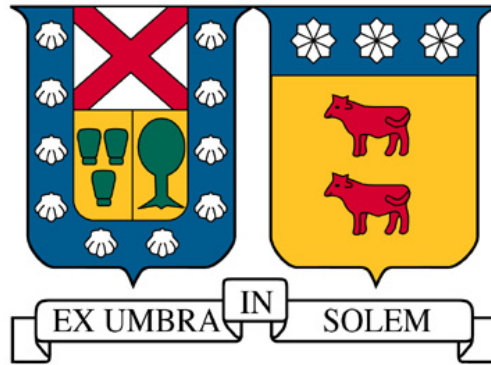


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



Factibilidad de adopción de tecnología basada en Hidrógeno Verde como vector energético en el sector industrial del área metropolitana del “Gran Concepción”.

BORIS ANDRÉS URIBE AMÉSTICA

TRABAJO EXAMEN PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y EMPRENDIMIENTO

PROFESOR GUÍA

: RODRIGO DEMARCO BULL

(julio – 2025)



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: FACTIBILIDAD DE ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍA BASADA EN HIDROGÉNO VERDE COMO VECTOR ENERGÉTICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL DE ÁREA METROPOLITANA DEL "GRAN CONCEPCIÓN".

Nombre del candidato(a): Boris Andrés Uribe Améstica

Carrera / Grado: Magíster en Innovación Tecnológica y Emprendimiento

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Demarco Bull, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.


El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21-08-25 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/08/2025 ; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Quiero comenzar este agradecimiento con lo más valioso que tengo: mis dos enanos (Chu-i y Peluche). Ellos, con su amor incondicional me esperaron en casa mientras asistía a clases o me quedaba trabajando largas horas para avanzar en este proyecto.

A mi familia, gracias por estar ahí sin condiciones. Por apañar cuando más lo necesité, por las palabras de aliento, por la comprensión silenciosa y por creer en mí incluso cuando yo mismo lo dudaba.

A mi grupo del MITE (The One), gracias por convertir los trabajos y las largas jornadas en algo entretenido, por el compañerismo genuino y por hacer más liviana esta montaña que parecía imposible escalar. Aprendí mucho más de lo que esperaba, y no solo en lo académico

El cansancio de los viajes a Santiago, las horas en carretera, el sueño acumulado... todo eso queda atrás. Lo que queda ahora es la satisfacción profunda de haberlo logrado.

Y finalmente, a los amigos que preguntaban insistentemente "¿Cuándo terminas?", gracias. Aunque a veces me estresaban, también me recordaban que este camino tenía un final, y que valía la pena llegar a él

1.- Resumen Ejecutivo

La región del Bío Bío destaca por su histórico rol industrial, su matriz energética diversificada (hidroeléctrica, biomasa, combustibles fósiles y una incipiente generación eólica) y su infraestructura portuaria estratégica. Estas características la posicionan con un alto potencial para el desarrollo del hidrógeno verde, especialmente en sectores intensivos en energía como la celulosa, el cemento, la petroquímica y la fabricación de vidrio.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar las condiciones técnicas y productivas del sector industrial del área metropolitana del Gran Concepción, con el fin de identificar aquellos rubros/empresas con mayor factibilidad de adoptar tecnologías basadas en el hidrógeno verde. Este trabajo se enmarca en un enfoque exploratorio y descriptivo, considerando el creciente interés nacional por la descarbonización de procesos industriales y la transición hacia energías limpias.

A partir de un análisis cualitativo de fuentes secundarias, se identificaron siete empresas industriales representativas (Cementos BíoBío, Papeles Bío Bío, Masisa, Vidrios Lirquén, Inchalam, Petroquím y Oxy), evaluando su matriz energética, infraestructura instalada y grado de preparación para una reconversión tecnológica. Se observó que aquellas que ya operan con gas natural o utilizan vectores energéticos gaseosos presentan claramente una mayor viabilidad para integrar el hidrógeno verde.

Asimismo, se analizó el rol de ENAP como productor de hidrógeno gris en Chile, y el caso de su planta en Hualpén como infraestructura clave para una transición progresiva hacia el H_2V . También se identificaron desafíos relevantes, entre ellos el alto costo actual del hidrógeno verde y la necesidad de adecuaciones técnicas.

Finalmente, esta investigación propone una línea base territorial e industrial que pueda orientar a quienes toman decisiones, empresas y formuladores de políticas públicas en la identificación de sectores prioritarios y estrategias de implementación gradual del hidrógeno verde en el Gran Concepción.

2.- Índice

3.- Introducción	6
4.- Objetivos	8
4.1.- Objetivo General	8
4.2.- Objetivos Específicos	8
4.3.- Alcance	8
4.4.- Metodología	9
5.- Desarrollo del Tema.....	11
5.1.- Tecnología de Hidrógeno Verde	11
5.1.1.- Energías renovables en Chile y la Región del Bío Bío.....	11
5.1.2.- Producción de Hidrógeno	13
5.1.2.1.- Usos del Hidrógeno en la industria.....	14
5.1.2.2.- Almacenamiento y transporte	15
5.1.3.- Competitividad del Hidrógeno Verde como combustible	16
5.2.- Sector productivo Región del Bío Bío	17
5.2.1.- Sector industrial del “Gran Concepción”	18
5.2.1.1.- Industrias productoras del Gran Concepción.....	20
5.2.1.2.- ENAP Refinería Bío Bío: Uso de hidrógeno	24
5.2.2.- Infraestructura portuaria	25
5.3.- Adopción de la tecnología de H_2V	26
5.4.- Prospección tecnológica e inversión estimada	28
5.4.1.- Necesidades tecnológicas	28
5.4.2.- Estimación de inversión por tipo de industria.	29
6.- Conclusiones	31
7.- Bibliografía	32
8.- Anexos	35

Índice de figuras:

Figura 1.- Capacidad instalada para el sector eléctrico en Chile a julio de 2024.....	12
Figura 2.- Comunas pertenecientes al Gran Concepción	20
Figura 3.- Comunas pertenecientes al Gran Concepción	21

Índice de tablas:

Tabla N°1.- Estimación de inversión por empresa.....	29
------------------------------------------------------	----

3.- Introducción

La Región del Biobío, históricamente reconocida por su diverso sector industrial, enfrenta actualmente desafíos significativos relacionados con la descarbonización de sus procesos productivos y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. En este contexto, el hidrógeno verde se perfila como una alternativa energética prometedora, capaz de transformar profundamente el funcionamiento del sector industrial regional.

El hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua utilizando energía proveniente de fuentes renovables como la solar y la eólica, no genera emisiones contaminantes durante su producción ni en su combustión, lo que lo convierte en una solución alineada con los compromisos globales de reducción de emisiones (Ministerio de Energía, 2020). Chile ha identificado el hidrógeno verde como una oportunidad estratégica para transformar su matriz energética, posicionándose como líder en la región gracias a su disponibilidad de recursos naturales: el país posee una de las mayores radiaciones solares del mundo en el Desierto de Atacama y un excelente potencial eólico en el sur, particularmente en las regiones de Magallanes y Aysén (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023; Ministerio de Energía, 2020).

En este contexto nacional, la Región del Biobío adquiere una relevancia particular no solo por su rol histórico como polo industrial, sino también por su capacidad instalada en energías renovables no convencionales (ERNC), destacando la generación hidroeléctrica, la biomasa forestal y una creciente presencia de parques eólicos en la provincia de Arauco (CPC Biobío, 2024). Esta complementariedad energética posiciona a la región como una zona estratégica para el desarrollo de proyectos integrales de producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno verde.

Durante el Green Hydrogen Summit Chile LAC 2025, el ministro de Energía, Diego Pardow, subrayó que el hidrógeno verde se desplegará especialmente en regiones como el Biobío, con el fin de descarbonizar procesos productivos en industrias intensivas en energía, como la siderurgia, la celulosa y el transporte de carga (Ministerio de Energía, 2025). Asimismo, se ha anunciado la instalación de fábricas de electrolizadores en la región, lo que permitiría fortalecer la cadena de valor nacional del hidrógeno y generar capacidades tecnológicas locales (Redimin, 2025).

Sin embargo, la adopción de esta tecnología no está exenta de barreras. La falta de conocimiento técnico especializado, la escasa infraestructura para su producción, almacenamiento y distribución, así como los altos costos iniciales, son factores que limitan su implementación a gran escala (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). A estos desafíos se suma la necesidad de construir un ecosistema de innovación robusto que articule a universidades, centros tecnológicos, emprendedores e industria, con el fin de generar soluciones adaptadas a la realidad productiva regional (CPC Biobío, 2024).

En este trabajo se analizará el estado actual y las condiciones de adopción del hidrógeno verde en el sector industrial del Biobío, desde una perspectiva de innovación tecnológica y competitividad del territorio.

4.- Objetivos

4.1.- Objetivo General

Analizar las condiciones técnicas y productivas del sector industrial en el área metropolitana del “Gran Concepción”, identificando los rubros y empresas con mayor factibilidad de adopción de hidrógeno verde, considerando las capacidades instaladas y los requerimientos de adaptación tecnológica.

4.2.- Objetivos Específicos

Caracterizar el perfil energético de los principales sectores industriales del área metropolitana del “Gran Concepción”, identificando los procesos intensivos en energía que podrían beneficiarse de la sustitución por hidrógeno verde.

Evaluar las capacidades tecnológicas e infraestructurales actuales de las empresas industriales seleccionadas, incluyendo acceso a energía renovable, redes de transporte energético, y uso actual de combustibles fósiles.

Priorizar los sectores industriales según su viabilidad técnica, económica y estratégica para adoptar el hidrógeno verde.

4.3.- Alcance

Esta tesis se enmarca en un estudio exploratorio de carácter técnico y territorial, cuyo propósito es analizar la factibilidad de adopción de tecnologías basadas en hidrógeno verde en el sector industrial del Gran Concepción, considerando la infraestructura energética existente, los procesos productivos intensivos en energía, y el grado de reconversión tecnológica requerido en diferentes rubros.

El trabajo no contempla la implementación directa de tecnologías ni la realización de pruebas piloto, sino que se limita a identificar y caracterizar aquellos sectores o empresas que presentan mejores condiciones técnicas y estratégicas para una futura adopción de hidrógeno verde. En este sentido, el estudio se orienta a establecer una línea base informada que pueda servir como insumo para tomadores de decisiones, políticas públicas regionales o futuras investigaciones aplicadas.

El análisis se circunscribe territorialmente al área del Gran Concepción, comprendiendo comunas como Concepción, Talcahuano, Hualpén, San Pedro de la Paz, Penco, Coronel, entre otras. Las fuentes de información incluirán literatura técnica, estudios sectoriales, datos públicos de empresas e infraestructura energética, y, eventualmente, entrevistas exploratorias con actores clave si la factibilidad lo permite.

4.4.- Metodología

El presente estudio se desarrollará bajo un enfoque exploratorio y descriptivo, orientado a analizar la factibilidad de adopción de tecnologías basadas en hidrógeno verde en el sector industrial del área metropolitana del Gran Concepción. Dado el carácter emergente de esta tecnología en el contexto nacional, se optará por una metodología cualitativa basada en el levantamiento y análisis de información secundaria confiable.

El análisis se organizará en torno a tres dimensiones principales:

La caracterización energética y tecnológica de los sectores industriales más relevantes del Gran Concepción.

La evaluación de las capacidades de infraestructura y tecnológicas de las empresas seleccionadas considerando su matriz energética.

El análisis del entorno logístico-portuario y del ecosistema regional de innovación, como elementos habilitantes o restrictivos para la adopción de esta tecnología.

Se recopilará información proveniente de:

Informes técnicos e institucionales elaborados por organismos públicos y multilaterales.

Estudios sectoriales y diagnósticos económicos-productivos de la Región del Biobío.

Datos públicos de empresas industriales seleccionadas, incluyendo memorias corporativas, reportes de sostenibilidad y antecedentes técnicos disponibles.

Literatura científica y técnica relacionada con tecnologías de hidrógeno, energías renovables, logística energética y reconversión industrial.

La selección de empresas industriales se realizará en función de su:

Relevancia dentro del tejido productivo regional.

Intensidad energética de sus procesos productivos.

Existencia de infraestructura energética compatible con vectores gaseosos (gas natural, biomasa, cogeneración).

Proximidad a infraestructura portuaria o de transporte estratégico.

A partir de esta información, se aplicará un análisis cualitativo orientado a identificar aquellas empresas y sectores que presenten mayor viabilidad técnica, económica y estratégica para la adopción del hidrógeno verde, considerando las condiciones del entorno regional.

5.- Desarrollo del Tema

5.1.- Tecnología de Hidrógeno Verde

5.1.1.- Energías renovables en Chile y la Región del Bío Bío

La transición hacia una matriz energética más limpia ha cobrado gran relevancia en la agenda política y económica de Chile durante las últimas décadas. Este cambio responde tanto a compromisos internacionales en materia de cambio climático como a necesidades internas de diversificación energética, seguridad de suministro y sostenibilidad ambiental. En este escenario, las energías renovables no convencionales (ERNC) han adquirido un rol protagónico, consolidando a Chile como uno de los países latinoamericanos con mayor incorporación de estas fuentes en su matriz eléctrica (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

Según datos recientes del Coordinador Eléctrico Nacional (2023), como se observa en Figura N°1, más del 60% de la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional proviene de fuentes renovables, con una creciente participación de la energía solar fotovoltaica (29,4%), eólica (14,3%) e hidráulica (20,7%). Este cambio ha sido posible gracias a políticas públicas sostenidas, como la Ley 20.698 (conocida como Ley de Energías Renovables), la apertura a la inversión extranjera y el notable potencial geográfico del país. Además, la eliminación de barreras normativas y el fortalecimiento del mercado eléctrico han favorecido la expansión de estas fuentes.

Entre las ERNC con mayor potencial destacan la energía solar en el norte del país y la energía eólica en el sur. El Desierto de Atacama posee uno de los niveles de radiación solar más altos del planeta, lo que ha permitido la instalación de múltiples plantas fotovoltaicas y termosolares en las regiones de Antofagasta y Tarapacá. Paralelamente, las regiones de Magallanes y Aysén presentan excelentes condiciones para la generación eólica, con factores de planta que superan ampliamente el promedio mundial (Ministerio de Energía, 2020; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

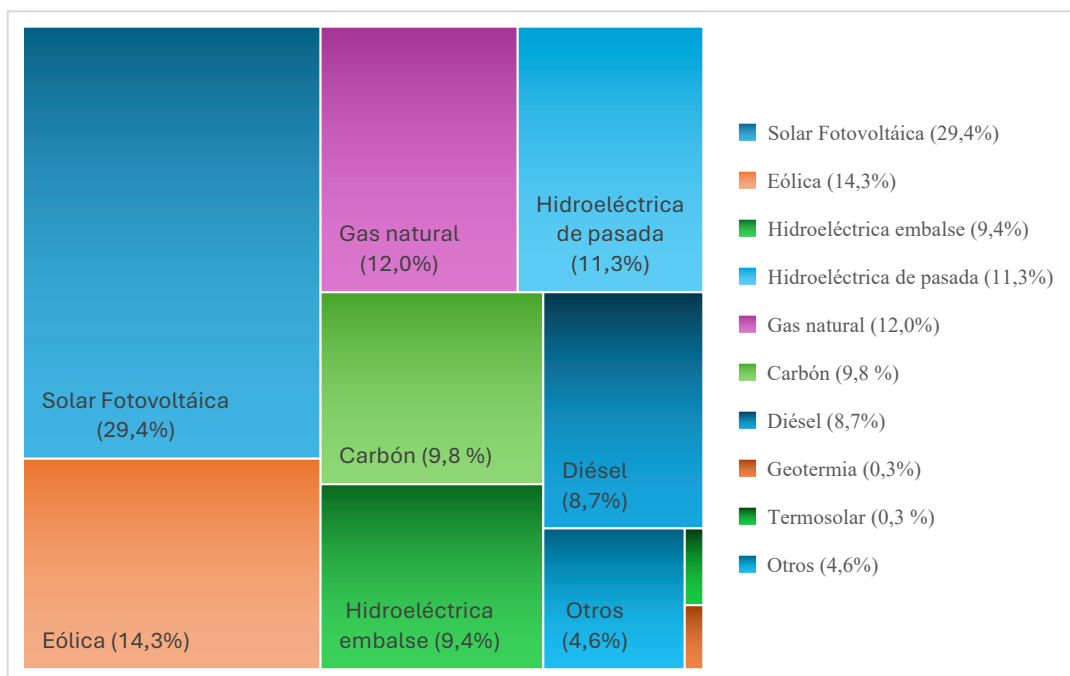


Figura 1.- Capacidad instalada para el sector eléctrico en Chile a julio de 2024

Fuente: Ministerio de Energía (<https://energiaabierta.cl>)

A nivel regional, la Región del Biobío se ha caracterizado históricamente por una matriz energética diversificada, en la que conviven grandes centrales hidroeléctricas con proyectos de biomasa forestal (producto del fuerte desarrollo de la industria maderera) y, más recientemente, parques eólicos en expansión en zonas como Lebu y Arauco (CPC Biobío, 2024). Este ecosistema energético mixto proporciona una base sólida para la integración de vectores energéticos emergentes, como el hidrógeno verde, al aprovechar excedentes renovables para su producción mediante electrólisis.

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (Ministerio de Energía de Chile, 2020) reconoce explícitamente el potencial del país para convertirse en líder mundial en esta industria, articulando la abundancia de recursos renovables con capacidades logísticas, portuarias e industriales clave. Este marco ofrece oportunidades para regiones como Biobío, que no solo concentran infraestructura energética, sino también polos industriales intensivos en consumo energético que podrían beneficiarse directamente de la descarbonización mediante este vector energético.

5.1.2.- Producción de Hidrógeno

A nivel mundial, la producción de hidrógeno está dominada por métodos basados en combustibles fósiles, siendo el reformado de gas natural con vapor de agua (Steam Methane Reforming, SMR) el proceso más común. Este método representa aproximadamente el 95% del hidrógeno producido globalmente y, aunque es tecnológicamente maduro y relativamente económico, genera grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), clasificando al producto como hidrógeno gris (International Energy Agency [IEA], 2022). En menor medida, también se produce hidrógeno a través de la gasificación del carbón, especialmente en países con grandes reservas como China. Este enfoque ha permitido satisfacer la demanda industrial, pero a costa de altos impactos ambientales, lo que ha motivado una creciente presión internacional por reducir las emisiones asociadas a esta cadena de valor.

En respuesta a estos desafíos, ha surgido un renovado interés por el hidrógeno verde, producido mediante la electrólisis del agua alimentada con electricidad generada por fuentes renovables, como la energía solar o eólica. A diferencia del hidrógeno gris, esta variante no emite gases de efecto invernadero durante su producción ni uso, lo que la convierte en una pieza clave en la transición hacia una economía baja en carbono (Ministerio de Energía de Chile, 2020). No obstante, los costos de producción aún son elevados en comparación con los métodos convencionales, debido principalmente al precio de la electricidad renovable y la tecnología de electrólisis, aunque se espera que estos disminuyan con el avance tecnológico y el escalamiento industrial (IEA, 2022; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

En el caso de Chile, la producción actual de hidrógeno sigue estando basada en procesos convencionales a pequeña escala, usados principalmente en la refinación de petróleo y la producción de amoníaco. Sin embargo, el país ha definido una ambiciosa estrategia de desarrollo de hidrógeno verde, apoyada en sus condiciones geográficas excepcionales: el norte ofrece una de las radiaciones solares más altas del mundo, y el sur, particularmente las regiones de Magallanes y Aysén, presenta un potencial eólico de clase mundial (Ministerio de Energía de Chile, 2020). Este panorama convierte a Chile en un potencial exportador global de hidrógeno verde en el mediano y largo plazo.

A nivel regional, la Región del Biobío se posiciona como un actor intermedio clave. Aunque no posee el potencial extremo de generación solar o eólica del norte o sur del país, sí cuenta con una matriz energética diversificada (incluyendo biomasa, hidroeléctricas y energía eólica emergente), así como infraestructura industrial y portuaria avanzada. Estas características abren la posibilidad de desarrollar polos regionales de hidrógeno verde enfocados en abastecer la demanda local de industrias intensivas en energía, contribuyendo tanto a la descarbonización como a la dinamización de la innovación tecnológica territorial (CPC Biobío, 2024; Ministerio de Energía de Chile, 2025).

5.1.2.1.- Usos del Hidrógeno en la industria

El hidrógeno ha sido utilizado durante décadas en diversos sectores industriales, siendo un insumo clave en procesos químicos, energéticos y metalúrgicos. A nivel global, cerca del 94% del hidrógeno producido es destinado a usos industriales, principalmente como materia prima y agente reductor, en lugar de ser utilizado como portador energético (International Energy Agency [IEA], 2022).

Uno de los usos más extendidos del hidrógeno es en la refinación de petróleo, donde se emplea en procesos como la hidrosulfuración para eliminar compuestos contaminantes del crudo, como el azufre, mejorando así la calidad de los combustibles líquidos. También es ampliamente utilizado en la producción de amoníaco a través del proceso Haber-Bosch, el cual es esencial para la fabricación de fertilizantes nitrogenados que sustentan gran parte de la agricultura moderna (IEA, 2022; Ministerio de Energía, 2020).

Otro sector de creciente interés es la industria del acero, donde el hidrógeno puede sustituir al carbón como agente reductor en los altos hornos, permitiendo una producción de acero libre de carbono (también conocida como “acero verde”). Este uso tiene un enorme potencial para la descarbonización de uno de los sectores más intensivos en emisiones del planeta (Hydrogen Council, 2021). De manera similar, se exploran aplicaciones en la industria química, como la producción de metanol, y en procesos de hidrogenación en la industria alimentaria y farmacéutica.

En el contexto de la transición energética, el hidrógeno también está comenzando a utilizarse como vector energético en aplicaciones industriales que requieren altas

temperaturas o almacenamiento energético prolongado. En particular, sectores como el cemento, el vidrio, y la industria cerámica están evaluando el reemplazo de combustibles fósiles por hidrógeno verde para reducir su huella de carbono (BNEF, 2022).

En el caso de Chile, aunque su uso industrial aún es limitado, existen sectores estratégicos donde el hidrógeno verde podría tener una alta penetración futura: la minería del cobre, el transporte de carga pesada, la industria forestal, y la producción de biocombustibles sintéticos para exportación. Estas aplicaciones están alineadas con los objetivos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, que visualiza al hidrógeno no solo como una oportunidad ambiental, sino también como un eje de competitividad y reconversión productiva para el país (Ministerio de Energía de Chile, 2020; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

5.1.2.2.- Almacenamiento y transporte

El transporte y almacenamiento del hidrógeno representan dos de los principales desafíos tecnológicos y económicos para su implementación a gran escala, especialmente en aplicaciones industriales. A diferencia del gas natural, cuya infraestructura global está ampliamente desarrollada y estandarizada, el hidrógeno presenta propiedades fisicoquímicas únicas que exigen soluciones específicas.

En términos de transporte, una de las preguntas más recurrentes es si puede utilizarse la infraestructura existente de gasoductos de gas natural. Aunque en algunos casos se han realizado pruebas exitosas con mezclas de hidrógeno y gas natural (conocidas como "blends"), el hidrógeno puro plantea desafíos importantes: tiene una densidad energética volumétrica muy baja, es una molécula extremadamente liviana y pequeña, y puede difundir y fragilizar metales, especialmente aceros al carbono, lo que compromete la integridad de ductos y válvulas (IEA, 2022; Hydrogen Council, 2020).

Por ello, en muchos casos se requiere adaptar o incluso construir nuevas infraestructuras específicas para el hidrógeno, con materiales resistentes a la fragilización y sistemas de control altamente seguros. En contextos donde el transporte por ductos no es viable (como largas distancias o exportación), el hidrógeno puede ser transformado en vectores líquidos más estables como amoníaco (NH_3), metanol (CH_3OH) o portadores

orgánicos líquidos (LOHCs), lo que facilita su transporte marítimo o terrestre (BNEF, 2022; Soltaninia *et al.*, 2023).

Respecto al almacenamiento, el hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso a alta presión (350–700 bar), en forma líquida criogénica (a -253°C), o mediante absorción en materiales sólidos (hidruros metálicos, carbón activado, etc.). Cada método presenta ventajas y limitaciones: por ejemplo, el almacenamiento comprimido es más sencillo pero voluminoso; el líquido requiere alta energía para su licuefacción; y los materiales sólidos aún se encuentran en fases piloto o experimentales (IEA, 2022).

En comparación con el gas natural, el hidrógeno exige una nueva logística energética que involucra estaciones de compresión, tanques especiales, sistemas criogénicos, y mayor control en fugas por su alta inflamabilidad y difusión. Estos factores elevan los costos iniciales, aunque se espera que la maduración tecnológica y las economías de escala reduzcan estas barreras en la próxima década (Hydrogen Council, 2021).

En el contexto chileno, estas consideraciones son especialmente relevantes para el diseño de corredores logísticos e infraestructura portuaria en zonas como la Región del Biobío y Magallanes, donde se proyecta exportar hidrógeno o derivados hacia Asia y Europa (Ministerio de Energía, 2020; Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

5.1.3.- Competitividad del Hidrógeno Verde como combustible

El costo actual estimado de producción del hidrógeno verde en Chile está en el rango de 7-8 USD/kg, considerando electricidad, electrólisis, compresión y transporte (InduAmbiente, 2023). Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, en zonas con gran potencial renovable como Atacama o Magallanes, se proyecta que este precio podría bajar a $\leq 1,5$ USD/kg al año 2030, sin considerar distribución (Ministerio de Energía, 2020).

Dado que 1 kg de H_2V contiene ~ 33 kWh de energía útil, el costo energético actual puede calcularse como:

$$\frac{7 \text{ USD/kg}}{33 \text{ kWh/kg}} = 0,21 \text{ USD/kWh}$$

Como se está analizando el H_2V como combustible, es necesario que se compare con otro combustible de uso cotidiano como es el gas natural. El precio industrial del gas natural en Chile ronda los 0,061 USD/kWh, aunque este valor puede variar según el contrato de suministro o importaciones (UAI, 2021). Este valor incluye los costos de importación de GNL, infraestructura y transporte.

5.2.- Sector productivo Región del Bío Bío

La región del Biobío es una de las zonas con mayor relevancia económica e industrial de Chile. Su estructura productiva es diversa, combinando sectores tradicionales como la manufactura, la industria forestal, la pesca y la agricultura, con áreas emergentes como la generación energética renovable y los servicios tecnológicos. Esta diversidad ha contribuido a sostener el dinamismo regional, posicionándola como un territorio estratégico para la reconversión productiva y la implementación de tecnologías limpias como el hidrógeno verde (GORE Biobío, 2019; Banco Central de Chile, 2024).

- Industria manufacturera

La industria manufacturera es el principal motor económico de la región, con una participación destacada en el PIB regional. Dentro de este sector destacan la producción de celulosa y papel, la industria petroquímica, la metalmecánica y la elaboración de alimentos. Empresas como ENAP Refinería Bío Bío y Celulosa Arauco son actores clave del tejido industrial regional (Diario Concepción, 2025; Banco Central de Chile, 2024).

- Sector forestal

Biobío concentra el 44% de las plantaciones forestales de Chile, principalmente pino radiata y eucalipto. Este sector representa cerca del 76% de las exportaciones forestales del país y es clave en la producción de celulosa, madera aserrada y tableros (GORE Biobío, 2019). Empresas como CMPC y Arauco lideran las actividades del rubro y son, además, actores relevantes en la innovación en bioenergía y economía circular.

- Pesca y acuicultura

La región posee aproximadamente el 32% de la flota pesquera nacional, y concentra cerca del 50% del desembarque nacional de productos del mar. Las especies más capturadas son sardina, anchoveta, jurel y merluza. Talcahuano y Coronel son los principales puertos pesqueros, con presencia de infraestructura industrial para procesamiento y exportación (BiobioChile, 2024).

- Agricultura y agroindustria

El Biobío cuenta con suelos fértiles que permiten una producción agrícola diversificada, incluyendo cereales, hortalizas, frutales y cultivos industriales. Además, destaca la producción de leche y carne bovina. La agroindustria se ha fortalecido en la elaboración de alimentos procesados, productos orgánicos y bebidas, con orientación al mercado interno y externo (GORE Biobío, 2019).

- Energía

La región es un actor clave en el sistema energético nacional. Posee una importante capacidad de generación hidroeléctrica en el río Biobío, además de plantas termoeléctricas e infraestructura para el desarrollo de energías renovables no convencionales como la eólica y la biomasa. Este potencial energético, junto con su base industrial, la posiciona como un nodo estratégico para el desarrollo de hidrógeno verde (Ministerio de Energía de Chile, 2020; GORE Biobío, 2019).

- Servicios y conocimiento

El Gran Concepción actúa como centro de servicios avanzados, educación superior y ciencia aplicada. Universidades como la Universidad de Concepción, Universidad del Bío-Bío, Universidad Técnica Federico Santa María y centros tecnológicos como CIDERE o CICAT, generan capacidades relevantes para la innovación regional. Esta base institucional favorece la conformación de un ecosistema propicio para el emprendimiento tecnológico y la transición energética (GORE Biobío, 2019).

5.2.1.- Sector industrial del “Gran Concepción”

El Gran Concepción es una conurbación urbana ubicada en la Región del Biobío, Chile, y constituye uno de los principales polos urbanos, industriales y logísticos del país.

Esta área metropolitana está compuesta por un conjunto de comunas interconectadas que, debido a su proximidad geográfica y vinculación funcional, conforman un solo sistema urbano.

Las comunas que integran el Gran Concepción, como se aprecia en la Figura 2, son:

- Concepción (ciudad central)
- Talcahuano
- Hualpén
- San Pedro de la Paz
- Chiguayante
- Penco
- Tome
- Coronel
- Lota
- Hualqui

Esta conurbación alberga a más de un millón de habitantes, lo que la convierte en la segunda aglomeración urbana más grande de Chile, después del Gran Santiago. Se caracteriza por una alta concentración de actividad industrial, portuaria, comercial, educativa y de servicios, siendo un eje clave para el desarrollo económico del sur del país.

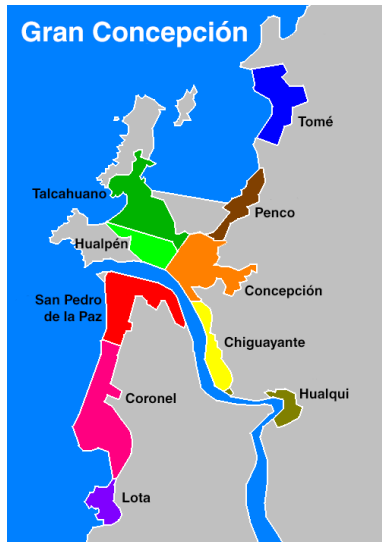


Figura 2.- Comunas pertenecientes al Gran Concepción

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_Concepción

A nivel industrial, el Gran Concepción destaca por:

- El complejo portuario e industrial de Talcahuano–San Vicente
- Las industrias forestales, metalmecánicas, petroquímicas y energéticas
- Un robusto sistema de infraestructura de transporte y logística

La presencia de importantes centros de investigación y universidades, como la Universidad de Concepción, Universidad del Bío Bío y la Universidad Técnica Federico Santa María

La relevancia estratégica del Gran Concepción lo posiciona como un espacio clave para el análisis de nuevas tecnologías energéticas, como el hidrógeno verde, especialmente en lo que respecta a su adopción en sectores industriales con capacidad instalada significativa y potencial de reconversión energética.

5.2.1.1.- Industrias productoras del Gran Concepción

Se visualizan industrias relevantes del Gran Concepción, estas se encuentran cercanas a los puertos como se muestra en la figura 3, a continuación se indica información relevante de cada industria.

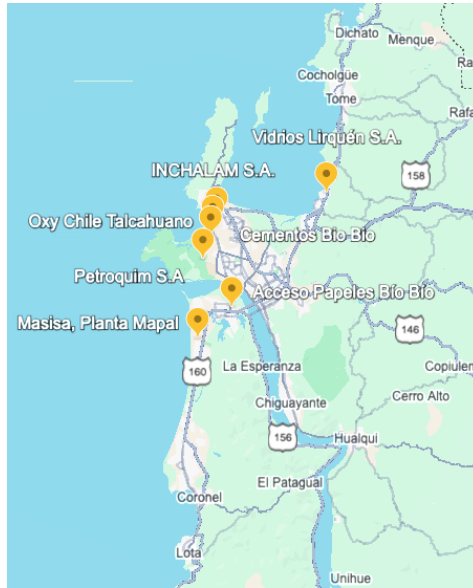


Figura 3.- Comunas pertenecientes al Gran Concepción

Fuente: <https://earth.google.com/>

a) Cementos Bío Bío



Empresa chilena que produce cemento, cal, hormigón y áridos en Chile y Argentina, comprometida con reducción de carbono.

Productos:

- Cemento (capacidad ~3,35 Mt/año), hormigón, cal, áridos

Matriz energética:

Históricamente usa fuelóleo, diésel y electricidad; desde 2024 inició uso de CDR (combustibles derivados de residuos) para reducir fósiles

Emissiones de CO₂ por tonelada de cemento bajaron de 571 kg en 2016 a 502 kg en 2017, una de las más bajas de la industria

b) Papeles Bío Bío



Planta papelera en San Pedro de la Paz, primera en Chile en certificar ISO 50001 (2012).

Productos:

Papel de impresión, basada en pulpa mecánica de pino radiata, ~125 000 t/año.

Matriz energética:

Emplea electricidad, vapor y combustibles (biomasa, gas natural, GLP y petróleo), con sistema de gestión energética y monitoreo online

c) Masisa



Líder en tableros de madera y derivados (MDF, MDP), con operaciones en Latinoamérica.

Productos:

Tableros MDF light/ul, MDP, melamina y revestimientos.

Matriz energética:

Desde 2022, 67 % de su energía proviene de biomasa; electricidad complementaria, con meta de reducción de GEI del 30 % para 2030 y desarrollo de cogeneración (~9,6 MW)

d) Inchalam



Industria chilena que produce alambres, cables de acero y mallas de refuerzo vial.

Productos:

Alambres de acero, mallas metálicas, cables para obras civiles.

Matriz energética:

Típicamente usa electricidad y consumo térmico industrial (LPG, GNL y Petróleo).

e) Vidrios Lirquen



Único fabricante de vidrio plano en Chile (fundado en 1933), ubicado en Penco, Biobío; parte del grupo NSG/Pilkington.

Productos:

Vidrio flotado, termopaneles Low-E, vidrio de control solar y seguridad.

Matriz energética:

La empresa utiliza diversas fuentes para sus operaciones, como electricidad, gas natural, y posiblemente combustibles fósiles para procesos específicos

f) Petroquím S.A.



Única petroquímica en Chile que produce polipropileno desde 1998 (licencia Spheripol®).

Productos:

Polipropileno (~120 000 t/año): homopolímero, copolímeros; usado en envases, embalajes, termoformado.

Matriz energética:

Uso intensivo de energía térmica y eléctrica sin desglose público; certificación ISO 14001 indica compromiso ambiental.

g) Oxy Chile



División química de “Occidental Petroleum” con operaciones en Chile (Talcahuano), produce PVC, cloro, soda caustica, potasa y otros.

Productos:

PVC, cloro, soda cáustica, potasa, productos para baterías, agua, químicos.

Matriz energética:

En el caso de Chile, la matriz energética de Oxy podría estar influenciada por la producción de petróleo y gas, así como por el uso de fuentes de energía renovable en sus operaciones.

5.2.1.2.- ENAP Refinería Bío Bío: Uso de hidrógeno

La Refinería Bío Bío, operada por ENAP y ubicada en la comuna de Hualpén, constituye uno de los complejos industriales más relevantes de la Región del Biobío. Con una capacidad de procesamiento superior a los 100 mil barriles diarios, esta instalación cumple un rol clave en la producción de combustibles para el mercado nacional. En su interior, destaca la existencia de una unidad dedicada a la producción de hidrógeno, conocida como planta CHT (Catalytic Hydrogen Treatment).

La planta CHT produce hidrógeno gris, generado a partir del reformado de gas natural, proceso que, si bien es eficiente, conlleva importantes emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Este hidrógeno es utilizado internamente en procesos críticos de refinación, tales como:

- Hidrodesulfuración, para eliminar azufre de los combustibles y cumplir con normativas medioambientales.
- Hidrocracking, para romper cadenas de hidrocarburos pesados y obtener productos más ligeros como diésel y gasolina.

Se estima que ENAP produce aproximadamente el 95 % del hidrógeno utilizado actualmente en Chile (Nuevaminería, 2023), consolidándose como el principal productor nacional de este insumo industrial.

Eficiencia y recuperación de gases

En años recientes, ENAP ha implementado tecnologías de recuperación de CO_2 desde los gases residuales generados en la planta CHT, los cuales contienen mezclas de CO_2 , H_2 y CH_4 . Esto ha permitido la recuperación parcial de hidrógeno no utilizado y una mejora en la

eficiencia del sistema, además de contribuir a la reducción de emisiones (Poch y Asociados, 2023).

Potencial de transición al hidrógeno verde

Actualmente no se utiliza hidrógeno verde en la Refinería Bío Bío. Sin embargo, la infraestructura ya existente la posiciona favorablemente para una transición futura. La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde Biobío 2024-2050 proyecta que esta refinería podría reemplazar hasta un 30 % del hidrógeno gris por hidrógeno verde hacia el año 2035, siempre que se implementen las condiciones tecnológicas y logísticas adecuadas (Plan Hidrógeno Verde Biobío, 2024).

Adicionalmente, ENAP ha iniciado proyectos piloto de producción de hidrógeno verde en otras zonas del país, como el proyecto Cabo Negro en Magallanes, el cual contempla el uso de electrólisis alimentado por energía eólica (ENAP, 2024). Estas iniciativas podrían ser escaladas o replicadas en el complejo de Hualpén, considerando el desarrollo regional y la disponibilidad de infraestructura portuaria.

5.2.2.- Infraestructura portuaria

La Región del Biobío presenta una base portuaria sólida que la posiciona favorablemente para participar en la cadena logística del hidrógeno verde en Chile. Según el estudio elaborado por la GIZ en conjunto con el Ministerio de Energía (2024), la región cuenta con diversos terminales portuarios que han demostrado capacidad operativa para el manejo de carga de proyecto, especialmente relacionada con energía eólica. Entre ellos destacan Puerto Coronel, que ya ha operado con palas de hasta 80 metros de longitud, y los terminales de Lirquén y San Vicente, ambos con experiencia y equipamiento para la atención de componentes de gran envergadura (GIZ, 2024, pp. 54–55).

Además, el terminal marítimo Escuadrón de Oxiquim S.A., ubicado en Coronel, actualmente se encuentra habilitado y en operación para la transferencia de metanol, lo que lo convierte en un activo estratégico para el desarrollo del ecosistema de hidrógeno verde en la región (GIZ, 2024, p. 30). Esta capacidad instalada podría facilitar la futura exportación de derivados del H_2V , como el amoníaco, además de su distribución interna mediante cabotaje.

No obstante, bajo un escenario optimista de producción proyectado para 2050, la Región del Biobío requerirá al menos un sitio de atraque adicional para el desembarque de productos como amoníaco por cabotaje. La proyección considera una demanda de aproximadamente tres millones de toneladas anuales para la región del Biobío, lo que implica disponer de una infraestructura con capacidad de transferencia de 500 toneladas por hora y un área mínima de dos hectáreas por sitio (GIZ, 2024, pp. 13–14).

Frente a estas necesidades, se plantea que existen alternativas viables para fortalecer la capacidad portuaria de la región, principalmente a través de la reconversión de terminales actualmente en desuso, como por ejemplo el terminal portuario del complejo Huachipato que actualmente está con poco movimiento tras el cierre de la industria. Se trata, en su mayoría, de instalaciones previamente utilizadas para abastecer centrales a carbón que han salido del sistema o están próximas a hacerlo. Estas infraestructuras podrían ser habilitadas nuevamente, previa obtención o modificación de resoluciones de habilitación de la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante (DIRECTEMAR) y de resoluciones de calificación ambiental (RCA), así como la tramitación de extensiones de concesiones marítimas cuando corresponda (GIZ, 2024, pp. 58–59).

En términos logísticos, se proyecta que el Biobío jugará un rol relevante como centro receptor de productos derivados del hidrógeno, en especial amoníaco, junto con la Región de Valparaíso. Este posicionamiento incluye una función estratégica de respaldo para enfrentar emergencias que puedan afectar la continuidad operativa de los terminales principales (GIZ, 2024, p. 14). Así, la consolidación de la infraestructura portuaria en Biobío es clave para asegurar la viabilidad del despliegue del hidrógeno verde en el sur de Chile.

5.3.- Adopción de la tecnología de H_2V

La octava región es un importante polo industrial del país, donde se concentran industrias relevantes a nivel país, incluso hasta hace unos meses se contaba con la única empresa siderúrgica a nivel nacional. Debido a su ubicación estratégica junto al océano pacífico, el sector industrial de la región se ve favorecido con el acceso a algunos de los puertos más importantes a nivel país además, se observa que con las medidas de descarbonización del sector eléctrico a nivel nacional ha ido disminuyendo el requerimiento

de carbón para las termoeléctricas y calderas con este combustible fósil, esto deja abierta la posibilidad de uso de estas instalaciones portuarias para la reconversión, implementando tecnologías para la entrada y/o salida de este vector energético. En este último punto, es importante mencionar el puerto y terreno que posee la empresa CAP en donde estaba instalada la Siderúrgica Huachipato.

En relación a las empresas consideradas, se observa que todas tienen dentro de su matriz energética a combustibles fósiles sin embargo, algunas tienen trabajo adelantado al utilizar gas natural como fuente energética lo que quiere decir que tienen infraestructura instalada para el trabajo con gases por lo que, eventualmente, podrían reconvertirse con menor dificultad adoptando los estándares para el manejo del H_2V y así evitar la infraestructura que pueda sufrir fragilidad al cambiar al nuevo gas, incluso se podría partir con una mezcla de gases para hacer más fluida la transición. En particular, las empresas que utilizan gas natural como fuente de energía son: Papeles BioBio, Inchalam, Vidrios Lirquén, Petroquím y Oxy Chile. En particular, Vidrios Lirquén está utilizando Hidrógeno Gris para producir vidrio, comprándolo a Indura siendo la transición a Hidrogeno Verde algo más natural. Las otras empresas indicadas podrían utilizar Hidrogeno Verde en sus procesos, pero tendrían que adecuar el proceso para trabajar con gas.

La gran limitante para la adopción definitiva del hidrógeno verde por parte de las empresas es el precio que tiene en la actualidad, ya que supera con creces a los combustibles fósiles, ya que es aproximadamente 4 veces más costoso (0,21 USD/kWh vs 0,061 USD/kWh) además, existe en el mercado el Hidrógeno Gris que es más barato que el Hidrógeno Verde, aproximadamente un tercio del valor (0,09 USD/kWh vs 0,21 USD/kWh).

Por otra parte, y con relación a la planta que ENAP tiene en la comuna de Hualpén se observa que la unidad CHT representa una ventaja comparativa regional, al disponer de experiencia operativa, infraestructura especializada y procesos donde el hidrógeno es fundamental. Esto podría facilitar una adopción progresiva del hidrógeno verde, partiendo con mezclas o reemplazos parciales, como parte de un proceso planificado de reconversión tecnológica, en línea con los objetivos de descarbonización nacional y regional.

5.4.- Prospección tecnológica e inversión estimada

La adopción del hidrógeno verde en el sector industrial del “Gran Concepción” no solo representa un cambio energético, sino una transformación tecnológica de gran alcance. Esta transición implica la modificación o reemplazo de equipos industriales, implementación de nuevas normativas de seguridad, infraestructura para almacenamiento y transporte, y, en muchos casos, el rediseño del proceso productivo mismo. Además, requiere innovación organizacional, inversión en capacitación y una articulación efectiva entre industria, centros de I+D, sector público y la academia (Hydrogen Council, 2020; CPC BioBío, 2024).

5.4.1.- Necesidades tecnológicas

Para una transición eficiente hacia el uso de hidrógeno verde, las industrias deben enfrentar desafíos tecnológicos claves:

- ◆ Adaptación o reemplazo de calderas, hornos y quemadores que operan con combustibles fósiles
- ◆ Instalación de sistemas de monitoreo y detección de fugas nuevos, dada su alta volatilidad y permeabilidad en materiales metálicos.
- ◆ Reemplazo de tuberías, válvulas y componentes por materiales resistentes a la fragilización (IEA, 2022)
- ◆ Desarrollo de sistemas de almacenamiento presurizado o criogénico adecuado para los requerimientos de cada planta.
- ◆ Capacitación del personal en protocolos de seguridad específicos para el manejo del H₂V (Hydrogen Council, 2020)

Esto debe ser parte de una estrategia de innovación tecnológica territorial, que promueva soluciones adaptadas a las características de la región y sus capacidades instaladas (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

5.4.2.- Estimación de inversión por tipo de industria.

Diversos estudios internacionales estiman que la inversión necesaria para reconvertir procesos térmicos industriales al uso de hidrógeno verde se encuentra en un rango entre USD 500 y USD 2.000 por cada kW térmico instalado ((IRENA, 2022; Hydrogen Council, 2021). Esta variabilidad depende de factores como la escala de operación, tipo de industria, grado de electrificación y complejidad de los procesos en sí.

A partir de la revisión de la literatura técnica y promedios de consumo energético por rubro, se ha elaborado una estimación preliminar de inversión para las empresas analizadas en este estudio y considerando una reconversión del 3%. Estas cifras corresponden a un rango orientativo y no sustituyen una evaluación detallada de cada planta.

Tabla N°1.- Estimación de inversión por empresa

Empresa	Proceso principal	Estimación de demanda térmica (MW)	Rango estimado de inversión (MMUSD)
Vidrios Lirquén	Hornos de fusión de vidrio (ya ha incorporado hidrógeno)	<u>1,3 – 1,7</u>	0,75 a 3
MASISA	Prensado térmico	<u>1,1 - 1,5</u>	0,65 a 2,6
Papeles Bío Bío	Calderas, secado, vapor	<u>0,5 – 1,5</u>	0,5 a 2
INCHALAM	Trefilado y tratamiento térmico del acero	<u>0,3 – 0,7</u>	0,25 a 1
Cementos Bío Bío	Hornos de Clinker	<u>9,8 – 10,2</u>	5 a 20
OXY Chile	Producción de cloro, soda cáustica y PVC	<u>0,4 – 0,8</u>	0,3 a 1,2
Petroquím	Procesos químicos intensivos	<u>1,3 – 1,7</u>	0,75 a 3

Fuente: elaboración propia con datos de (IRENA, 2022; Hydrogen Council, 2021)

Estas proyecciones permiten visualizar el orden de magnitud de la inversión requerida y evidencian que las industrias que ya operan con gas natural o hidrógeno gris presentan una ventaja comparativa en términos de menor esfuerzo de reconversión (IEA, 2022; InduAmbiente, 2023).

6.- Conclusiones

Se observa que la región del Bío Bío cuenta con condiciones técnicas y territoriales favorables para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, destaca su diversidad energética, capacidad industrial y sobre todo su conectividad portuaria estratégica.

En relación con las empresas analizadas, el análisis muestra que varias de las industrias del Gran Concepción presentan condiciones iniciales positivas para la transición energética, las que ya operan con gas natural podrían iniciar con una mezcla que les permita migrar en el futuro al uso 100% del hidrógeno verde.

La unidad de producción de Hidrógeno CHT de ENAP en Hualpén representa un caso especial de producción y manejo del Hidrógeno, al contar con experiencia, infraestructura y procesos que podrían facilitar una transición hacia el hidrógeno verde.

Existe un interés por la innovación energética en la región, prueba de ello es la realización del Green Hydrogen Summit ChileLAC 2025 en la región por su importancia estratégica, pero aún se requiere mayor articulación entre el sector público, universidades, empresas y centros tecnológicos para consolidar una cadena de valor que potencie el uso del H_2V .

Se observa que el principal obstáculo para la adopción a un hidrógeno verde es el alto costo que tiene en la actualidad la producción de éste lo que significa que no puede competir con otras fuentes de energía fósiles y tampoco con la producción del hidrógeno gris por lo que requerirá subsidios, incentivos o esquemas de financiamiento que reduzcan la brecha para hacerlo viable.

Con respecto a la estimación de inversión por cada industria, se visualizan montos elevados considerando que solo se ha estimado en relación a un 3% de reconversión a H_2V , incluso así, estos valores deben ser analizados con una perspectiva de mediano y largo plazo ya que se espera que el costo del hidrógeno verde continúe disminuyendo, además, las presiones regulatorias sobre las emisiones de carbono y la creciente demanda de productos con baja huella ambiental aumentarán el valor estratégico de la reconversión.

7.- Bibliografía

- Banco Central de Chile. (2024). Informe de actividad económica regional: Primer trimestre 2024.
<https://www.bcentral.cl>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Innovacion-y-desarrollo-tecnologico-para-la-cadena-de-valor--del-hidrogeno-verde-en-Chile.pdf>
- BiobioChile. (2024, junio 26). Región del Biobío presenta crecimiento del 1,4% en primer trimestre de 2024. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/06/26/region-del-bio-bio-presenta-crecimiento-del-14-en-primer-trimestre-de-2024-segun-el-banco-central.shtml>
- BloombergNEF (BNEF). (2022). Hydrogen Economy Outlook. <https://about.bnef.com>
- CPC Biobío. (2024). Transformar el Biobío: Industria, tecnología y talento para el futuro.
<https://www.cpcbiobio.cl/2024/11/transformar-el-biobio-industria-tecnologia-y-talento-para-el-futuro/>
- Diario Concepción. (2025, enero 2). Manufactura y pesca siguen siendo las industrias con mayor incidencia en el PIB del Biobío.
<https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2025/01/02/manufactura-y-pesca-siguen-siendo-las-industrias-con-mayor-incidencia-en-el-pib-del-biobio.html>
- ENAP. (2024). ENAP adjudica construcción de su primera planta de hidrógeno verde.
<https://www.enap.cl/sala-de-prensa/enap-adjudica-construccion-de-su-primera-planta-de-hidrogeno-verde>
- GIZ, Subiabre y Sánchez Ingenieros Asociados Limitada. (2024). Estudio de cuantificación de la capacidad de infraestructura portuaria chilena para proyectos de hidrógeno (1.ª ed.). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH / Ministerio de Energía de Chile.
- GORE Biobío. (2019). Diagnóstico económico-productivo de la Región del Biobío. Gobierno Regional del Biobío. https://gorebiobio.cl/wp-content/uploads/2019/01/ANEXOS_DIAGNOSTICO_SRI_BIOBIO.pdf
- Hydrogen Council. (2020). Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective.
<https://hydrogencouncil.com/en/reports/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>

- Hydrogen Council. (2021). Hydrogen for Net Zero: A critical cost-competitive energy vector. <https://hydrogencouncil.com/en/reports/hydrogen-for-net-zero>
- InduAmbiente. (2023). Claves del hidrógeno verde. Recuperado de <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde>
- International Energy Agency (IEA). (2022). Global Hydrogen Review 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- IRENA. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. <https://www.irena.org/publications>
- Ministerio de Energía de Chile. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Energía de Chile. (2025). Ministro Pardow destacó potencial del hidrógeno verde para descarbonizar la industria en Biobío. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/ministro-pardow-destaco-potencial-del-hidrogeno-verde-para-descarbonizar-la-industria-en-biobio>
- Nuevaminería. (2023, noviembre 6). ENAP produce el 95% del hidrógeno del país y Biobío aspira a convertirse en pieza clave para la industria. <https://www.nuevamineria.com/revista/enap-produce-el-95-del-hidrogeno-del-pais-y-biobio-aspira-a-convertirse-en-pieza-clave-para-la-industria>
- Plan Hidrógeno Verde Biobío. (2024). Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde Biobío 2024–2050. <https://www.planhidrogenoverde.cl/wp-content/uploads/2024/06/Hoja-de-Ruta-H2V-Biobio-.pdf>
- Poch y Asociados. (2023, octubre 3). CO₂ recovery from tail gas stream of CHT hydrogen plant at Bio Bío Refinery (ENAP). <https://pya.cl/en/2023/10/03/co2-recovery-from-tail-gas-stream-of-cht-hydrogen-plant-at-bio-bio-refinery-enap/>
- Redimin. (2025). Chile impulsa la industria del hidrógeno verde con la creación de las primeras fábricas de electrolizadores en Biobío y Santiago. <https://www.redimin.cl/chile-impulsa-la-industria-del-hidrogeno-verde-con-la-creacion-de-las-primeras-fabricas-de-electrolizadores-en-biobio-y-santiago/>
- Soltaninia, B., Lu, H., Ismail, N., & Liu, Y. (2023). Nitrate pollution in urban runoff: A comprehensive risk assessment for human and ecological health. *Science of The Total Environment*, 883, 163674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163674>

Universidad Adolfo Ibáñez (UAI). (2021). Industria del hidrógeno verde en Chile: desafíos para su implementación. Recuperado de <https://uai.cdn7pm.net/documentos/industria-del-hidrogeno-verde-en-chile-desafios-para-su-implementacion.pdf>

8.- Anexos

Extractos de Estrategias y Políticas Públicas sobre Hidrógeno Verde

A continuación, se presentan extractos relevantes de documentos estratégicos nacionales y regionales que respaldan el desarrollo del hidrógeno verde en Chile y, particularmente, en la Región del Biobío. Estos textos refuerzan el contexto político y programático en el que se enmarca esta investigación.

1. Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (Ministerio de Energía, 2020)

"Chile tiene el potencial de producir el hidrógeno verde más barato del mundo, aprovechando sus ventajas naturales en generación renovable. El país apunta a convertirse en líder mundial en producción y exportación de hidrógeno verde antes de 2040".

Fuente: Ministerio de Energía de Chile (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.

2. Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde Biobío 2024–2050

"La Región del Biobío se posiciona como un nodo logístico-industrial estratégico para el desarrollo del hidrógeno verde en Chile, dada su infraestructura portuaria, industrial y energética. Se estima que hacia 2035, el 30% del hidrógeno utilizado en refinerías podría provenir de fuentes renovables."

Fuente: Plan Hidrógeno Verde Biobío (2024). Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde Biobío 2024–2050.

3. Declaración del Ministro de Energía – Green Hydrogen Summit ChileLAC 2025

"El hidrógeno verde se desplegará especialmente en regiones como el Biobío, donde se concentran industrias intensivas en energía que requieren una reconversión tecnológica urgente para cumplir con los compromisos de carbono neutralidad".

Fuente: Ministerio de Energía de Chile (2025).

Estimación de Demanda Térmica por Industria

Este anexo tiene por objetivo fundamentar las estimaciones de demanda térmica utilizadas para proyectar los costos de reconversión tecnológica hacia hidrógeno verde en distintas industrias del Gran Concepción. Debido a la falta de datos específicos de consumo energético por planta, se recurrió a fuentes técnicas internacionales y reportes sectoriales, considerando valores promedio de consumo térmico específico por tipo de proceso industrial.

La estimación de la demanda térmica clave (en MW) por industria se realizó a partir de los siguientes pasos:

- Revisión de literatura técnica sobre consumos energéticos por tonelada o metro cúbico producido en industrias clave.
- Supuestos de producción anual basada en información pública de empresas o datos sectoriales.
- Conversión de consumo energético total (GJ/año) a MW térmicos, considerando una operación estándar de 8.000 horas/año.
- Ajuste según proporción de procesos realmente susceptibles de reconversión a hidrógeno verde en una fase inicial (por ejemplo, no toda la demanda térmica de una planta cementera es reconvertible en la primera etapa)

Industria	Rango típico de consumo térmico específico	Valor utilizado	% reconv.	MW calculados	Fuente
Cemento	3–6 GJ/ton de clínker	4,5 GJ/ton	3	9,8 – 10,2	IEA (2022), ECRA (2021)
Papel y celulosa	6–10 GJ/ton (incluye secado y calderas)	8 GJ/ton	3	0,5 – 1,5	TAPPI, BID (2023)
Madera (Masisa)	3–6 GJ/m ³ prensado	4,5 GJ/ton	3	1,1 – 1,5	FAO, Masisa reportes
Metalmecánica (INCHALAM)	1–3 GJ/ton acero	2 GJ/ton	3	0,3 – 0,7	Hydrogen Council (2020)
Vidrio	8–12 GJ/ton vidrio flotado	10 GJ/ton	3	1,3 – 1,7	NSG Group, Pilkington, IEA
Petroquímica	>10 GJ/ton en reformado, craqueo, etc.	12 GJ/ton	3	1,3 – 1,7	IEA (2022), Petrochemical Outlook
Cloro/soda (Oxy)	3–6 GJ/ton, depende del proceso	4,5 GJ/ton	3	0,4 – 0,8	Eurochlor, EPA USA

Ejemplo: Cementos Bío Bío

1.- Se identifica la producción anual de cemento y clínker

- Cementos Bío Bío produce aproximadamente 3,35 millones de toneladas de cemento al año
- El clínker representa aproximadamente el 70% del cemento
 - Con estos dos valores se obtiene que hay una producción de Clinker de aproximadamente 2,345 millones de toneladas al año

2.- Se determina el consumo energético específico (en este caso del proceso de clínker)

- Según la bibliografía, la fabricación de clínker consume entre 3 y 6 GJ/ton
- Se adopta un valor de 4,5 GJ/ton (esto es solo promedio)
 - Con estos valores da un consumo al año de 10.552.500 GJ

3.- Se convierte de GJ/año a MWh/año

- $1\text{GJ} = 0,278\text{ MWh}$
 - Da 2.933.595 MWh al año

4.- Se considera una operación continua por lo que son 8760 horas

- Resultando en aproximadamente 335 MW térmicos

5.- Con una base de reconversión de solo el 3% para partir la modificación

- Da un resultado de 10,05 MW térmicos

6.- Se redondea entre 9,8MW y 10,2MW

7.- Ahora utilizamos el valor más próximo de la demanda térmica para calcular el rango de inversión, o sea 10MW

- Rango bajo: $500\text{ USD}/\text{kW} \times 10.000\text{kW} = 5.000.000\text{ USD}$
- Rango alto: $2.000\text{ USD}/\text{kW} \times 10.000\text{kW} = 20.000.000\text{ USD}$