del territorio y del borde costero, y reducción del fraccionamiento del suelo comunal con infraestructura lineal (ductos, líneas eléctricas, etc.).
- Facilitación del uso compartido de infraestructura habilitante, incluyendo terminales portuarios, plantas desaladoras, corredores de ductos y líneas eléctricas, accesos camineros y ferroviarios, etc., permitiendo así una reducción de las inversiones y un aprovechamiento de economías de escala y de ámbito.
- Atracción de inversiones mediante un entorno regulatorio claro, acceso más expedito a terrenos, infraestructura preparada y menores plazos y riesgos de desarrollo.
- Menores impactos ambientales, con líneas de base y áreas preevaluadas, facilidades para la obtención de permisos y para el monitoreo y mitigación ambientales.
- Participación temprana de la comunidad desde la etapa de diseño del Parque, lo que asegura la pertinencia social y sostenibilidad del desarrollo industrial.



Fuente: Solar NH<sub>3</sub>-Pool Chile. Conceptos para el desarrollo de un parque industrial sostenible de hidrógeno y amoníaco verde en la Región de Antofagasta, Soventix-GIZ, abril 2024.

- Impulso a encadenamientos productivos que integren a pymes, proveedores locales y servicios tecnológicos, y facilitación de la colaboración público-privada.

La experiencia internacional demuestra el potencial de este modelo. El Complejo Industrial y Portuario de Pecém en Ceará (Brasil), se ha convertido en un referente latinoamericano, atrayendo, en pocos años, inversiones anunciadas por más de USD 24.000 millones en proyectos de H<sub>2</sub>V, y generando un ecosistema industrial diversificado y competitivo.

Para lograr una integración territorial armónica, el Parque Industrial debe articularse con el desarrollo urbano de Mejillones, contemplando en el diseño también el equipamiento comunitario, el acceso a servicios, y la oferta de programas de capacitación y formación técnica especializada para la población local. Este componente urbano y social es esencial para asegurar que la transformación productiva se traduzca en desarrollo local y bienestar comunitario.

### Conclusiones

Mejillones se encuentra ante una coyuntura sin precedentes, marcada por el retiro de las centrales a carbón y el surgimiento de la industria del hidrógeno verde. Esta convergencia abre la posibilidad de transformar la matriz productiva regional hacia un modelo más sostenible, que genere nuevos encadenamientos productivos, impulsando la economía circular y contribuyendo a la descarbonización de la minería regional.

La infraestructura existente -terminales portuarios, aducciones de agua, plantas desaladoras, líneas eléctricas y suelos industriales equipados- ofrece ventajas habilitantes difíciles de replicar en otros territorios. En este contexto, un Parque Industrial planificado surge como una palanca efectiva para articular la reconversión energética, el desarrollo de una industria hidroquímica y la diversificación productiva regional. Su implementación permitiría ordenar el territorio, facilitar el uso compartido de la infraestructura, atraer inversiones, maximizar sinergias y promover la participación incidente de

las comunidades y de nuevos actores del ecosistema productivo, incluyendo pymes y proveedores locales.

Finalmente, la transición hacia una nueva matriz productiva exige un fortalecimiento paralelo de las capacidades técnicas y profesionales, así como el involucramiento temprano de las comunidades e inversiones en equipamiento urbano, para que ella aporte efectivamente al desarrollo comunal y la calidad de vida de los habitantes. Solo mediante una planificación con visión de largo plazo y una colaboración efectiva entre el sector público y privado será posible aprovechar plenamente la oportunidad histórica que hoy se abre para Mejillones y la región.



## EL ROL DEL HIDRÓGENO EN LA TRANSFORMACIÓN HACIA UNA INDUSTRIA SOSTENIBLE

### ERIK VAN DER HEIJDEN

Business Manager  
Energy Transition  
Port of Rotterdam

El mercado global del hidrógeno verde ha experimentado una rápida evolución durante la última década. Inicialmente caracterizado por altas expectativas y cronogramas ambiciosos, el sector está entrando ahora en una fase más madura, marcada por evaluaciones realistas de los desafíos tecnológicos, financieros y regulatorios. No obstante, el hidrógeno verde continúa siendo ampliamente considerado como un elemento clave en la descarbonización de largo plazo del sistema energético global y de los procesos industriales.

Durante los últimos cinco años, los gobiernos, las industrias y las instituciones internacionales han reconocido cada vez más el potencial del hidrógeno para apoyar la transición hacia la neutralidad de carbono. Se han desarrollado numerosas estrategias nacionales de hidrógeno y empresas de distintos sectores han explorado proyectos para producir hidrógeno y sus derivados. Grandes polos logísticos e industriales, como el Puerto de Rotterdam, se han posicionado tempranamente en este ecosistema emergente, anticipando el rol estratégico del hidrógeno en el comercio energético del futuro.

En esta etapa inicial, la economía del hidrógeno experimentó un período de gran entusiasmo. Los gobiernos anunciaron marcos de política pública, los inversionistas promovieron proyectos a gran escala y muchos países, incluido Chile, comenzaron a considerar el hidrógeno como una oportunidad estratégica para el desarrollo económico y la transformación industrial. En ese momento, se creía ampliamente que una economía del hidrógeno plenamente operativa podría surgir en un período relativamente corto, con una producción y comercio significativos ya en funcionamiento hacia 2030.

Sin embargo, esta perspectiva resultó ser algo optimista. El desarrollo de una nueva industria energética global requiere infraestructura compleja, certeza regulatoria, despliegue

tecnológico e inversiones a gran escala. Como resultado, los plazos se han ido ajustando gradualmente. Esto no implica una disminución en la importancia del hidrógeno, sino que refleja el proceso natural de maduración típico de las tecnologías energéticas emergentes.

La experiencia histórica de otras tecnologías renovables ofrece una comparación útil. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica marina requirieron varias décadas para evolucionar desde tecnologías de nicho dependientes de subsidios hacia industrias maduras capaces de competir en los mercados energéticos globales. El hidrógeno parece estar siguiendo una trayectoria similar. La fase temprana se caracteriza por experimentación, desarrollo de políticas públicas y proyectos piloto, mientras que el despliegue a gran escala se espera que se acelere en las próximas décadas.

Otra dinámica observada en el sector del hidrógeno es la aparición de un proceso de filtrado entre proyectos. En los primeros años, el fuerte interés global por el hidrógeno condujo a una proliferación de iniciativas. Algunos de estos proyectos fueron desarrollados por actores industriales experimentados, con conocimientos tecnológicos consolidados y capacidad financiera. Otros, sin embargo, tenían un carácter más especulativo, motivados por la rápida expansión del discurso global en torno al hidrógeno.

A medida que el mercado evoluciona, los proyectos con bases económicas y técnicas sólidas continúan avanzando, mientras que otros se retrasan o se cancelan. Este proceso de filtrado contribuye a la consolidación y profesionalización del sector. En última instancia, los proyectos que avanzan son aquellos que demuestran modelos de negocio creíbles, viabilidad tecnológica y acceso a mercados confiables.

Uno de los factores más críticos que influyen en la viabilidad de los proyectos de hidrógeno verde es la existencia de acuerdos estables de compra de largo plazo (*off-take agreements*). Las grandes inversiones en electrolizadores y en infraestructura asociada no pueden justificarse sin una demanda clara por parte de compradores. Por ello, los productores buscan acuerdos de largo plazo que garanticen que el hidrógeno o sus derivados serán adquiridos una vez que la producción comience.

Este desafío es particularmente evidente en industrias pesadas como el acero, los químicos y la refinación. En Europa, el hidrógeno ha sido ampliamente discutido como una posible vía para descarbonizar la industria del acero mediante el reemplazo de combustibles fósiles en los procesos productivos. Sin embargo, la conversión de instalaciones industriales existentes requiere inversiones de capital masivas, y las empresas que operan en mercados globales competitivos son cautelosas a la hora de comprometerse con tales transformaciones sin contar con certeza regulatoria.

La diferencia de costos entre el hidrógeno verde y el hidrógeno convencional sigue siendo otro tema clave. Debido a que el hidrógeno verde es actualmente más costoso de producir, las industrias requieren marcos de política pública que aseguren una competencia justa y que recompensen la producción baja en carbono. Por ello, los sistemas de certificación, los mecanismos de fijación de precios al carbono y los estándares regulatorios son esenciales para permitir el surgimiento de mercados viables de hidrógeno.

A pesar de estos desafíos, ya se observan avances tangibles. En varias regiones, los primeros electrolizadores a gran escala se encuentran en construcción, se está desarrollando infraestructura de hidrógeno y comienzan a realizarse las primeras exportaciones de amoníaco verde. Estos desarrollos sugieren que el sector está transitando desde una etapa conceptual hacia una implementación práctica, aunque a un ritmo más lento de lo esperado inicialmente.

Dentro de este panorama en evolución, Chile ocupa una posición particularmente prometedora. Uno de los requisitos fundamentales para producir hidrógeno verde de manera competitiva es el acceso a electricidad renovable abundante y de bajo costo. Chile posee recursos naturales excepcionales en este ámbito. La región de Magallanes ofrece algunas de las condiciones de viento más fuertes y constantes del mundo, mientras que la región de Antofagasta se beneficia de una irradiación solar extraordinaria.

Estas condiciones proporcionan una base sólida para producir hidrógeno renovable a costos competitivos en el largo plazo. Además, la estabilidad económica de Chile y su apertura a la inversión internacional contribuyen a crear un entorno favorable para proyectos energéticos a gran escala.

Chile también posee una importante base industrial, particularmente en el sector minero. Esto genera oportunidades para la demanda interna de hidrógeno, ya que el hidrógeno verde podría contribuir a la descarbonización de las operaciones mineras y de los procesos industriales asociados. La presencia de demanda local puede desempeñar un papel crucial en las primeras etapas del desarrollo del mercado, ya que permite que los proyectos diversifiquen sus fuentes de ingreso en lugar de depender exclusivamente de las exportaciones.

Sin embargo, Chile también enfrenta desafíos estructurales. La producción de hidrógeno a gran escala requiere inversiones sustanciales en infraestructura, incluyendo líneas de transmisión, gasoductos, plantas desalinizadoras, sistemas de almacenamiento y terminales de exportación. En algunas regiones, dicha infraestructura aún es limitada o inexistente, lo que incrementa la escala y la complejidad de las inversiones iniciales.

Por esta razón, los primeros proyectos podrían comenzar inicialmente a menor escala, expandiéndose gradualmente a medida que se desarrolla la infraestructura y madura el mercado. Las estrategias de desarrollo por fases permiten a los inversionistas reducir riesgos mientras construyen experiencia y capacidades dentro de la emergente economía del hidrógeno. Además de la producción de hidrógeno en sí, los países que aspiran a convertirse en grandes exportadores también deberían considerar oportunidades a lo largo de toda la cadena de valor. El hidrógeno puede transformarse en derivados como amoníaco, combustibles sintéticos y combustibles sostenibles para la aviación, que son más fáciles de transportar y pueden ofrecer mayor valor económico.

La producción doméstica de estos derivados puede permitir que los países no solo exporten vectores energéticos, sino que también desarrollen nuevos sectores industriales. Por ejemplo, el hidrógeno podría apoyar la producción de acero verde u otros materiales descarbonizados, generando actividad económica adicional antes de que los productos lleguen a los mercados internacionales.



El Puerto de Rotterdam ya cuenta con un amplio ecosistema para el almacenamiento de graneles líquidos, entre ellos amoníaco, el cual se está transformando gradualmente para facilitar los flujos de importación de combustibles renovables y derivados del hidrógeno.

Otra oportunidad estratégica se encuentra en la logística marítima. A medida que la industria del transporte marítimo transita hacia combustibles bajos en carbono, los puertos capaces de suministrar combustibles verdes como amoníaco o metanol podrían convertirse en nodos clave en las futuras cadenas globales de suministro energético. Los países con una infraestructura portuaria sólida podrían, por tanto, beneficiarse del desarrollo de servicios de abastecimiento (*bunkering*) de combustibles marítimos limpios.

El éxito de estas iniciativas depende, en última instancia, de una colaboración efectiva entre actores públicos y privados. Los gobiernos desempeñan un papel fundamental en el establecimiento de marcos regulatorios, la coordinación de la planificación de infraestructura y la garantía de condiciones equitativas para los inversionistas. La inversión pública o la planificación en infraestructura compartida, como gasoductos, redes energéticas o instalaciones portuarias, puede reducir significativamente los riesgos de los proyectos y facilitar la participación del sector privado.

Al mismo tiempo, las empresas privadas siguen siendo esenciales para desarrollar instalaciones de producción, desplegar tecnologías y escalar las operaciones industriales. Por lo tanto, una asociación equilibrada entre instituciones públicas y actores privados es fundamental para permitir la transición desde proyectos piloto hacia una economía del hidrógeno plenamente funcional.

En conclusión, aunque el mercado global del hidrógeno puede estar desarrollándose de manera más gradual de lo que se anticipaba inicialmente, sus perspectivas de largo plazo siguen siendo altamente prometedoras. La transición hacia sistemas energéticos y procesos industriales carbono-neutrales probablemente requerirá del hidrógeno y sus derivados como componentes clave. Países como Chile, dotados de recursos renovables excepcionales y un fuerte potencial económico, se encuentran bien posicionados para participar en este mercado global emergente. Con planificación estratégica, desarrollo de infraestructura y una colaboración público-privada efectiva, el hidrógeno verde podría convertirse en un pilar importante tanto de los esfuerzos globales de descarbonización como del desarrollo económico sostenible.

## 3.4 DIMENSIÓN COMPETITIVIDAD Y DESARROLLO PAÍS

La irrupción del hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) en la agenda energética global abre una oportunidad estratégica para repensar el posicionamiento productivo de Chile en el escenario internacional. Más allá de su rol como vector energético para la descarbonización, el desarrollo de esta industria plantea la posibilidad de articular nuevas cadenas de valor, fortalecer la base tecnológica nacional y diversificar la matriz exportadora del país. En este contexto, la competitividad asociada al H<sub>2</sub>V no depende exclusivamente de las ventajas naturales disponibles, sino de la capacidad de construir un ecosistema productivo que integre infraestructura, capital humano, innovación, financiamiento y acceso a mercados internacionales.

Desde esta perspectiva, el hidrógeno verde debe ser entendido como un habilitador de transformaciones estructurales que pueden impactar significativamente en el desarrollo económico y territorial de Chile. Su despliegue implica la convergencia de múltiples sectores -energía, minería, logística, industria química y transporte- generando oportunidades para el surgimiento de encadenamientos productivos, nuevas capacidades industriales y servicios especializados. En la medida en que estas dinámicas se consoliden, el H<sub>2</sub>V puede contribuir no solo a la generación de exportaciones de alto valor agregado, sino también a la creación de empleo calificado y al fortalecimiento de capacidades tecnológicas nacionales.

La competitividad de esta industria, sin embargo, se define en un contexto internacional altamente dinámico, donde distintos países buscan posicionarse como polos de producción, transformación y comercio de hidrógeno y sus derivados. En este escenario, factores como el costo de producción, la disponibilidad de infraestructura crítica, la estabilidad regulatoria, la trazabilidad ambiental y la capacidad de innovación adquieren un rol determinante. La inserción estratégica de Chile en este nuevo mercado energético global requerirá, por tanto, una combinación de ventajas comparativas naturales con políticas públicas, instrumentos financieros y marcos institucionales capaces de acelerar la maduración de la industria.

En consecuencia, la dimensión de competitividad y desarrollo país invita a analizar el hidrógeno verde desde una perspectiva sistémica, considerando tanto las condiciones que permiten a Chile posicionarse en la economía global del hidrógeno como los impactos económicos, tecnológicos y territoriales asociados a su despliegue. Más que una industria aislada, el H<sub>2</sub>V se perfila como un eje articulador de una nueva estrategia de desarrollo productivo, donde la transición energética se entrelaza con la innovación, la diversificación económica y la construcción de ventajas competitivas sostenibles para el país.



## MODELOS DE INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO VERDE

### FEDERICO DEL MONDO

Dottorando | Ph.D. Student

Dipartimento di Ingegneria e Architettura | Department of Engineering and Architecture

Università di Trieste | University of Trieste

El despliegue del hidrógeno verde está avanzando y, posiblemente, entrando en una fase más concreta, marcada por el inicio efectivo de la construcción de los primeros proyectos a escala industrial. Este proceso se desarrolla con ritmos diferentes en cada región del mundo, condicionado por factores geográficos, tecnológicos, regulatorios y socioeconómicos.

Al analizar la cadena de valor del hidrógeno verde, se observa que la diversidad de tecnologías de generación eléctrica, electrólisis, almacenamiento y transporte genera múltiples arquitecturas posibles, cada una condicionada por las características del entorno y por los requisitos específicos de demanda.

Los modelos integrados que ofrecen herramientas para la planificación y la optimización de la cadena de valor del hidrógeno están adquiriendo un interés y una relevancia cada vez mayores, considerando los desafíos que implica el desarrollo de nuevas infraestructuras a escala industrial<sup>1</sup>.

Las tipologías de modelos de optimización, aunque interrelacionadas entre sí, pueden clasificarse en dos categorías que abordan aspectos complementarios del desarrollo de proyectos basados en hidrógeno. Por un lado, se encuentran los modelos orientados a la optimización del diseño de las plantas, en los cuales el objetivo principal es minimizar los costos asociados a la inversión inicial, garantizando el cumplimiento de una determinada demanda de hidrógeno. Por otro lado, se encuentran los modelos más centrados en la optimización de la operación, en los cuales la meta es reducir al mínimo los costos operativos.

Algunos de los parámetros variables de carácter sistémico que los modelos holísticos avanzados de optimización son capaces de incorporar y evaluar son, por ejemplo:

- **Configuración de las plantas:** incluye no solo la selección y el dimensionamiento de las tecnologías, sino también la consideración de limitaciones ambientales, acceso a recursos locales, condicionantes logísticos, disponibilidad y costo del terreno, restricciones espaciales para la instalación de almacenamiento y compatibilidad con infraestructuras existentes.
- **La eficiencia energética de los sistemas:** la cadena de producción del hidrógeno verde es un proceso de consumo intensivo de energía. El punto crítico sigue siendo el proceso de electrólisis y el punto de funcionamiento óptimo de un electrolizador, incluyendo sus sistemas auxiliares, se encuentra alrededor del 35% de la potencia nominal, alcanzando una eficiencia aproximada del 65%, equivalente a unos 51 kWh/kgH<sub>2</sub> (electrolizadores de membrana de intercambio de protones)<sup>2</sup>.
- **Escala de las plantas:** las instalaciones de mayor tamaño permiten distribuir los costes fijos de ingeniería, permisos, infraestructura sobre un volumen de producción más elevado, reduciendo así el gasto de capital (CAPEX) por unidad de hidrógeno producido. En [3](#) se ha identificado una reducción del coste nivelado del hidrógeno del 49% en sistemas basados en energía fotovoltaica considerando una variación del tamaño de la planta desde 10 MW hasta 1 GW.
- **La disponibilidad, variabilidad e intermitencia de los recursos renovables:** estos factores influyen de manera decisiva en el coste nivelado de la energía, como se ha identificado en [4](#). Además, la variabilidad de la generación renovable afecta directamente a las condiciones de los contratos de compra de energía a largo plazo (PPA - *Power Purchase Agreement*), tal como se indica en [5](#), donde el 40% de los PPAs a precio fijo en Europa presentan valores comprendidos entre 100 y 200 €/MWh.

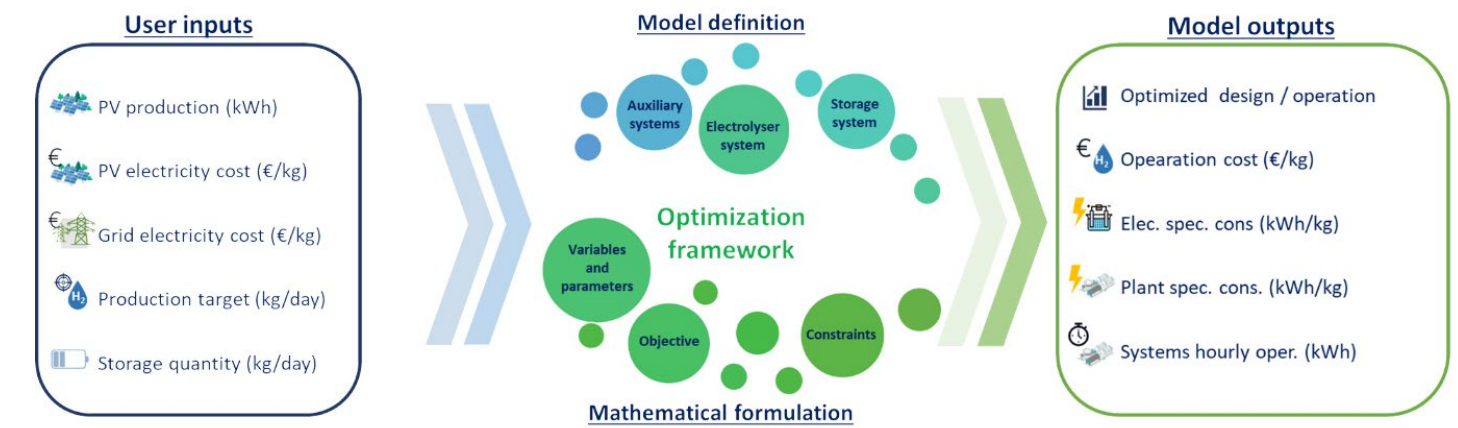


Figura 1: Esquema conceptual de funcionamiento de los modelos de optimización.

- **Flexibilidad operativa y gestión dinámica del sistema:** el funcionamiento de las plantas de hidrógeno requiere un grado significativo de flexibilidad para adaptarse a la variabilidad de la producción renovable, a las fluctuaciones de la demanda y a los precios dinámicos de la electricidad.

Estos elementos influyen de manera determinante en el costo nivelado del hidrógeno y definen un conjunto complejo de factores variables y operativos.

Además, un escenario de rápido crecimiento, caracterizado por la implementación de nuevos sistemas a escala industrial, exige herramientas avanzadas que apoyen tanto el diseño como la gestión operativa de la cadena de valor del hidrógeno, capaces de orientar de forma segura las inversiones y la gestión de la infraestructura.

En la Figura 1 se presenta un esquema conceptual de los modelos que se analizarán en la sección siguiente, en el cual se ilustran, a modo de ejemplo, algunas de las variables de entrada mencionadas previamente, así como diversos tipos de resultados que estos modelos pueden generar.

### Marco conceptual en la modelización de sistemas de hidrógeno

Con el fin de comprender el potencial de los modelos orientados a la optimización del diseño y gestión operativa de plantas de hidrógeno en sistemas energéticos complejos, se presentan a continuación algunos ejemplos representativos.

Unos ejemplos representativos de este enfoque son los modelos presentados en [6](#), [7](#) para evaluar distintas configuraciones y tipología de sistemas de conversión y almacenamiento de energía en un área portuaria industrial considerando una determinada demanda energética. El modelo permite dimensionar el diseño de la planta para satisfacer la demanda energética, identificando el panorama completo de la cadena de valor necesaria y proporcionando información útil para la toma de decisiones económicas, especialmente en términos de la inversión requerida.

En el caso de Mejillones, la misma metodología propuesta en los artículos presentado podría aplicarse considerando el área portuaria como un hub de producción con una determinada demanda anual de hidrógeno que debe ser satisfecha. Además, la metodología posibilita el análisis de múltiples escenarios de desarrollo, la identificación temprana de restricciones y puntos críticos dentro de la cadena de valor, y la evaluación de las medidas necesarias para su mitigación antes del proceso de toma de decisiones.

Modelos de características similares se están empleando en el desarrollo en el marco del Valle del Hidrógeno del Adriático Norte (North Adriatic Hydrogen Valley - NAHV)<sup>8</sup>, permitiendo la identificación de las configuraciones tecnológicas óptimas de las plantas de producción y distribución de hidrógeno.



Figura 2: Mapa de funcionamiento de planta de hidrogeno y gastos horarios de los sistemas.

En NAHV se están desarrollando también modelos orientados a la optimización de la gestión diaria de los sistemas de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Estos modelos buscan minimizar las pérdidas de eficiencia a lo largo de la cadena de valor, reducir los costes operativos de producción y garantizar el suministro necesario de hidrógeno, tomando decisiones en tiempo real ante las variaciones en las condiciones de generación fotovoltaica.

Los modelos de optimización y control dinámico permiten, además, mitigar problemas asociados a la sobreproducción de hidrógeno por encima de la capacidad máxima de almacenamiento, evitando así operaciones de *stand-by* o apagado de los electrolizadores y contribuyendo a aumentar la durabilidad de los equipos.

Modelos de esta tipología son capaces de proporcionar instrucciones operativas a los gestores de planta. Por ejemplo, en la Figura 2 puede observarse el mapa de funcionamiento del sistema junto con los correspondientes consumos energéticos y entonces determinar el consumo específico de la planta y los relativos costos operativos.

En este ejemplo se considera una producción objetivo de 1 t/día de hidrógeno para un sistema que integra diversas fuentes y componentes. El sistema contempla la posibilidad de adquirir energía desde la red mediante un contrato de compra de energía a largo plazo, junto con una planta fotovoltaica dedicada exclusivamente a la producción de hidrógeno y un sistema de baterías destinado a mitigar las reducciones de potencia derivadas de la variabilidad e intermitencia de la generación

solar, además de reducir el punto de funcionamiento del electrolizador. Asimismo, el sistema incluye un electrolizador de 5 MW, un sistema de compresión, un almacenamiento a 500 bar y, finalmente, la distribución del hidrógeno mediante camiones.

**Conclusiones**

Chile, y en particular la comuna de Mejillones, constituye un contexto especialmente prometedor para el desarrollo de proyectos a gran escala gracias a su excepcional disponibilidad de recursos renovables, al bajo costo de la energía proveniente de la red -comparado a escenarios europeos- y a la amplia disponibilidad de terreno para la construcción de instalaciones de gran tamaño, condiciones que permitirían alcanzar costos de producción de hidrógeno competitivos y atractivos.

El costo del hidrógeno constituye, sin embargo, una de las principales barreras para su despliegue. Los resultados preliminares de los modelos desarrollados, en escenarios europeos muestran, en la gran mayoría de los casos, que el componente más significativo del costo específico proviene de los gastos operativos de producción, especialmente cuando el hidrógeno verde se genera a partir de un mix energético que incluye un determinado nivel de electricidad proveniente de la red. De hecho, en algunos países el precio de la energía renovable suministrada mediante contratos de compra de energía a largo plazo puede situarse en el orden de cientos de euros por MWh cuando se consideran contratos a precio fijo, lo que puede llevar el precio del hidrógeno también a 12-15 euros por kilogramo cuando se consideran plantas en el orden de 5-10 MW.

Los resultados preliminares de los modelos de gestión operativa de sistemas de producción de hidrógeno verde evidencian que es posible alcanzar hasta un 10% de reducción en los costos operativos por kilogramo de hidrógeno producido, considerando un objetivo específico de producción y operando el sistema de electrólisis en su punto de funcionamiento óptimo.

Actualmente, la literatura hace referencia a datos aproximados, que son adecuados para un primer análisis, pero que en ocasiones pueden diferir del caso específico de aplicación sobre todo cuando se evalúa el costo de inversión. Por lo tanto, el desarrollo de modelos detallados que consideren un caso concreto, basados en datos específicos de la tecnología y en costes reales de inversión, constituye una herramienta eficaz para avanzar de manera significativa en los estudios de viabilidad y evaluar adecuadamente las oportunidades de inversión.



## VENTAJAS COMPARATIVAS Y COMPETITIVIDAD EN EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE: EL CASO MEJILLONES COMO PLATAFORMA ESTRATÉGICA

**RAMÓN MOLINA**

Director ejecutivo

Centro de Innovación UC Anacleto Angelini

La publicación **“Visiones, modelos y experiencias sobre el despliegue del Hidrógeno Verde (H<sub>2</sub>V) para Chile. Caso Mejillones: una perspectiva multidisciplinaria”** invita a observar el desarrollo del hidrógeno verde no solo como una apuesta tecnológica o ambiental, sino como una decisión estratégica de país. En este contexto, la dimensión de ventajas comparativas y competitividad se vuelve central: ¿qué condiciones reales tiene Chile para transformarse en un actor relevante en esta industria emergente?, ¿qué hace del caso Mejillones un punto particularmente atractivo para pensar el despliegue a escala?

En un escenario global marcado por la urgencia climática, la reconfiguración energética y una creciente competencia internacional por liderar cadenas de valor limpias, Chile aparece con atributos singulares. Sin embargo, transformar ventajas naturales en competitividad efectiva requiere mucho más que recursos renovables: implica capacidades industriales, institucionalidad, financiamiento, articulación territorial y visión de largo plazo.

### Chile y la promesa de una ventaja natural excepcional

Chile cuenta con una de las condiciones más favorables del mundo para la producción de hidrógeno verde: su abundancia de energías renovables de bajo costo. El potencial solar del norte y el potencial eólico del sur posicionan al país como un candidato natural para generar electricidad limpia a gran escala, condición básica para producir H<sub>2</sub>V competitivo.

Esta ventaja comparativa -entendida como una dotación estructural del territorio- es relevante porque impacta directamente en el principal componente del costo del hidrógeno verde: la energía eléctrica. En un mercado donde la competitividad se definirá por precios, escalabilidad y confiabilidad, la capacidad de producir con costos decrecientes es un activo estratégico.

No obstante, esta ventaja, por sí sola, no garantiza liderazgo. La experiencia internacional demuestra que los países que logran posicionarse en industrias emergentes no son únicamente los que tienen mejores recursos naturales, sino aquellos que desarrollan ecosistemas productivos e institucionales capaces de capturar valor.

### Mejillones: infraestructura, localización y oportunidad industrial

Dentro del mapa chileno, Mejillones emerge como un caso particularmente significativo. Su historia como polo energético e industrial, su conectividad portuaria y su cercanía con centros productivos del Norte Grande configuran un entorno donde el hidrógeno verde puede desplegarse con condiciones habilitantes concretas.

A diferencia de otros territorios donde la infraestructura debe construirse desde cero, Mejillones cuenta con elementos críticos ya instalados: acceso logístico, presencia de industrias intensivas en energía, experiencia en operación de proyectos complejos y una ubicación estratégica para exportación hacia mercados asiáticos.

Esta base instalada reduce barreras iniciales y permite pensar en una transición más realista desde proyectos piloto hacia desarrollos industriales de escala. En términos competitivos, Mejillones ofrece algo clave: posibilidad de aceleración.

### Competitividad más allá del recurso: cadena de valor y sofisticación productiva

Una pregunta fundamental para Chile no es solo si puede producir hidrógeno verde barato, sino si puede construir una industria con encadenamientos, empleos, innovación y valor agregado.

La competitividad futura no se jugará únicamente en la exportación de moléculas, sino en el desarrollo de una cadena de valor completa: fabricación y mantenimiento de electrolizadores, servicios industriales especializados, logística avanzada, certificación, capital humano y conocimiento aplicado.

Aquí surge un desafío estratégico: evitar que el H<sub>2</sub>V se transforme en una industria extractiva del siglo XXI, donde el país exporta energía limpia sin capturar beneficios estructurales. Para que Chile sea competitivo de manera sostenible, debe avanzar hacia una economía del hidrógeno que integre capacidades locales, transferencia tecnológica y diversificación productiva.

Mejillones, por su perfil industrial, puede convertirse en un laboratorio privilegiado para este salto: desde infraestructura energética hacia sofisticación industrial verde.

### Ventajas competitivas dinámicas: institucionalidad, regulación y confianza

Las ventajas comparativas son condiciones dadas. La competitividad, en cambio, se construye. En este sentido, Chile enfrenta un conjunto de desafíos que definirán su posicionamiento real:

- Marcos regulatorios claros y ágiles
- Permisos ambientales modernos y eficientes
- Planificación territorial con legitimidad social
- Disponibilidad de agua y gestión sostenible
- Acceso a financiamiento competitivo
- Coordinación público-privada efectiva

En industrias emergentes, la velocidad institucional es tan importante como la velocidad tecnológica. Los países que lideren serán aquellos capaces de reducir incertidumbre, atraer inversión y generar confianza de largo plazo.

Mejillones también pone sobre la mesa una dimensión crítica: la relación con el territorio. La competitividad global no puede construirse sin sostenibilidad local. La aceptación social, el desarrollo de proveedores regionales y el impacto en empleo serán determinantes.

### Chile en el escenario global: competencia y oportunidad geopolítica

La carrera por el hidrógeno verde ya comenzó. Europa, Estados Unidos, Australia, Marruecos y Arabia Saudita están invirtiendo agresivamente para posicionarse como *hubs* energéticos del futuro.

Chile compite con actores que no solo tienen recursos renovables, sino también subsidios industriales, políticas activas y capacidades logísticas avanzadas. Por lo tanto, la competitividad chilena dependerá de su capacidad de actuar con estrategia nacional: priorizar territorios, coordinar actores y construir ventajas dinámicas antes de que el mercado se consolide.

Mejillones puede ser una plataforma clave en esa estrategia, no solo por sus condiciones técnicas, sino por su potencial como punto de convergencia entre industria, exportación, innovación y transición justa.

### De la ventaja natural a una estrategia país

Chile tiene una oportunidad histórica: transformar su potencial renovable en una nueva industria habilitante para el desarrollo sostenible, la reindustrialización verde y el liderazgo climático. Pero esa oportunidad no se realizará automáticamente. Requiere una visión estratégica que convierta ventajas comparativas en competitividad estructural. Requiere políticas coherentes, capacidades industriales, alianzas internacionales y, sobre todo, una articulación territorial legítima.

En este camino, Mejillones representa mucho más que un caso local: es un nodo donde se cruzan las condiciones materiales, industriales y geopolíticas del Chile que puede emerger en la economía energética del futuro.

El desafío está planteado: no solo producir hidrógeno verde, sino construir una plataforma competitiva, sofisticada y sostenible que permita al país capturar valor, impulsar innovación y aportar al mundo desde una posición estratégica.



## EL ROL DEL AMONIACO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

**HANS VRIJENHOEF**  
CEO  
Proton Ventures BV

¿Existe realmente un rol para el amoníaco en la transición energética global? ¿O es simplemente una moda pasajera? ¿Debemos enfocarnos en el carbón como fuente de energía barata, en la energía nuclear, o continuar utilizando petróleo y gas natural?

El debate político actual muestra diversas respuestas, y ninguna parece necesariamente equivocada. Pero entonces, ¿cuál es el camino correcto para nuestra sociedad?

¿Queremos algo barato y seguro, o estamos dispuestos a asumir riesgos -riesgos calculados- y los efectos asociados a estos combustibles? Esto requiere una consideración cuidadosa de todos los actores en las cadenas de suministro: compañías petroleras, desarrolladores de energías renovables, usuarios finales en la industria química, consumidores, directores de empresas, trabajadores del carbón, ONG y muchos otros actores que incluso podríamos no tener en mente. Cada uno tiene su propia visión sobre el futuro de la energía, pero ¿estamos viendo el panorama completo?

Con más de 40 años de experiencia en el debate sobre energía limpia en los Países Bajos y en Europa, he observado cómo la visión ha cambiado según los distintos gobiernos y cómo seguirá cambiando con el tiempo. La energía es compleja y muchos de nosotros no la comprendemos completamente. Conocemos los sistemas energéticos que utilizamos hoy; en cambio, tendemos a evitar pensar en lo que deberíamos usar mañana. Nuestras vidas son cómodas, y el cambio genera incertidumbre, riesgos y nuevas formas de trabajar y pensar.

Comencemos con los desafíos actuales: ¿Hay suficiente agua? ¿Hay suficiente alimento? ¿Hay suficiente energía?

Para muchas personas en el mundo, éstas son preocupaciones reales. Garantizar estas necesidades básicas es un requisito

esencial para aspirar a una vida mejor. La buena noticia es que desde hace más de 100 años el amoníaco ha sido la base energética que permite alimentar al mundo. Sin amoníaco, la disponibilidad de alimentos sería limitada y podrían generarse conflictos. Basta recordar las guerras entre Chile y Perú por el guano a fines del siglo XIX (1879-1884). Chile sabe lo que significa disponer de fertilizantes.

El agua también es fundamental. Muchas sociedades desarrolladas cuentan con infraestructura que asegura su suministro, pero esto no ocurre en todas partes. La energía es otra necesidad básica para la vida moderna, junto con otros aspectos sociales y culturales. Por ello, enfoquémonos en la energía y su transición futura.

Los recursos fósiles son limitados. Aunque existen importantes reservas de petróleo y gas en el mundo, no siempre son fáciles ni económicos de explotar. Las grandes compañías petroleras sostienen que hay reservas suficientes, sin embargo los precios tienden a subir debido a razones geopolíticas, guerras, problemas de suministro o mayores costos de exploración. Además, estos recursos no están distribuidos equitativamente; Chile, por ejemplo, posee reservas limitadas en comparación con otras naciones.

El carbón, considerado a menudo la fuente más barata, tiene impactos significativos: emisiones asociadas a la minería, riesgos para la salud laboral y una mayor huella de CO<sub>2</sub> que el petróleo y el gas. Mientras nadie pague plenamente por las emisiones de CO<sub>2</sub>, los combustibles fósiles seguirán siendo económicamente atractivos.

Las energías renovables -solar, eólica e hidráulica- presentan oportunidades y limitaciones. No pueden producirse en todas partes a bajo costo. Sin embargo, el Desierto de Atacama y el sur de Chile son regiones excepcionales para capturar energía

solar y eólica. Surgen preguntas: ¿existen impactos ambientales no deseados? ¿Las comunidades locales lo aceptan? Además, la demanda energética suele estar lejos de los lugares donde se genera. Aun así, debemos considerar el calentamiento global, los costos y la seguridad del suministro.

Lo mismo aplica a los equipos que utilizan energía: turbinas, motores, sistemas de calefacción. El uso de combustibles fósiles genera emisiones que pueden reducirse mediante captura de CO<sub>2</sub>, tecnologías de reducción de NOx o pirólisis, pero todo ello implica costos adicionales. ¿Quién asume esos costos?

En cuanto al transporte, ¿necesitamos todos nuestros vehículos? Y si es así, ¿deben funcionar con combustibles fósiles o renovables? Actualmente no existe infraestructura global suficiente para que todos los vehículos funcionen con electricidad. Las redes eléctricas deben ampliarse, lo que implica mayores inversiones, salvo que se produzca y consuma energía localmente con suficiente capacidad de almacenamiento.

En Chile y en el mundo, se espera que el consumo global de energía continúe creciendo. La producción y consumo local de energías renovables puede moderar este crecimiento, aunque estas cifras muchas veces no se reflejan plenamente en las estadísticas comerciales. Los hogares pueden alternar entre leña y electricidad para calefacción según el costo o la preferencia. La industria optará por la fuente más barata, pero los gobiernos exigirán procesos más limpios. ¿O aceptaremos trasladar industrias más contaminantes a países menos desarrollados?

El mundo, lento pero inevitablemente, se verá obligado a utilizar energía limpia y productos fabricados con energía limpia y materias primas más limpias. Esto requiere fuentes sin emisiones: hidroeléctrica, solar, eólica o nuclear, gestionadas de manera responsable en términos de residuos y seguridad.

Cuando la electricidad renovable puede producirse al menor costo -como la eólica en Chile, Namibia, Brasil o Australia- se abre la posibilidad de abastecer al mundo con energía limpia. El desafío es transportarla eficientemente a regiones donde la energía es más costosa.

Durante más de 100 años, el amoníaco ha sido uno de los vectores energéticos más transportados a nivel mundial (aunque a menudo se le denomine simplemente fertilizante), después del petróleo y el gas.

La producción de energía solar y eólica a bajo costo en Chile ofrece oportunidades no solo para el consumo local, sino también para la exportación, la creación de empleo y el desarrollo de nuevas industrias. El amoníaco es, por lejos, una de las alternativas más competitivas para transportar energía a largas distancias en comparación con el hidrógeno o los combustibles sostenibles de aviación (SAF). Aunque el transporte de hidrógeno es posible, la producción integrada de amoníaco mediante tecnologías avanzadas como SOEC puede reducir significativamente los costos de inversión y producción, haciendo más eficiente el transporte energético en forma de amoníaco.

La industria marítima ya se perfila como un habilitador clave, con empresas navieras considerando el amoníaco como combustible de propulsión y con una creciente red de terminales para abastecimiento. El transporte mundial de amoníaco tiene décadas de experiencia.

Más terminales significan mayores oportunidades industriales cercanas a estos centros logísticos, impulsando desarrollo económico local con energía limpia y asequible. Si se necesita hidrógeno como insumo químico, puede reconvertirse desde el amoníaco. Pero como portador de energía renovable chilena, el amoníaco puede utilizarse directamente.

Es fundamental que Chile y los países importadores -como Europa- reconozcan que esta energía puede formar parte esencial del ecosistema energético futuro. Políticos, ONG y líderes empresariales deben respaldar una infraestructura basada en amoníaco que compita y reemplace progresivamente a los combustibles fósiles.

Los primeros adoptantes serán los campeones del futuro. Se requiere un terreno competitivo justo para que el amoníaco compita con otras fuentes. No debería descartarse por percepciones como "el amoníaco huele mal". En el pasado también se decía que "el dinero huele mal". Utilizado de manera responsable y segura, el amoníaco puede alimentar al mundo y proporcionar energía asequible.

El amoníaco tiene un futuro sólido en la matriz energética mundial si comprendemos su potencial único para salvar vidas, producir alimentos, transportar energía limpia y contribuir a una mejor calidad de vida.



## IMAGINAR, ACTUAR E INSTITUCIONALIZAR FUTUROS DESEABLES: DISEÑAR EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE

**PAULA WUTH**

Profesora Asociada

Escuela Diseño

Pontificia Universidad Católica de Chile

El entorno actual nos ha mostrado que intentar predecir el futuro resulta cada vez menos efectivo, anticiparlo se vuelve más complejo, y navegarlo -aunque posible- suele conducirnos a respuestas reactivas. Frente a transformaciones tecnológicas, climáticas y sociales de gran escala, surge entonces una pregunta distinta: ¿qué ocurre si, en lugar de intentar prever lo que vendrá, comenzamos a darle forma activamente al futuro que deseamos?

El despliegue del hidrógeno verde en Chile nos sitúa precisamente ante este cambio de perspectiva. Más que el desarrollo de una nueva industria energética, nos encontramos frente a un proceso que definirá trayectorias territoriales, productivas y sociales durante las próximas décadas. En territorios como Mejillones, donde convergen capital natural, infraestructura estratégica, comunidades locales, e hitos como la resolución ambiental unánime permiten avanzar hacia la escala industrial, las decisiones actuales ya no pertenecen únicamente al ámbito de la planificación: comienzan a materializar configuraciones concretas de futuro.

En este contexto, el desafío del hidrógeno verde no es exclusivamente tecnológico ni económico. Es, ante todo, un ejercicio colectivo de construcción de futuro país. Durante años, las organizaciones y gobiernos han recurrido a la prospectiva para explorar escenarios posibles. Sin embargo, investigaciones recientes han planteado un giro: el futuro no se limita a anticiparse, sino que se construye mediante prácticas presentes<sup>1</sup>. Dentro de este enfoque se encuentra el *future-making*, proponiendo invertir el punto de partida estratégico: imaginar futuros plurales y deseables para orientar las decisiones que tomamos hoy<sup>2-3</sup>.

Esta mirada adquiere especial sentido en Chile, donde el hidrógeno verde ha transitado rápidamente desde declaraciones estratégicas hacia iniciativas piloto, proyectos industriales y decisiones regulatorias concretas. Experiencias tempranas en el norte del país -como plantas piloto, programas de experimentación tecnológica y proyectos industriales actualmente en evaluación o aprobación ambiental- evidencian que el futuro ya no pertenece únicamente al plano de la planificación, sino a un proceso activo de materialización territorial. Cada nuevo proyecto no solo produce energía; produce también aprendizaje colectivo sobre cómo queremos desarrollar esta industria y qué impactos estamos dispuestos a promover o evitar.

Hablar de futuros deseables, sin embargo, no es trivial. El futuro no es único ni inevitable<sup>4</sup>; puede adoptar múltiples formas dependiendo de las decisiones que tomemos y de quiénes participen en ellas. Definir qué entendemos por un futuro deseable implica preguntarnos para quién lo es, qué valores lo sostienen y cómo se integran las perspectivas ambientales, sociales y económicas en esa definición. En el caso del hidrógeno verde, esta reflexión resulta especialmente crítica: la transición energética abre oportunidades extraordinarias de descarbonización, desarrollo regional y generación de empleo, pero también plantea interrogantes sobre gobernanza territorial, bienestar comunitario y sostenibilidad a largo plazo.

Así, el despliegue del hidrógeno verde puede entenderse como un proceso de aprendizaje progresivo, donde los proyectos cumplen un rol que trasciende su dimensión productiva. Más que iniciativas aisladas, constituyen ciclos de construcción de futuro. Un primer ciclo corresponde a la imaginación colectiva. Los proyectos piloto y las primeras iniciativas permiten explorar alternativas, detectar señales emergentes y revelar dimensiones que inicialmente permanecen invisibles. A través del trabajo con comunidades, instituciones académicas, del territorio y nuevas formas de colaboración.

Un segundo ciclo se vincula con la acción. A medida que los proyectos avanzan hacia escalas industriales y robustecen un portafolio nacional en plena evolución regulatoria, las visiones compartidas empiezan a materializarse de forma física. La experimentación deja de ser conceptual para transformarse en decisiones territoriales complejas: megaproyectos que avanzan en sus procesos de evaluación ambiental, infraestructuras logísticas prontas a materializarse, inversiones de gran envergadura que se priorizan y modelos productivos que finalmente toman forma real. En esta etapa, los actores no solo implementan proyectos; ensayan configuraciones posibles del sistema energético y territorial futuro.

Un tercer ciclo corresponde a la institucionalización. Los aprendizajes generados por los proyectos comienzan a consolidarse en prácticas permanentes: nuevas capacidades organizacionales, mecanismos de colaboración público-privada, estándares compartidos y formas más abiertas de aprendizaje entre actores del ecosistema. Esto se relaciona con la Actualización de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Entonces, el desafío deja de ser desarrollar proyectos individuales y pasa a ser instalar la capacidad colectiva de diseñar futuros de manera continua.

Este tránsito -imaginar, actuar e institucionalizar<sup>5</sup> requiere algo más que planificación técnica. Requiere capacidades interpretativas capaces de articular múltiples perspectivas en contextos de alta incertidumbre. Aquí es donde el diseño adquiere un rol estratégico. Entendido no solo como disciplina proyectual, sino como práctica de construcción de sentido<sup>6</sup>, el diseño permite traducir complejidad técnica en experiencias significativas, facilitar la participación de actores diversos y hacer tangible aquello que aún no existe. A través de visualizaciones, prototipos, simulaciones y experimentación colaborativa, el diseño habilita espacios donde los distintos actores pueden experimentar previamente los efectos sociales, ambientales y territoriales de una industria en formación.

Aplicado al hidrógeno verde, el diseño también permite transformar proyectos energéticos en procesos de *sensemaking* colectivo<sup>7</sup>: espacios donde se confrontan expectativas, se negocian visiones y se construyen acuerdos sobre el futuro que se desea habilitar. Tecnologías inmersivas, simulaciones territoriales o laboratorios de experimentación colaborativa pueden contribuir a que comunidades, empresas y autoridades visualicen infraestructuras futuras antes de que éstas sean irreversibles, fortaleciendo el sentido de pertenencia social junto con la pertinencia y la robustez estratégica de las decisiones. Desde esta perspectiva, la pregunta central deja de ser únicamente cómo desplegar el hidrógeno verde, para transformarse en otra más profunda: ¿estamos desarrollando una nueva industria energética o estamos diseñando el futuro que esa industria hará posible?

Chile posee hoy una oportunidad singular. El país no solo puede posicionarse como productor competitivo de hidrógeno verde, sino también como referente internacional en cómo una industria emergente puede diseñarse deliberadamente desde sus etapas iniciales, integrando sostenibilidad ambiental, desarrollo territorial y bienestar social. La existencia de múltiples iniciativas distribuidas a lo largo del país muestra que el hidrógeno verde ya no es una promesa futura, sino un proceso en curso de construcción colectiva.

Imaginar, actuar e institucionalizar futuros deseables no constituye un ejercicio especulativo, sino una responsabilidad estratégica. El liderazgo en la transición energética global dependerá menos de quién llegue primero y más de quién logre orientar su desarrollo hacia futuros que las personas reconozcan como propios, significativos y compartidos. El despliegue del hidrógeno verde ofrece algo más que una oportunidad energética: nos invita a aprender cómo diseñar, en conjunto, los futuros que queremos habitar.

# 4. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

## 3.1 Dimensión Ecosistémica y Estructural

**GABRIEL BRAVO**  
INSTITUCIONALIDAD, REGULACIÓN Y PERMISOS PARA EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE Y SUS DERIVADOS EN MEJILLONES

1.

Los precios en China suelen ser mucho más bajos por una combinación de escala y sobrecapacidad de fabricación, integración vertical (proveedores de paneles y baterías entrando a y menores costos laborales, entre otros).

2.

International Energy Agency (IEA). (2025). Cost of electrolyzers in China vs. global markets. En: Global Hydrogen Review 2025. IEA - Global Hydrogen Review 2025

3.

Gobierno de Chile. (2024). Ley Marco de Autorizaciones Sectoriales.

4.

Gobierno de Chile. (2024). Sistema Unificado de Permisos (SUPER). <https://www.super.gob.cl>

5.

European Commission. (2023). Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO). <https://energy.ec.europa.eu>

**FEDERICO RODRÍGUEZ**  
LA BRECHA ENTRE LA ESTRATEGIA Y EL TERRITORIO: DESAFÍOS NORMATIVOS PARA EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

1.

Ministerio de Energía de Chile. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. <https://energia.gob.cl>

2.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2025). Proyecto Volta - Planta de Hidrógeno y Amoníaco Verde. [Ver aquí.](#)

3.

SEREMI MINVU Antofagasta. (2024). Oficio Ordinario N°493. [Ver aquí.](#)

4.

SEREMI MINVU Antofagasta. (2025). Oficio Ordinario N°531. [Ver aquí.](#)

**JORIS VAN DE KLUNDERT | CÉSAR CERDA | MACARENA LARRAÍN | TITO HOMEM DE MELLO**  
INFRAESTRUCTURA COMPARTIDA Y LA SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS DE H<sub>2</sub>V Y DERIVADOS

1.

Winter, E. (2002). The Shapley value. En R. J. Aumann & S. Hart (Eds.), Handbook of game theory with economic applications (Vol. 3, pp. 2025-2054). Elsevier.

2.

Bjørn, A. (2025). Guidance for applying absolute environmental sustainability assessment on activities at different scales.

3.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society, 14 (2).

## 3.2 Dimensión Territorial

**JAIME COQUELET**  
DESARROLLO HUMANO, PATRIMONIO Y COMUNIDADES: OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN

1.

Ministerio de Energía de Chile (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.

2.

Sen, A. (1999). Development as Freedom. Oxford University Press.

3.

UNESCO (2003). Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial.

4.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2020). Contribución Nacional Determinada (NDC).

5.

OECD. (2023). Due diligence guidance for responsible business conduct. <https://www.oecd.org>

6. [Ministerio del Medio Ambiente. \(2024\). Plan Escazú 2024-2030.](#)

7. [Naciones Unidas \(2011\). Principios Rectores sobre las Empresas y los Derechos Humanos.](#)

8. [UNESCO et al. \(2022\). Impact Assessments Toolkit.](#)

9. [BCN. \(2020\). Ley 21.273.](#)

10. [BCN. \(2007\). Decreto Exento N°664.](#)

11. [Ministerio de las Culturas. \(2024\). Restauración Museo Mavrakis.](#)

12. [UNESCO. \(2025\). Murujuga Cultural Landscape.](#)

ROBERTO MORIS

DEL EXTRACTIVISMO A LA INNOVACIÓN PRODUCTIVA: EL HIDRÓGENO VERDE COMO CATALIZADOR DE LA TRANSFORMACIÓN TERRITORIAL CHILENA

1. [Ministerio de Energía. \(2020\). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Gobierno de Chile.](#)

2. [Ministerio de Energía. \(2023\). Plan de Acción de Hidrógeno Verde. Gobierno de Chile.](#)

3. [Ministerio de Medio Ambiente. \(2025\). Estrategia Nacional de Transición Socioecológica Justa.](#)

4. [World Bank Group \(2022\). Country Private Sector Diagnostic Creating Markets in Chille. A Stronger Private Sector for a More Productive and Inclusive Society.](#)

5. [Boese Cortés, I., & Soto, I. \(2023\). Renewable Hydrogen in Latin America and the Caribbean: Opportunities, Challenges, and Pathways. LAC Green Hydrogen Action.](#)

6. [Cordero, R. R., Feron, S., Damiani, A., Sepúlveda, E., Jorquera, J., Redondas, A., Seckmeyer, G., Carrasco, J., Rowe, P., & Ouyang, Z. \(2023\). Surface Solar Extremes in the Most Irradiated Region on Earth, Altiplano. Bulletin of the American Meteorological Society, 104\(6\), E1206–E1221.](#)

7. [Coordinador Eléctrico Nacional. \(2025\). Reporte Anual de Desempeño del Sistema Eléctrico Nacional.](#)

8. [Generadoras de Chile. \(2024\). Boletín Generadoras de Chile.](#)

9. [Comisión de Vivienda y Urbanismo. \(2025\). Proyecto de ley para fortalecer y modernizar el sistema de planificación territorial del país \(Boletín No 17.251-14\). Cámara de Diputadas y Diputados de Chile.](#)

MARCELO VILLAGRÁN

GOBERNANZA MULTINIVEL Y DIMENSIÓN TERRITORIAL PARA EL DESPLIEGUE SUSTENTABLE DEL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

1. [Villagrán, M., Abogado de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con Magíster Legum y Doctorado en Derecho \(summa cum laude\) de la Universidad Philipps de Marburg, Alemania.](#)

2. [GIZ, ILF & LBST. \(2021\). Requirements for green hydrogen export.](#)

3. [Alica, B., & Schakel, A. H. \(2025\). Does multilevel government increase legitimacy? Journal of Public Policy, 45\(2\), 270-292.](#)

4. [Altman, M., et al. \(2022\). Development Pathways for Hydrogen Hubs in Chile. Inter-American Development Bank.](#)

5. [Pino Zúñiga, F. \(2023\). Regulación territorial del hidrógeno verde. Revista de Derecho Ambiental.](#)

6. [Sánchez, I., & Cabaña, G. \(2023\). Desarrollo del hidrógeno verde en Chile. Heinrich Böll Stiftung.](#)

7. [Bishoge, O. K., Kombe, G. G., & Mvile, B. N. \(2020\). Community participation in renewable energy. Int. J. Sustainable Energy Planning.](#)

8. [Cortés Leiss, B., Maxwell, L., Oré Mónago, T., & White-Nockleby, C. \(2023\). Paving the Road for Competitive Green Hydrogen Hubs. Rice University.](#)

3.3 Dimensión Cadena de Valor Central de la Industria H<sub>2</sub>V

FRANCISCO BELMAR

MEJILLONES FRENTE AL HIDRÓGENO VERDE: APOSTAR POR TECNOLOGÍA AVANZADA, EFICIENCIA E INTEGRACIÓN TÉRMICA

1. [ICCT. \(2022\). Fuel cell Electric tractor-trailers: technology overview and fuel economy. https://theicct.org/publication/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-jul22](#)

2. [IEA \(2026\). Chile 2050 Energy Transition Roadmap. https://www.iea.org/reports/chile-2050-energy-transition-roadmap](#)

3. [Hydrogen Europe. \(2022\). Hydrogen Valleys: Insights into the European hydrogen ecosystem. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/55c881a3-9860-4ebc-8d95-d46f056c4f40\\_en?filename=20210527\\_Hydrogen\\_Valleys\\_final\\_ONLINE.pdf](#)

4. [CARB \(California Air Resources Board\). \(2023\). Advanced Clean Fleets - 2023 Rulemaking. https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/advanced-clean-fleets](#)

FELIPE HUERTA

MEJILLONES FRENTE AL HIDRÓGENO VERDE: APOSTAR POR TECNOLOGÍA AVANZADA, EFICIENCIA E INTEGRACIÓN TÉRMICA

1. [Jaime Illanes & Asociados. \(2024\). Capítulo 1: Descripción de proyecto - EIA “Proyecto Volta: planta de hidrógeno y amoníaco verde”. https://seia.sea.gob.cl](#)

2. [Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH. \(2019\). GrInHy2.0: Green hydrogen for green steel. https://www.salzgitter-ag.com](#)

3. [Neste Corporation. \(2025\). High temperature electrolyzer to demonstrate the production of renewable hydrogen started up at Neste's Rotterdam refinery. https://www.neste.com](#)

4. [She, X., Wang, H., Zhang, T., Li, Y., Zhao, X., Ding, Y., & Wang, C. \(2025\). Liquid air energy storage: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 208, 114986.](#)

5. [Zhang, T., She, X., Nie, B., Kildahl, H., & Ding, Y. \(2024\). Integration of liquid air energy storage with ammonia synthesis process for resource efficiency and cost-effectiveness. Journal of Energy Storage, 97, 112637.](#)

NAHUEL MICONE

MEJILLONES: EL PUNTO DE INFLEXIÓN PARA HABILITAR EL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE

1. [IEA - Global Hydrogen Review 2025.](#)

2. [DNV - Infraestructura H<sub>2</sub> y reconversión de gasoductos.](#)

3. [IRENA - Policy toolkit para países en desarrollo.](#)

4. [La Tercera - Proyecto Volta aprobado \(12-12-2025\).](#)

5. [EMOL - Coeva Antofagasta aprueba Volta \(12-12-2025\).](#)

6. [BioBioChile - Volta listo para aprobación final \(12-12-2025\).](#)

7. [Latin Business Daily - Aprobación ambiental Volta \(12-2025\).](#)

8-9. [Coordinador Eléctrico Nacional - PET2025, Anexo I.](#)

10. [Revista Electricidad -BESS Los Changos \(225 MW/1.125 MWh\).](#)

11. [Electrominería - BESS Los Changos; objetivo flexibilidad/suficiencia SEN.](#)

12. [ENGIE Chile - BESS Lile \(140 MW/802 MWh\) en CTM Mejillones.](#)

13. [Air Liquide - Craqueo NH<sub>3</sub> - H<sub>2</sub> industrial en Amberes \(30 t/d\).](#)

14. [Hydrocarbon Processing](#) - Nota técnica sobre el piloto de craqueo.

15. [COSCO SHIPPING](#) - Primer bunkering de NH<sub>3</sub> ecológico (Dalian).

16. [Port Technology](#) - Reporte del bunkering con NH<sub>3</sub> (ago-2025).

17. [Wood PLC](#) - Mitigación de inestabilidad eléctrica en redes off-grid.

18. [Oxford Academic \(Clean Energy\)](#) - Suministro off-grid confiable con H<sub>2</sub>.

19. [arXiv/MIT](#) - Optimización dinámica PEM con degradación por uso.

20. [RSER/Aalto](#) - Revisión crítica de operación dinámica PEM.

21. [MDPI Energies \(2025\)](#) - Operación dinámica de PEM y casos piloto.

22. [J. Electrochem. Soc. \(2024\)](#) - Ensayo experimental de PEM en operación variable.

23. [Univ. Minnesota](#) - NMPC para síntesis de NH<sub>3</sub> flexible.

24. [RSC Advances \(2018\)](#) - Envelope operativo Haber–Bosch para P2A.

25. [ISCRE28](#) - Reactores politrópicos de respuesta rápida para NH<sub>3</sub>.

26. [Ammonia Energy Association](#) - Efecto de flexibilidad en LCOA y buffers.

27. [Gobierno de Chile](#) - Antofagasta/Mejillones 100% agua desalada.

28. [Smart Water Magazine](#) - Expansión a 1.436 l/s; liderazgo latinoamericano.

29. [UPI](#) - Antofagasta, primera gran ciudad totalmente desalada.

RAÚL MONTANO | JORGE TAMAYO

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA PARA EL HIDRÓGENO VERDE EN MEJILLONES

1. [Ember. \(2025, enero 10\)](#). Chile surpasses 40% wind and solar for the first time in December.

2. [PV Magazine International. \(2025, enero 15\)](#). Led by PV, renewables in Chile account for 50% of installed capacity.

3. [Ministry of Foreign Affairs and Trade \(MFAT\). \(2025, junio\)](#). Market intelligence report: Chile and green hydrogen.

4. [Reuters. \(2025, marzo 21\)](#). Chile leads Latin American push to clean hydrogen.

5. [La Tercera - Pulso \(1 marzo 2024\)](#): SEA admite a trámite Proyecto Volta en Mejillones.

6. [New Energy Events \(9 octubre 2025\)](#). Engie Chile begins building 140 MW/802 MWh BESS Lite (Mejillones).

7. [Diario Minero & Reporte Sostenible. \(dic 2025\)](#). ICE/COEVA del Proyecto Volta; FV 600 MW; 220/30 kV.

8. [Atlanthy. \(2025\) Hidrógeno. Cómo optimizar el LCOH: OPEX, CAPEX y horas de operación.](#)

9. [PV Magazine LATAM \(2024, 28 febrero\)](#). En Chile entra a estudio ambiental el Proyecto Volta (H<sub>2</sub>V/NH<sub>3</sub>).

10. [La Tercera - Pulso. \(2025, 12 diciembre\)](#). Proyecto Volta recibe aprobación ambiental.

11. [Hitachi Energy Ltd. \(2024\)](#). Power Grids – Green Energy & Mobility: How STATCOM with Grid Forming Control Can Improve Industrial Output. [Hitachi Review](#).

12. [Hitachi Energy Ltd. \(2025\)](#). Stability Enhancement of Weak Grids with High Penetration of Renewables with Grid-Forming STATCOM/Enhanced-STATCOM. [Hitachi Review](#).

13. [IEEE. \(2023, marzo\)](#). Grid integration of hydrogen electrolyzers and fuel cells.

14. [International Energy Agency \(IEA\). \(2023, septiembre\)](#). Global hydrogen review 2023.

15. [Energy Systems Integration Group \(ESIG\). \(2024, abril\)](#). Assessing the flexibility of green hydrogen in power system models.

16. [National Renewable Energy Laboratory \(NREL\). \(2023, junio\)](#). Hydrogen production, grid integration, and scaling for the future.

17. [European Commission - Joint Research Centre \(JRC\). \(2023\)](#). Energy efficiency of water electrolyzers for hydrogen production.

18. [Mission Innovation. \(2025, agosto\)](#). Maximising efficiency of electrolyzers (factsheet).

19. [MDPI. \(2025, marzo\)](#). RMS modeling and control of a grid-forming ESTATCOM. [Applied Sciences](#).

20. [MDPI. \(2023, diciembre\)](#). Advances in water electrolysis for green hydrogen. [Sustainability](#).

21. [Engineering, Technology & Applied Science Research \(ETASR\). \(2023\)](#). Hybrid STATCOM para calidad de potencia en parques eólicos.

22. [Scientific Research Publishing \(SciRP\). \(2011\)](#). Stability enhancement in HVDC system with STATCOM. [Engineering](#).

23. [H2News. \(2024, marzo 26\)](#). Proyecto Volta: Entrevista y contenidos.

24. [Ministerio de Energía \(Chile\). \(2024\)](#). Plan de trabajo de regulaciones habilitantes 2024-2030.

25. [Ministerio de Energía \(Chile\). \(2023, diciembre\)](#). Plan de acción de hidrógeno verde 2023-2030.

26. [Hinicio & LBST. \(2020\)](#). Advisory report on a green hydrogen certification scheme in Chile.

27. [Team Europe Renewable Hydrogen \(RH2\). \(2025, julio\)](#). Strategic proposal for a certification system for hydrogen and derivatives in Chile.

28. [Comisión Nacional de Energía \(CNE\). \(2024, octubre\)](#). Informe técnico definitivo del plan de expansión anual de transmisión 2023.

AGUSTINA RAVOTTI

MEJILLONES COMO VALLE DE HIDRÓGENO: ENERGÍA, MODELAMIENTO Y DESARROLLO TERRITORIAL

1. [Gobierno Regional de Antofagasta. \(2026\)](#). Hoja de ruta de hidrógeno verde, Región de Antofagasta (Vol. 1). [Gobierno Regional de Antofagasta](#).

2. [Impact Hydrogen. \(2026\)](#). [Homepage](#).

3. [Impact Hydrogen & Essent. \(2026\)](#). Quick scan: Hydrogen hub scenario planning.

4. [Ravotti, M. A., Radünz, C., Schwarz, S., Demuth, M., Canu, P., & Hochenauer, C. \(2026\)](#). Experimental study of the influence of oxygen enrichment in hydrogen-enriched natural gas combustion at a semi-industrial scale. [Fuel](#), 405, 136473.

5. [H<sub>2</sub>-Antofagasta. \(2026\)](#). [Proyectos](#).

LUKAS ROESSLER / MERIT BODNER

EL POTENCIAL DEL HIDRÓGENO VERDE DE CHILE EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA GLOBAL. UNA PERSPECTIVA EUROPEA

1. [International Energy Agency. \(2021\)](#). Net Zero by 2050.

2. [European Commission. \(2020\)](#). Long-term climate strategy.

3. [Government of Japan. \(2020\)](#). Net Zero initiatives.

4. [United Nations. \(2025\)](#). Net Zero Coalition.

5. [IEA \(2026\)](#). Chile 2050 Energy Transition Roadmap, IEA, Paris, Licence: CC BY 4.0.

6. [Gobierno de Chile. \(2020\)](#). Estrategia nacional de hidrógeno verde.

7. [European Commission. \(2025\)](#). Developing Chile's green hydrogen potential.

8. [European Commission. \(2025\)](#). Chile – Team Europe Green Hydrogen Platform.

9. [Collins, P. \(2025\)](#). Hydrogen Europe.

10. [European External Action Service \(EEAS\). \(2025\)](#). Chile: EU, EIB and KfW to finance renewable hydrogen projects in Chile with up to € 216.5 million.

11. [European Hydrogen Observatory. \(2025\)](#). National strategies.

12. [Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. \(2023\)](#). The national hydrogen strategy.

13. [Government of the Netherlands. \(2023\)](#). Industrial decarbonisation, CCS and hydrogen in the Netherlands.

14. [Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology.\(2022\)](#). Hydrogen strategy for Austria. [Viena](#).

15. [Hynetwork \(2025\)](#). Delta Rhine Corridor.

16. [HSE. \(2025\)](#). North Adriatic Hydrogen Valley (NAHV).

17. [SouthH2 Corridor. \(2025\)](#). Our connection for a clean future.

18. European Commission. (2025). [European Hydrogen Bank](#).  
19. European Commission. (2025). [Carbon Border Adjustment Mechanism](#).  
20. European Hydrogen Observatory. (2025). [Hydrogen trade](#).  
21. Télessy, K., Barner, L., & Holz, F. (2024). Repurposing natural gas pipelines for hydrogen: Limits and options from a case study in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 80, 821–831.  
22. European Commission. (2025). [Southern neighbourhood: Middle East, North Africa and the Gulf](#).  
23. Bayssi, O., et al. (2024). Green hydrogen landscape in North African countries: Strengths, challenges, and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 84, 822–839.  
24. Egypt Oil & Gas. (2025). [EBRD works with EU to support green hydrogen in Egypt](#).  
25. Energy News. (2025). [Tunisia aims to produce 8.3 million tonnes of green hydrogen by 2050](#).  
26. Asociación Española del Hidrógeno. (2025). [Hydrogen project census](#).  
27. Fuel Cells Works. (2025). [Spain’s hydrogen industry achieves critical growth milestone](#).  
28. Campbell, R., & Ryan, M. (2025). [Current industrial hydrogen uses in Australia and projections for green hydrogen production](#).  
29. Australian Gas Networks. (2025). [Hydrogen Park South Australia](#).  
30. Hodges, A., et al. (2022). A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen. *Nature Communications*, 13 (1), 1304.  
31. Chiyoda Corporation. (2025). [Direct MCH®: Research and development](#).  
32. Mackenzie, W. (2025). [Australia risks losing edge in global hydrogen race as projects stall](#).  
33. U.S. Department of Energy. (2025). [Hydrogen and Fuel Cells Program Record 9013](#).  
34. Lipiäinen, S., & Vakkilainen, E. (2025). [Feasibility of the transportation options of renewable hydrogen for moderate distances](#). *Energy Conversion and Management X*, 27, 101158.  
35. European Commission. (2025). [EU mobilises € 422 million to support alternative fuels infrastructure](#).  
36. HIF Global. (2025). <https://www.hifglobal.com>

JORGE TABOADA

UNA VISIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSFORMACIÓN DE LA MATRIZ PRODUCTIVA EN ANTOFAGASTA

1. Ministerio de Energía. (2025). [Plan de Descarbonización de la Industria Energética](#).  
2. Ministerio de Energía. (2024). [Plan de Acción H<sub>2</sub>V 2023-2030](#).  
3. Soventix-GIZ. (2024). [Solar NH<sub>3</sub>-Pool Chile: Conceptos para el desarrollo de un parque industrial sostenible de hidrógeno y amoníaco verde en la Región de Antofagasta](#).

3.4 Dimensión Competitividad y Desarrollo País

FEDERICO DEL MONDO

MODELOS DE INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO VERDE

Apéndice

La Universidad de Trieste es uno de los 37 partners de la iniciativa Valle del Hidrógeno del Adriático Norte (North Adriatic Hydrogen Valley-NAHV [8], [9]), que comprende los territorios de la Región Friuli Venezia Giulia (noreste de Italia), Eslovenia y Croacia. La iniciativa, financiada por el Clean Hydrogen Partnership Programme de la Unión Europea, tiene como objetivo la creación de la cadena de valor del hidrógeno mediante la implementación de 17 plantas piloto en la macrorregión, con una producción y un uso previsto de 5.000 toneladas anuales de hidrógeno.

Agradecimientos

El autor agradece la oportunidad de contribuir con este artículo al documento “Visions, Models, and Experiences on the Deployment of Green Hydrogen (H<sub>2</sub>V) in Chile. The Mejillones Case: A Multidisciplinary Perspective”. El autor, actualmente candidato al doctorado en la Universidad de Trieste (Italia) con la tesis “Improving the efficiency of the hydrogen value chain using Digital Models and Data Analytics”, forma parte del equipo universitario dedicado al desarrollo de la Iniciativa del Valle del Hidrógeno del Norte del Adriático. Asimismo, expresa su agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica de Chile por la valiosa oportunidad de realizar la pasantía doctoral que ha permitido enriquecer y consolidar el trabajo presentado.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

Durante la preparación de este trabajo, el autor utilizó herramienta AI con el fin de corregir errores gramaticales y sintácticos. Tras emplear esta herramienta/servicio, el autor revisó y editó el contenido.

1. Riera, J. et al. (2023). [A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization](#). *Int J Hydrogen Energy*.  
2. Virah-Sawmy, D. et al. (2024). [Ignore variability, overestimate hydrogen production - Quantifying the effects of electrolyzer efficiency curves on hydrogen production from renewable energy sources](#). *Int J Hydrogen Energy*.  
3. Rezaei, M. et al. (2024). [Economics of renewable hydrogen production using wind and solar energy: A case study for Queensland, Australia](#). *Journal of Cleaner Production*.  
4. Janssen, J. et al. (2022). [Country-specific cost projections for renewable hydrogen production through off-grid electricity systems](#). *Applied Energy*.  
5. CREG. (2024). [Power Purchase Agreements: Overview and evaluation](#).  
6. Pivetta, D. et al. (2024). [A multi-objective planning tool for the optimal supply of green hydrogen for an industrial port area decarbonization](#). *Renewable Energy*.  
7. Pivetta, D. et al. (2024). [Optimal decarbonization strategies for an industrial port area by using hydrogen as energy carrier](#). *Int J Hydrogen Energy*.  
8. North Adriatic Hydrogen Valley. [\(NAHV\)](#)

PAULA WUTH

IMAGINAR, ACTUAR E INSTITUCIONALIZAR FUTUROS DESEABLES: DISEÑAR EL DESPLIEGUE DEL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE

1. Gümüşay, A. A., & Reinecke, J. (2024). [Imagining desirable futures: A call for prospective theorizing with speculative rigour](#). *Organization Theory*, 5(1), 26317877241235939.  
2. Comi, A., Mosca, L., & Whyte J. (2025). [Future making as emancipatory inquiry: A value-based exploration of desirable futures](#). *Journal of Management Studies*, 62(6), 2467–2481.  
3. Wenzel, M., Krämer, H., Koch, J., & Reckwitz, A. (2020). [Future and organization studies: On the rediscovery of a problematic temporal category in organizations](#). *Organization Studies*, 41(10), 1441–1455.  
4. Dunne, A., & Raby, F. (2013). [Speculative everything: Design, fiction, and social dreaming](#). MIT Press.  
5. Wuth, P., Dell'Era, C., Pavez, I. & Negrete, S. (work in progress). [Emancipation through Design](#).  
6. Verganti, R. (2017). [Overcrowded: Designing meaningful products in a world awash with Ideas](#). MIT Press.  
7. Wuth, P., Hernández, R. J., Merino, L., Negrete, S., & Pavez, I. (2025). [Collaborative scenario experimentation for strategy formulation to shape desirable futures](#). *Research-Technology Management*, 68(6), 73–91.

