



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM

AUGUSTO JAVIER GALLARDO HENRIQUEZ

PROFESOR GUÍA: HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGISTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

SANTIAGO – CHILE
2022



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM

POR: AUGUSTO JAVIER GALLARDO HENRIQUEZ

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

PROFESORES GUIA: Héctor Valdés-González, PhD

PROFESOR INTEGRANTE 1: Alex Godoy, PhD

PROFESOR INTEGRANTE 2: Diego Rivera, PhD

Para completar las exigencias del Grado de Magister en gestión de la sustentabilidad.

Marzo, 2022

Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: **Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría (o co-autoría) y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



NOMBRE COMPLETO DEL ALUMNO

Firma

*Dedico mi trabajo
a mi familia, amigos y profesores,
espero que esto
sea una herramienta que aporte al
desarrollo sustentable.*

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a las personas que estuvieron directamente involucradas en la elaboración de este trabajo, los profesores Hector Valdes, Alex Godoy y Lorenzo Reyes, su apoyo y conocimiento fueron elementos claves para lograr un desarrollo integral tanto de este proyecto como en el ámbito personal.

Por otra parte, agradezco a todos los profesores del Magíster que me han enseñado tanto habilidades técnicas como blandas, elementos fundamentales para mi formación profesional y crecimiento personal.

También, agradezco a Paulina García y a todas las personas que forman parte del equipo de la Universidad del Desarrollo, que gracias a su oportuna labor y buena voluntad generan un ambiente prospero que ayuda mucho a mejorar la experiencia del magister junto con el desarrollo de los futuros profesionales.

Por último, dar las gracias a los miembros de mi familia por darme la oportunidad y apoyarme en mi desarrollo profesional, a mis compañeros de curso y amigos de la vida, que también fueron muy influyentes en mi opinión, estoy muy agradecido de las largas discusiones y los distintos puntos de vista que permitieron generar interacciones en función de profundizar los distintos temas relacionados a este trabajo que como resultado fueron un gran aporte para este proyecto de grado.

Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM

Augusto Javier Gallardo Henríquez

Bajo la supervisión del Profesor Héctor Valdés González, PhD, en la Universidad del Desarrollo de Chile

Resumen

Este trabajo presenta una estrategia de cálculo para la evaluación de los costos de la producción de hidrógeno verde, en condición actual para Chile. Ello considera la relación entre matriz energética, electrolizadores, el mercado eléctrico, y los incentivos del gobierno, para la generación de energías renovables y la descarbonización de la generación eléctrica. El objetivo de este trabajo es calcular el costo nivelado del hidrógeno verde para la evaluación de factibilidad de producción según las condiciones actuales del mercado chileno. Para lograrlo se propone una aproximación cuantitativa basada en el análisis de fuentes de información relevantes, proveedores de equipos electrolizadores, junto con el costo de la energía eléctrica y agua como materias primas, además del oxígeno como subproducto y el factor de planta, para el cálculo del costo nivelado. Los resultados muestran el costo de producción nivelado del hidrógeno por kilo se estima en aproximadamente 3.4 USD, como consecuencia de la relación de variables claves en el entorno actual. Este estudio concluye que, dado el cálculo propuesto, se requiere afectar a la baja, sus materias primas, los costos de inversión y operación junto con la consideración de que se requiere de una matriz energética compuesta en su totalidad por energía renovable.

PALABRAS CLAVE: Mercado eléctrico; Energías renovables; Análisis de costos; Costo nivelado del hidrógeno; Matriz energética

HIGHLIGHTS

Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM

Augusto Javier Gallardo Henríquez

- Expone distribución de renovables y no renovables de la matriz energética de Chile.
- Evalúa factibilidad del hidrógeno verde según condiciones actuales dadas en Chile.
- Propone aproximación cuantitativa de los principales requerimientos del hidrógeno.
- Muestra el costo nivelado del hidrógeno por kilo se estimado en aproximadamente 3.4 USD.
- Expone la necesidad de matriz energética compuesta en su totalidad por renovables.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	INCORPORACIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE AL MERCADO	9
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA	9
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO	12
1.4	OBJETIVO GENERAL	13
1.4.1	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.5	PROPUESTA METODOLÓGICA	13
1.6	ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO	16
2	INFORMACIÓN Y RESULTADOS.....	17
2.1	PROCEDIMIENTO DE RECOGIDA Y ANÁLISIS DE DATOS.....	17
2.2	PROCESO DE CÁLCULO Y RECOGIDA DE INFORMACIÓN.....	19
2.3	LOS DATOS RECOGIDOS:	19
2.4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	20
2.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
3	ARTÍCULO	34
4	CONCLUSIONES GENERALES	47
4.1	PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS	48
5	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	50
6	ANEXO: REPORTE DE PLAGIO.....	54

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, dados los problemas producidos por la contaminación y el calentamiento global, nuestra sociedad se encuentra en una etapa sin precedentes respecto de la producción de energía renovable, ya que la producción de energía en base a combustibles fósiles es uno de los mayores emisores de gases contaminantes. A modo de avanzar en la mitigación de la contaminación, la investigación y desarrollo enfocada en la sustentabilidad, ha permitido en los últimos años construir infraestructura de producción de energías limpias que posiciona a Chile como uno de los principales productores de energía renovable.

El potencial de generación de energía renovable en Chile, supera la demanda del sistema eléctrico (Ministerio de energía, 2020), y dada la variabilidad de los recursos renovables, junto con el alto costo del almacenamiento eléctrico en baterías, es que es inminente trabajar en soluciones que permitan maximizar la generación eléctrica renovable, junto con su utilización efectiva, y de esta manera dar confiabilidad al sistema eléctrico junto con alimentar industrias de alto consumo energético, con el fin de disminuir al máximo las emisiones de gases contaminantes.

Cuando el potencial de generación eléctrica supera la demanda, el diferencial de energía que sería posible generar no se aprovecha, debido al alto costo del almacenamiento de la energía eléctrica, sin embargo el almacenamiento de hidrógeno como elemento químico, producido mediante la electrolisis del agua, se presenta como una solución a la pérdida de generación renovable actual ya que es posible producir hidrógeno, sin emitir gases contaminantes, al utilizar electricidad producida con energía renovable y agua utilizando electrolizadores de membrana de intercambio protónico.

Dicho lo anterior, y considerando que el hidrógeno se puede utilizar como combustible, es que este se presenta como una solución a gran escala para la descarbonización de las operaciones industriales, ya que ni en el proceso productivo del hidrógeno, ni en su combustión, se generan gases contaminantes, por lo que avanzar en tecnologías que permitan tanto su producción a un valor competitivo frente a los combustibles fósiles, como celdas de combustible eficientes que permitan su utilización, son elementos fundamentales para la descontaminación producida por la emisión de gases contaminantes al medioambiente.

Dada la situación actual, producida por los altos niveles de contaminación es que se explica que la prosperidad global está directamente relacionada con la producción de energía, y esta a su vez con la contaminación, por lo que se hace estrictamente necesario para aumentar la calidad de vida de las futuras generaciones, el desarrollo de tecnologías limpias que permitan producir energía sin contaminar, como lo es el caso del hidrógeno verde.

1.1 Incorporación del hidrógeno verde al mercado

Dado el contexto mencionado anteriormente, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿Qué condiciones deben existir para que el hidrógeno verde presente un costo competitivo que permita una incorporación exitosa al mercado?

En efecto, actualmente en Chile se adolece de tecnologías desarrolladas a nivel comercial que permitan utilizar hidrógeno como combustible de manera masiva, además de una cultura relacionada a su uso y manejo. Lo que claramente representa una brecha frente al manejo del diésel, ya que este tiene la ventaja de ser liquido a temperatura y presión ambiental, y además su manipulación es procedimiento conocido y habitual, no así con el hidrógeno.

1.2 Breve discusión de la literatura

La necesidad de disminuir los gases efecto invernadero, dada la situación actual producida por el calentamiento global se ha vuelto una prioridad a nivel mundial, la utilización de combustibles fósiles como fuente de energía representa aproximadamente un 85% de la contaminación del aire en países de bajos ingresos (Hurtubia, 2019). Es por esto, que el hidrógeno verde, se presenta como solución a la contaminación proveniente de la generación de energía ya que su consumo permite el reemplazo de los derivados del petróleo y del uso del carbón, como fuentes energéticas.

El crecimiento de áreas urbanas junto con el aumento del bienestar social se asocia a un mayor consumo energético (Mendes, F. H., Romero, H., & Ferreira da Silva Filho, D, 2020.) esto explica en parte, el aumento de la contaminación global debido al desarrollo humano sostenido en el tiempo. La producción de energía y combustibles de manera sustentable se expone entonces como un pilar fundamental para el desarrollo futuro de las próximas generaciones. La sinergia en función de la sustentabilidad entre planes tanto sociales como

gubernamentales, junto con la evaluación y ejecución de proyectos se muestran como un mecanismo clave para la disminución de la contaminación. (Giannotti, et al., 2019).

El potencial de generación de energía renovable en Chile, se estima en aproximadamente 70 veces la capacidad instalada (Ministerio de energía, 2020), por lo que la producción de hidrógeno verde, como vector energético (almacenamiento de energía) se presenta como una herramienta clave para disminuir la contaminación y aprovechar los peaks de generación, ya que actualmente cuando la generación renovable es superior a la demanda del sistema eléctrico el diferencial de energía no es utilizado, debido a que el costo del almacenamiento de electricidad en baterías a gran escala no presenta viabilidad económica (Ministerio de energía, 2018.) por lo que utilizando el excedente de energía renovable se podría generar hidrógeno verde. Los beneficios más evidentes de almacenar este combustible son aumentar la generación eléctrica renovable, dar confiabilidad al sistema eléctrico nacional y la disminución de las emisiones producidas por el uso de carbón, el diésel y sus derivados.

Producción económicamente viable de hidrógeno verde

El costo de la generación de hidrógeno, mediante electrolizadores, depende mayoritariamente de la disponibilidad de electricidad, junto con los costos de inversión y operación del equipo (Guerrero, 2020), sin embargo, para la producción de hidrógeno verde en particular, es necesario que la electricidad utilizada en el proceso productivo sea renovable, debido a que, si existen emisiones de gases contaminantes en el proceso, el hidrógeno resultante no se clasifica como verde.

Dado el contexto anterior es que para una disminución importante en el costo de producción del hidrógeno verde, se requiere una matriz energética compuesta en su totalidad por energía renovable, ya que de lo contrario, los equipos electrolizadores al ser conectados al sistema eléctrico (on grid), no estarían produciendo hidrógeno verde, y los sistemas eléctricos independientes (off grid), tienen la desventaja de presentar un menor tiempo de operación lo que en términos de evaluación de proyectos se entiende como factor de planta, esto se explica por la variabilidad de los recursos para la generación eléctrica renovable como los eólicos y solares, que no permiten una alimentación continua sin baterías.

Electrolizador PEM

Un equipo electrolizador se compone de dos terminales metálicos: ánodo y cátodo, separados a una cierta distancia, los cuales deben ser sumergidos en una solución o electrolito para generar la electrolisis. El electrolizador PEM permite generar el proceso de electrólisis utilizando agua como electrolito, esto se hace mediante una corriente continua en contacto con el agua lo que genera la separación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo que se llama electrolizador. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua. El cátodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal negativo. Al aplicar tensión eléctrica en estos electrodos se produce la reacción electroquímica en la superficie de ellos, Finalmente en el ánodo se produce oxígeno y en el cátodo se produce hidrógeno (Soto, 2021).

Producción global de hidrógeno

El método de producción de hidrógeno denominado reformación de metano con vapor (Steam Methane Reformation - SMR) es el más común y de menores costos tanto de inversión como de operación (Basile, 2015). El proceso SMR genera emisiones de CO₂, por lo que el resultado es hidrógeno que no es verde ya que existen emisiones de gases contaminantes en su proceso productivo. Este método presenta una amplia utilización comercial, la variación en el costo de la producción se relaciona directamente con el precio del gas natural debido a que esta es la principal materia prima (Fraile et al., 2015). A su vez, la producción mundial de hidrógeno en base a carbón, es decir hidrógeno gris, es actualmente responsable de unos 830 millones de toneladas de dióxido de carbono al año, equivalentes al 2% de emisiones en el mundo en el año 2017 (Agencia Internacional de energía, 2020).

Actualmente la distribución del uso del hidrógeno se presenta como: producción de amoníaco (84%) usado para obtención de plásticos y fertilizantes principalmente, producción de metanol (12%) utilizado para la obtención de formaldehído y anticongelantes, poliuretano (2%) producto relacionado a la producción de insumos relacionados a la industria de la construcción, y finalmente nylon (2%) utilizado mayoritariamente en la industria textil (Vásquez & Salinas, 2015).

Sin embargo, considerando que el hidrógeno puede ser utilizado en celdas de combustible, para producir energía eléctrica, es que podría reemplazar los equipos que actualmente

funcionan a diésel o carbón, que son los combustibles que emiten la mayor cantidad de gases contaminantes en el mundo, por lo que el hidrógeno verde se presenta como solución a la contaminación del planeta.

Beneficios del hidrógeno verde: Caso de la minería

La industria minera emite una gran cantidad de gases efecto invernadero, debido a la naturalidad de sus operaciones, por lo que su descarbonización es fundamental para la disminución de emisiones de gases que propician el efecto invernadero.

Considerando la geología de los yacimientos mineros, y los costos asociados al transporte de mineral, que afectan directamente el precio de venta del producto final, es que, en el largo plazo, la minería subterránea presenta una ventaja competitiva sobre la minería a cielo abierto, al ser selectiva en cuanto a la construcción de la infraestructura de producción, junto con presentar menores distancias de acarreo.

El uso de hidrógeno en operaciones mineras subterráneas permite una disminución en los costos tanto de inversión como de operación de los equipos de ventilación lo que además genera un ambiente subterráneo menos contaminado, por otra parte, la minera BHP tiene un proyecto piloto en marcha en el cual incorpora hidrógeno en calderas de electro-obtención, que actualmente funcionan con gas natural, (Ramos, 2021). Además, existe factibilidad económica y técnica de migrar equipos de producción de diésel a hidrógeno (Fúnez Guerra et al., 2019).

Finalmente, y habiendo revisado las principales contribuciones que aportan o han aportado a la línea de trabajo de este proyecto, es posible indicar que una oportunidad de desarrollo se encuentra en el hecho que no existe, para el caso del hidrógeno verde información suficiente o certeza, respecto de las condiciones necesarias para una incorporación exitosa al mercado. Lo que autoriza la siguiente como contribución para este proyecto de grado.

1.3 Contribución del trabajo

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido la ausencia de operaciones concretas que utilicen hidrógeno verde como combustible, aunque existen algunos estudios, que aportan a la mitigación del cambio climático producido por las emisiones de gases contaminantes, desde el uso de hidrógeno verde. Se propone entonces un plan de análisis de sus costos de

producción, en función de las variables que componen la ecuación de costo nivelado, junto con un análisis de sensibilidad para determinar la prioridad de los impactos de cada una de estas variables. En este sentido este trabajo contribuye a la comprensión de las condiciones necesarias y los impactos que tiene el desarrollo de tecnologías que permitan el consumo y producción del hidrógeno verde en Chile.

1.4 Objetivo general

Calcular el costo nivelado del hidrógeno verde para la evaluación de la factibilidad de su producción según las condiciones actuales del mercado chileno, considerando el contexto de la matriz energética renovable y el mercado eléctrico.

1.4.1 Objetivos específicos

- Exponer la composición de la matriz energética nacional.
- Analizar factibilidad de producción del hidrógeno verde dadas las condiciones actuales del mercado.
- Proponer una estrategia de cálculo del costo nivelado del hidrógeno verde.

1.5 Propuesta metodológica

El estudio considera un análisis cuantitativo, basado en análisis de las distintas variables que influyen en la producción del hidrógeno verde para la cuantificación del costo de nivelado de producción del hidrógeno por kilo, junto con la exposición de las condiciones actuales de la matriz energética, el mercado eléctrico y los equipos electrolizadores.

Para la composición de la matriz energética se utiliza la información publicada por la asociación de generadoras de Chile (Asociación de generadoras de Chile, 2021), gremio que representa a las empresas de generación eléctrica, que desarrollan, construyen y operan proyectos de energías de todas las tecnologías presentes en Chile. A su vez, el mercado eléctrico se rige por la comisión nacional de energía, el cual se define como el organismo técnico encargado de analizar precios, tarifas y normas técnicas a las que deben adherirse las empresas de producción, generación y distribución de energía, este se relaciona con el presidente de la República a través del Ministerio de Energía, por lo que la información relacionada se obtuvo de esta fuente.

Para los equipos electrolizadores, los datos utilizados provienen del proveedor de estos equipos Nelhydrogen, empresa líder en la producción de electrolizadores, que tiene como objetivo ofrecer soluciones óptimas para producir, almacenar y distribuir hidrógeno a partir de energías renovables.

Actualmente en Chile no existe una producción a gran escala de hidrógeno verde, sin embargo los primeros pilotos, si bien contemplan la producción de energía renovable para la alimentación de los electrolizadores, comprueban la factibilidad de la generación, lo que facilita la incorporación de nuevos actores al mercado, a su vez debido a la necesidad de una mayor confiabilidad en la producción masiva de hidrógeno verde, dada en gran parte por la cantidad de horas de operación en base a energía renovable de los electrolizadores, termino conocido como factor de planta, es que el ministerio de energía, se enfoca en generar un ambiente prospero para los inversionistas de energías renovables, con el fin de acceder a una alimentación directa del sistema eléctrico nacional (on grid), y no independiente (off grid), es que se implementa el sistema de cuotas que fomenta la competencia entre generadores renovables, motivando la generación a un costo menor mediante la fijación de cuotas de producción y sanciones por incumplimiento, además de la transmisión activa, la cual sugiere licitar las líneas de transmisión, antes de la construcción de plantas de generación renovables, para evitar desfases entre el inicio de la producción y el termino de construcción de las generadoras renovables. (Sauma, 2021).

En este estudio, el costo de producción del hidrógeno se estima con la ecuación del LCOH (Levelled cost of Hydrogen) propuesta por Julien Armijo, que considera la inversión inicial, los costos de operación, mantención, electricidad, agua y el precio de venta del oxígeno, que se obtiene como subproducto en el proceso de electrólisis, la cual se muestra a continuación.

Ecuación del LCOH (1)

$$LCOH = P_{Inst} * I * \frac{FRC + O}{h * f_p * Q_{H_2}} + (Q_{H_2O} * P_{H_2O}) + (P_e * Q_e) - (Q_{O_2} * P_{O_2}) \quad (1)$$

Donde las variables y parámetros corresponden a los descritos en la tabla I.

Tabla I: Variables y parámetros para la caracterización de la ecuación (1)

Parámetro	Detalle
P_{Inst}	Capacidad instalada del electrolizador (kW)
I	CAPEX electrolizador (USD/kW)
O	OPEX (% del CAPEX)
f_p	Factor de planta electrolizador (%)
Q_{H_2O}	Agua requerida por kilo de hidrógeno (litro/kg H_2)
P_{H_2O}	Precio del agua (USD/litro)
P_e	Precio de la electricidad (USD/kW)
Q_e	Electricidad requerida (kWh/kg H_2)
Q_{H_2}	Cantidad de hidrógeno producida por el electrolizador (kg H_2 /h)
P_{O_2}	Precio de venta Oxígeno (USD/kg O_2)
Q_{O_2}	Cantidad de producción Oxígeno por kilo de Hidrógeno (kg O_2 / kg H_2)
h	Horas en un año (horas)
FRC	Factor de recuperación de capital, dependiente de la tasa de descuento y la vida útil del electrolizador (%)

Luego del análisis de los distintos factores que influyen en la generación de hidrógeno verde como lo son la matriz energética nacional, el mercado eléctrico y el funcionamiento de los equipos electrolizadores, el cálculo se realizó para un electrolizador PEM ya que este presenta ventajas en cuanto a la sustentabilidad del proceso ya que permite realizar la electrolisis con agua por lo que no requiere utilizar electrolitos químicos como el alcalino, y presenta una mayor viabilidad técnica que los equipos SOEC, que aun su tecnología se encuentra en etapa de desarrollo (Soto, 2021).

Después de realizado el cálculo, del costo nivelado, se muestra un análisis de sensibilidad de las distintas variables que componen la ecuación del hidrógeno, el cual muestra la variación del precio del hidrógeno ante las variaciones en cada parámetro.

1.6 Organización y presentación de este trabajo

Este trabajo de grado posee cuatro capítulos principales y se organiza como sigue:

Capítulo 1: Presenta el marco conceptual del proyecto, contextualizándolo, proponiendo objetivos y discutiendo desde la literatura la pertinencia del foco de la investigación, su contribución, y presentando a su vez un marco metodológico para su desarrollo e implementación.

Capítulo 2: Asociado a recogida de información, modelos y datos. También explicita resultados.

Capítulo 3: El proyecto de grado, se presenta en formato resumido en un artículo académico que se estructura de la siguiente manera:

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Metodología
5. Resultados
 - a. Discusión de resultados
6. Conclusiones
7. Referencias

Capítulo 4: Finalmente las conclusiones generales derivadas de este trabajo, y una dirección para la investigación futura, la cual considera aquellas preguntas no contestadas durante el desarrollo de este trabajo, se presentan en este capítulo.

Referencias generales

2 INFORMACIÓN Y RESULTADOS

Para abordar este trabajo de investigación se ha optado por una aproximación cuantitativa, que permite considerar la siguiente estructura para la presentación de la información y sus análisis.

2.1 Procedimiento de recogida y análisis de datos

Esta investigación analiza la producción de hidrógeno verde mediante el electrolizador PEM considerando el contexto actual del mercado. Por tal motivo, se llevó a cabo en el año 2021 una investigación de los principales requerimientos, con la finalidad de recoger información para su posterior análisis. En particular la información sobre la matriz energética nacional se obtuvo de la asociación de generadoras de Chile, la regulación del mercado eléctrico se obtuvo de la comisión nacional de energía, la información sobre el electrolizador PEM del proveedor Nelhydrogen, además de bibliografía científica para otros requerimientos.

El método utilizado en este estudio es de carácter cuantitativo, dado que se calculan y estiman las distintas variables requeridas para el cálculo del costo nivelado del hidrógeno verde.

Fechas en que se recogieron los datos:

Los datos de las cantidades de energía producida en Chile, se obtuvo de información publicada por la asociación de generadoras de Chile, en julio del 2021

La regulación del mercado eléctrico se obtuvo de la comisión nacional de energía en octubre del 2021.

La información sobre el equipo electrolizador PEM y su proceso se obtuvo de la información publicada por el proveedor Nelhydrogen en octubre del año 2021.

El resto de la información presentado en este trabajo se obtuvo de publicaciones científicas, y otras tesis publicadas recientemente.

Coherencia con lo planificado:

La información presente en este trabajo inicialmente debió ser modificada parcialmente, debido a su extensión y contenido que no aportaban valor según el objetivo dado.

Fortalezas y debilidades del proceso:

Fortalezas:

- Datos contemporáneos.
- Transparencia.
- Proceso ético.
- Perspectivas de tecnologías probadas.
- Permitió dar respuesta a la pregunta de investigación.

Las debilidades propias de la investigación de contexto se circunscriben a:

- Para generalizar resultados, se deben analizar otras tecnologías y métodos de producción de hidrógeno verde.
- No considerar otros proveedores de equipos electrolizadores.
- No analizar la variabilidad del precio de la electricidad en función de la ubicación.

Población y muestras

Además de lo planteado en el marco metodológico, en la sección de población sobre la que se efectuará el estudio, donde se identifican las fuentes de información, se hace notar que para la selección de estas se utilizó una muestra no probabilística ya que se seleccionó a entidades porque se estimó que pudieran tener mayor conocimiento e influencia sobre el desarrollo de la materia.

Instrumento.

Como se indicó anteriormente para recoger información sobre los principales requerimientos para la producción de hidrógeno verde, como la energía renovable, la electricidad y los equipos electrolizadores se utilizó la información publicada por entidades que regulan o participan actualmente en el mercado por lo que cuentan con la competencia y preparación necesaria para realizar estimaciones en base a sus publicaciones y exponer de manera certera la regulación. Para calcular el costo nivelado del hidrógeno verde se utilizó la ecuación (1) publicada por Julien Armijo, que se muestra a continuación.

Ecuación del LCOH (1)

$$LCOH = P_{Inst} * I * \frac{FRC + O}{h * f_p * Q_{H_2}} + (Q_{H_2O} * P_{H_2O}) + (P_e * Q_e) - (Q_{O_2} * P_{O_2}) \quad (1)$$

Donde las variables y parámetros corresponden a los descritos en la tabla I.

Tabla I: Variables y parámetros para la caracterización de la ecuación (1)

Parámetro	Detalle
P_{Inst}	Capacidad instalada del electrolizador (kW)
I	CAPEX electrolizador (USD/kW)
O	OPEX (% del CAPEX)
f_p	Factor de planta electrolizador (%)
Q_{H_2O}	Agua requerida por kilo de hidrógeno (litro/kg H_2)
P_{H_2O}	Precio del agua (USD/litro)
P_e	Precio de la electricidad (USD/kW)
Q_e	Electricidad requerida por kilo de hidrógeno (kWh/kg H_2)
Q_{H_2}	Cantidad de hidrógeno producida por el electrolizador (kg H_2 /h)
P_{O_2}	Precio de venta Oxígeno (USD/kg O_2)
Q_{O_2}	Cantidad de producción Oxígeno por kilo de hidrógeno (kg O_2 / kg H_2)
h	Horas en un año (horas)
FRC	Factor de recuperación de capital, dependiente de la tasa de descuento y la vida útil del electrolizador (%)

2.2 Proceso de cálculo y recogida de información.

Como se ha indicado anteriormente, se utilizó la información publicada por entidades que regulan o participan activamente en el mercado y publicaciones de carácter científico, concentrando y priorizando la información para analizarla posteriormente de forma cuantitativa.

2.3 Los datos recogidos:

La información sobre las cantidades de energía producida en Chile se obtuvo de información publicada por la asociación de generadoras de Chile, este es el gremio que representa a las empresas de generación eléctrica que construyen y operan proyectos de energías en todas las tecnologías presentes en Chile.

La regulación del mercado eléctrico se obtuvo de la comisión nacional de energía, organismo técnico encargado de analizar precios, tarifas y normas técnicas a las que deben adherirse las empresas de producción, generación, transporte y distribución de energía.

La información sobre el equipo electrolizador PEM y su proceso se obtuvo de la información publicada por el proveedor Nelhydrogen.

El resto de la información presentado en este trabajo se obtuvo de publicaciones científicas, y otras tesis publicadas.

2.4 Análisis e interpretación de los datos

La situación actual de la matriz energética de Chile, en marzo del 2021, se compone por un 51,8% de energía renovable y la no renovable un 48,2% (figura 1) (Asociación de generadoras de Chile, 2021).

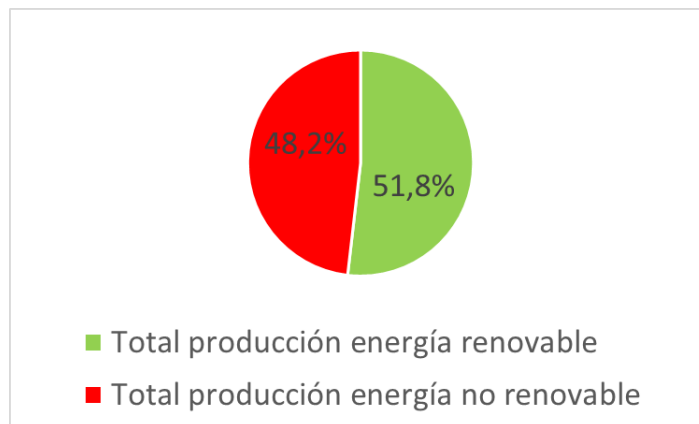


Figura 1. Distribución de la energía en Chile, marzo, 2021.

(Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

Las cantidades de cada tipo de energía se muestran en la tabla II, en donde se destaca una que la producción de energía renovable supero a la no renovable por aproximadamente un 7% a marzo del 2021.

*Tabla II: Cantidad y tipo de energía en Chile, marzo 2021.
(Fuente: elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)*

Tipo	Capacidad (MW)
No renovable	12.918
Renovable	13.906
Total	26.824

De la figura 1, se aprecia la gran participación que han logrado las energías renovables, sin embargo, aún se presenta un 48,2% de energía termoeléctrica (Asociación de generadoras de Chile, 2021), que se genera a partir de carbón, gas natural o derivados del petróleo (figura 2).

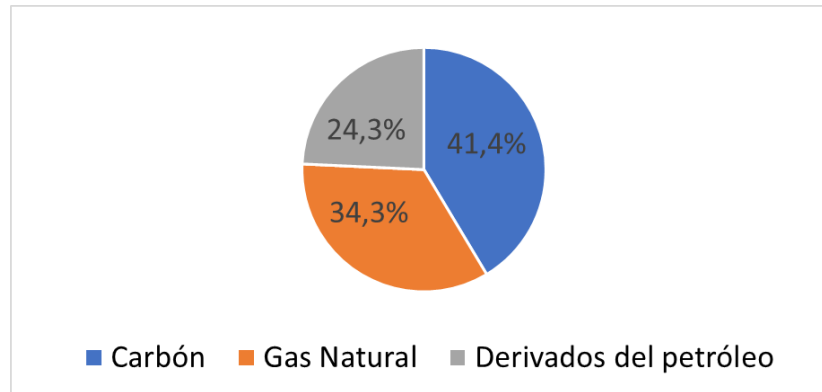


Figura 2. Distribución de la energía no renovable en Chile, marzo 2021.

(Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

Por su parte, la energía renovable en Chile presenta la siguiente distribución, en donde destacan una mayor participación la energía hidroeléctrica y solar (figura 3). Sin embargo, cada vez la energía eólica toma una mayor participación debido al efecto de economías de escala sobre los aerogeneradores, los cuales han aumentado su capacidad de producción, lo que implica una disminución en el costo unitario, (Cruz, 2020).

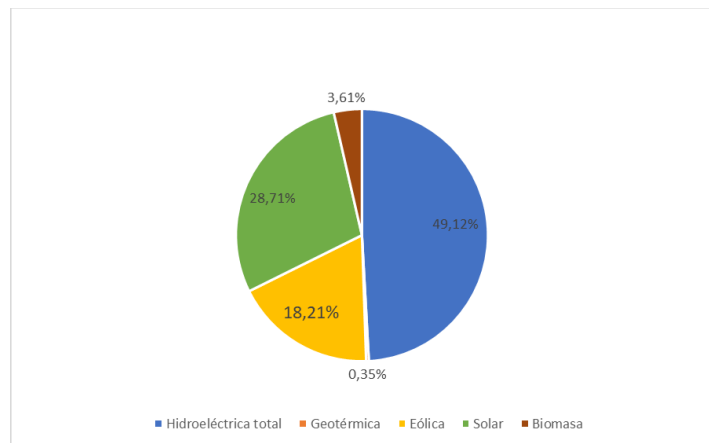


Figura 3. Distribución de la energía renovable en Chile, marzo 2021

(Fuente: elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

También cabe destacar que en Chile solo se tiene una planta de generación geotérmica llamada Cerro Pabellón, esto se explica por los costos de generación, debido a que este tipo de energía aun no logra un precio competitivo respecto de las otras fuentes de energía renovable, dado que el costo de exploración para descubrir nuevas fuentes geotérmicas aun es demasiado alto. (Sauma, 2021).

Mercado eléctrico

Existen múltiples factores asociados a los costos de la energía eléctrica, por lo que también existen distintos costos de la energía. Por otra parte, el sistema eléctrico está conformado por la generación, transmisión y distribución (Sauma, 2021)., en cada una de estas áreas existen distintos precios asociados a la generación o el transporte de la energía. De esta forma, el precio que un usuario final paga por la electricidad contiene diversas componentes. A continuación, se detallan los principales componentes del precio que pagan los usuarios residenciales del sistema eléctrico chileno por la electricidad consumida.

Precio de la transmisión

En Chile existen sistemas de transmisión nacional, sistemas zonales y sistemas dedicados. El sistema nacional está formado todas las líneas de transmisión de mayor capacidad y voltaje, cuya utilización es compartida por centrales generadoras y los consumidores. El sistema de

zonas está constituido por el conjunto de líneas que abastecen directamente a zonas de distribución determinadas desde el sistema nacional. El sistema dedicado, por su parte, está constituido por líneas dedicadas al abastecimiento de grandes clientes industriales específicos, esto quiere decir que según sea la naturaleza y la ubicación del consumidor será el cobro asociado a este ítem (Sauma, 2021).

Precio de la distribución (VAD)

Las empresas distribuidoras venden la energía que producen a los consumidores de una determinada área geográfica y están obligadas a satisfacer la demanda eléctrica de esta, a un precio de distribución regulado llamado Valor Agregado de Distribución (VAD). El VAD es una tarifa que incluye distintos factores relacionados al uso de la infraestructura de distribución y está compuesta por un cargo fijo (de gestión, facturación, servicio al consumidor, pérdida de potencia y energía promedio) y un cargo por unidad de potencia para pagar los costos de operación, mantenimiento e inversión (Sauma, 2021).

Precio final

El precio que pagan los usuarios de la energía viene dado por la siguiente ecuación:

$$PUF=PG+PT+VAD+CUST \quad (2)$$

Donde:

- PUF: Precio a usuario final
- PG: Precio de generación
- PT: Precio de transmisión
- VAD: Valor agregado de distribución
- CUST: Cargo Único por uso del sistema troncal.

(Fuente: Comisión nacional de energía, 2020)

Clientes regulados

Para consumidores de energía que posean una capacidad instalada inferior o igual a 5.000 kW se establece que existen condiciones de mercado de asociadas a un monopolio natural y, por lo tanto, la ley establece su precio debe ser regulado. (Comisión nacional de energía, 2020).

Clientes Libres

Para suministros a usuarios finales cuya capacidad instalada sea superior a 5.000 kW, la Ley dispone la libertad de precios, suponiéndoles capacidad negociadora y la posibilidad de proveerse de electricidad de otras formas, tales como la autogeneración o el suministro directo desde empresas generadoras. Sin embargo, clientes que posean una potencia conectada superior a 500 kW pueden elegir a cuál régimen adscribirse (libre o regulado) por un período de 4 años (Comisión nacional de energía, 2020).

Conexión eléctrica On-grid y OFF-grid

La alimentación del electrolizador puede ser de tres formas: On-grid, Off-grid o mixto.

On-grid: Está representa la conexión con el sistema eléctrico nacional. Esta tiene la ventaja de una operación constante, independiente de la generación eléctrica renovable que pueda haber asociada a una planta de hidrógeno verde. Su principal desventaja es que, si el país no funciona en base a energías renovables, el hidrógeno producido no sería verde, ya que en su cadena productiva (generación eléctrica en este caso), habría emisiones de carbono al medioambiente. Su principal ventaja es que permite un mayor factor de planta (Guerrero, 2020).

Off-grid: Está representa una alimentación eléctrica independiente del sistema eléctrico nacional, es decir, requiere una planta de generación de energía (renovable para que el hidrógeno sea verde), para la alimentación del electrolizador. Sus principales desventajas son que requieren baterías para almacenar energía y son dependientes de la disponibilidad de los recursos para la generación de energías renovables. (Guerrero, 2020).

También es posible alimentar un electrolizador con ambos métodos, según sea el requerimiento.

Incentivos para la generación de energía renovable

Sistema de cuotas

Con el fin de incentivar la generación de energía renovable, generando confianza para los inversionistas de la producción de energía renovable, el Estado fija un porcentaje mínimo de generación de energía a través de fuentes renovables e incluye multas en caso de no cumplir. La principal característica de este sistema es que los generadores renovables compiten independientemente de la tecnología empleada para la generación de energía. Con ello, se fomenta la competencia entre generadores renovables, motivando la generación a un costo menor, lo que disminuye su precio final e incentiva a los consumidores. (Sauma, 2021).

Transmisión activa

Con el fin de incentivar la inversión y a modo de solución para el desfase producido por el mayor tiempo de construcción de las líneas de transmisión en comparación con las plantas de generación renovables, el gobierno de Chile contempla licitar primero las líneas de transmisión, que su construcción puede tardar entre 3 y 5 años, en cambio una planta de generación puede tardar entre 1 y 3 años, esto permite adelantar el inicio de la producción de las plantas de generación y a su vez el beneficio de estas (Sauma, 2021).

Tipos de electrolizadores

Actualmente existen 3 tipos de electrolizadores que han alcanzado desarrollo comercial: Electrolizador PEM, Alcalinos y SOEC, su principal descripción se muestra a continuación:

Electrolizador PEM

El electrolizador de membrana de intercambio protónico PEM (Proton Exchange Membrane) funciona con electrodos, estos pueden ser sumergidos agua y se estos reciben la carga eléctrica, la calidad del agua va a estar relacionada directamente con la vida útil de algunos

componentes del equipo, por lo que algunos proveedores incluyen sistemas para aumentar su pureza previo al ingreso del agua al equipo.

El electrolizador PEM contiene una membrana entre los electrodos, recubierta por metales de alto costo, como el platino y el iridio, la principal función de esta membrana es que no permite que se mezclen los gases emitidos en el proceso, su mayor ventaja es que no utiliza productos químicos como solución para el proceso de electrolisis, a diferencia electrolizador alcalino que requiere una solución química para el proceso este proceso(Soto, 2021), sin embargo su principal desventaja es que a la salida del electrolizador, el hidrógeno producido sale a una presión en el rango de las 30 atmosferas, por lo que para un transporte económicamente viable del hidrógeno producido por este tipo de electrolizador se requiere estrictamente un gasto energético extra para su compresión o licuefacción, según sea el caso, a modo de aumentar la cantidad de energía transportada por unidad de volumen. Su principio de operación se muestra en la figura 6.

Electrolizador Alcalino

Este tipo de electrolizador se compone por dos electrodos separados por una membrana que no impide una separación tan efectiva como la del electrolizador PEM, lo que produce un hidrógeno de menor pureza al comparar ambos electrolizadores. Los electrodos se encuentran sumergidos en una solución acuosa concentrada de agua destilada con un 25 a 30% de hidróxido de potasio (KOH), siendo esta la principal desventaja en cuanto a la sustentabilidad del proceso ya que este electrolito químico puede producir contaminación durante su uso o producción.

Actualmente estos equipos presentan un menor costo de inversión y una mayor tasa productiva y vida útil que los electrolizadores PEM, y son los equipos con un mayor desarrollo comercial (Soto, 2021).

Se produce hidrógeno y oxígeno a baja presión, ambos en estado gaseoso, a continuación, se muestra el principio de operación de un electrolizador alcalino en la figura 5.

Electrolizador SOEC

El electrolizador de oxido solido SOEC (Solid Oxyde Electrolyzer) opera en base a vapor de agua y electricidad, este equipo contiene una membrana de un material cerámico llamado Zirconio, el cual funciona mediante electrólisis de vapor de agua a temperaturas entre 600°C y 900°C, lo que permite un funcionamiento a mayores presiones, por lo que disminuye el gasto requerido para la compresión del hidrógeno a la salida del electrolizador, Pero dadas las condiciones requeridas por este tipo de equipos para operar de alta presión y temperatura (Soto, 2021), su incorporación en operaciones cotidianas se hace más compleja que los otros tipos de electrolizadores, por lo que este tipo de electrolizador, aún se encuentra en etapa de investigación y desarrollo, su principio de operación se muestra a continuación en la figura 4

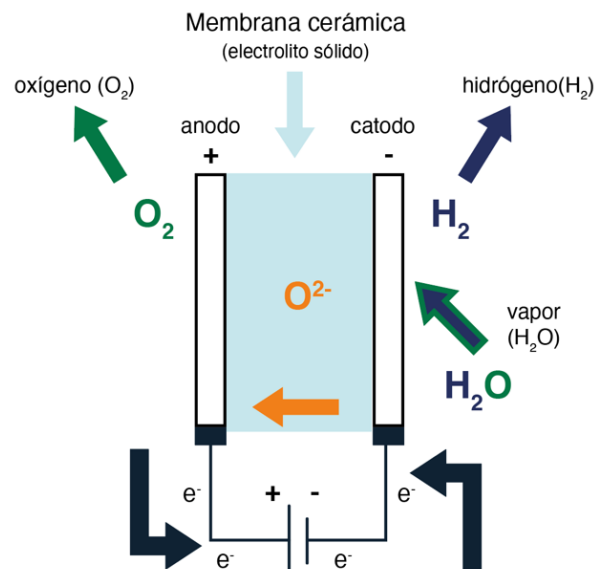


Figura 4. Principio de operación de un electrolizador SOEC.

Fuente: Adaptado desde (Soto, 2021)

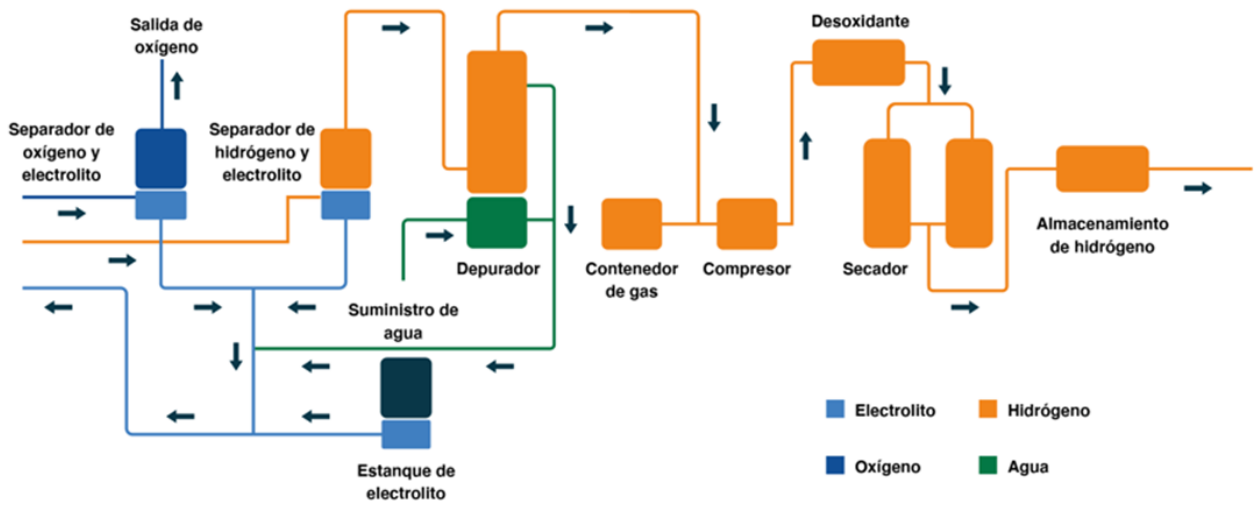


Figura 5. Principio de operación de un electrolizador alcalino.

(Fuente: Adaptado desde NelHydrogen, 2019)

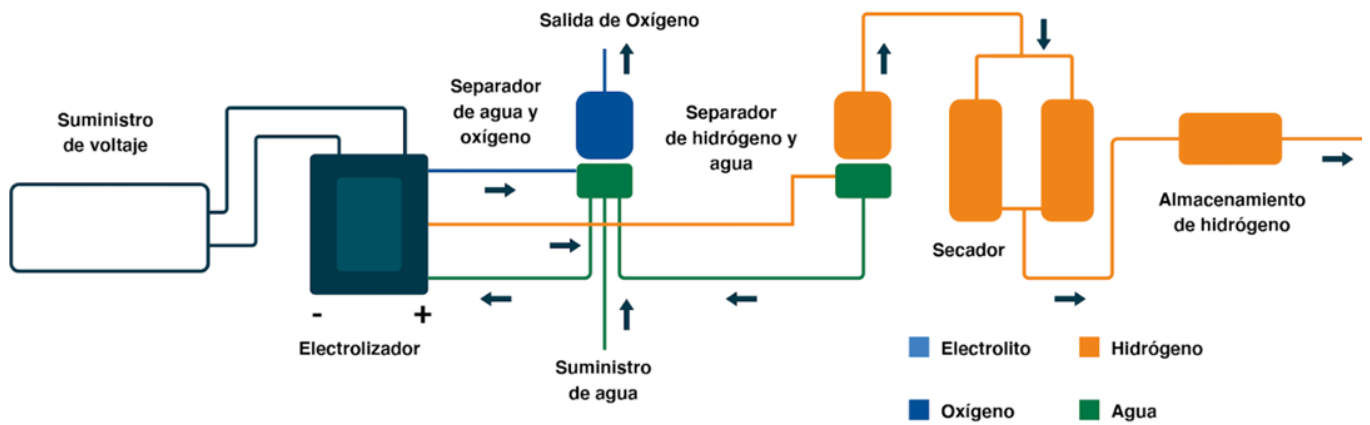


Figura 6. Principio de operación de un electrolizador PEM.

Fuente: Adaptado desde (NelHydrogen, 2019)

Resultados

Para este análisis se consideraron los siguientes valores:

*Tabla III: Valores utilizados.
(Fuente: Elaboración propia)*

Capacidad instalada del electrolizador (kW)	10.000
CAPEX electrolizador (USD/kW)	600
OPEX (% del CAPEX)	0,02
Factor de planta electrolizador (%)	0,95
Horas en un año (h)	8.760
Producción del electrolizador (kg H2/h)	500
Agua requerida (litro/kg H2)	15
Precio del agua (USD/litro)	0,006
Electricidad requerida por kilo de hidrógeno (kWh/kg H2)	50
Precio electricidad (USD/kWh)	0,07
Precio de venta Oxígeno (USD/kg O2)	0,05
Producción Oxígeno (kg O2/ kg H2)	9
Vida útil del electrolizador (años)	8
Tasa de descuento (%)	0,08
Factor de recuperación de capital (%)	0,174
Valor calculado del LCOH (USD/KG)	3,42

Competitividad del valor calculado

En la siguiente tabla se muestran distintos resultados del costo nivelado del hidrógeno, realizado por las siguientes instituciones

Tabla IV: Comparación del LCOH calculado con otros estudios.

(Fuente: F, Guerrero 2020)

Nombre del estudio	LCOH calculado (USD/kg)
GIZ 2018	5,8
In - data 2019	3,9
Implementa Sur 2019	3,52
Este estudio	3,42
Tractebel - Engie 2018	3,03
Julien Armijo IEA 2019	2,19

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se basa en evaluar como los valores utilizados pueden variar el resultado, según alteraciones en cada variable de manera independiente (Bordalejo, 2018).

En este caso después de analizar las distintas variables que afectan el costo nivelado del hidrógeno, se establece la variación del precio del hidrógeno según alteraciones de las variables respectivas como se indica en las siguientes figuras.

De la figura 7 se puede apreciar una variación de 0,02 dólares por kilo de hidrógeno al variar en 50 kilos por hora la capacidad de la producción del electrolizador, aproximadamente un 0,5%, manteniendo las otras variables constantes.

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de tecnologías de menor costo que permitan la producción de hidrógeno mediante membranas de intercambio protónico (PEM) es fundamental para disminuir el costo nivelado del hidrógeno verde, en la figura 8, se muestra el cambio en el valor del costo nivelado, para distintos valores de CAPEX, manteniendo la producción constante.

Sin embargo, cada una de estas variables de manera independiente, no son suficientes para lograr una incorporación competitiva del hidrógeno al mercado, por lo que debe existir un desarrollo integral de estos equipos que permita tanto un aumento en la eficiencia del equipo, como una disminución del costo de inversión.

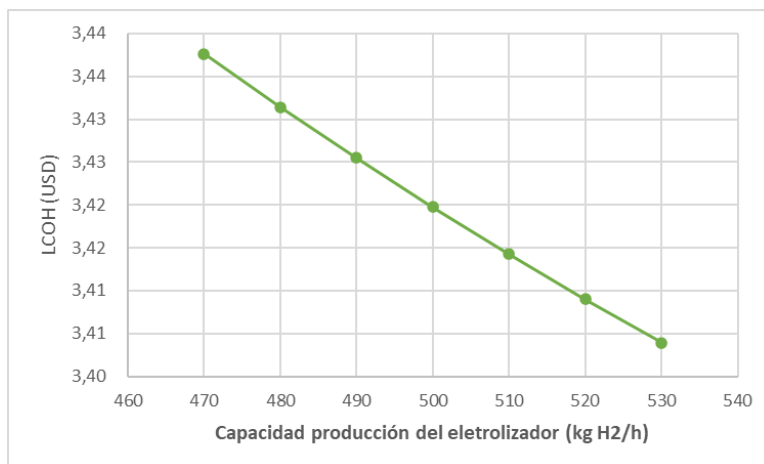


Figura 7: Variación del costo nivelado del hidrógeno para distintos niveles de producción.

(Fuente: Elaboración propia)

La figura 8 muestra el cambio en el costo nivelado del hidrógeno, cercano al 1%, esto indica que mientras la inversión, es decir, el costo de las tecnologías para producir hidrógeno, no sea significativamente disminuida, el LCOH no se ve afectado drásticamente, lo que destaca la necesidad de desarrollar tecnologías de menor costo además de mejorar el valor de otras variables en conjunto para tener un precio menor de hidrógeno verde.

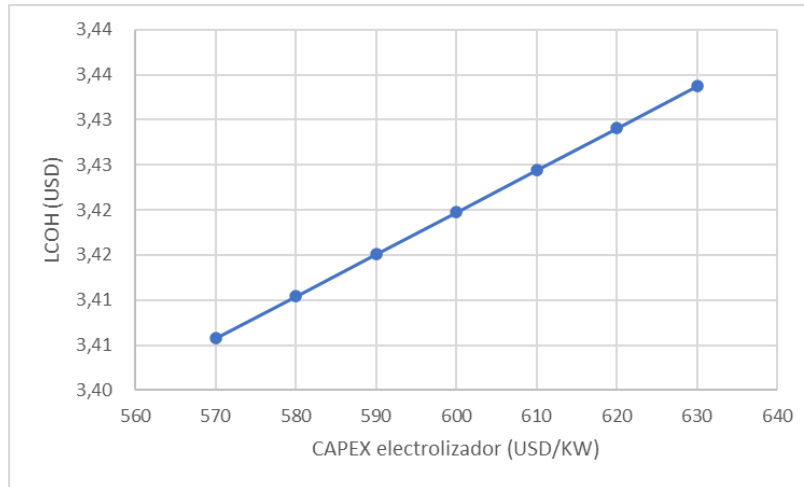


Figura 8: Variación del costo nivelado para distintos valores de inversión por kW en el electrolizador.

(Fuente: Elaboración propia)

La figura 9 deja en evidencia la necesidad de generar una matriz energética de energía renovable, debido a la variación en el precio que existe respecto a los distintos factores de planta expuestos.

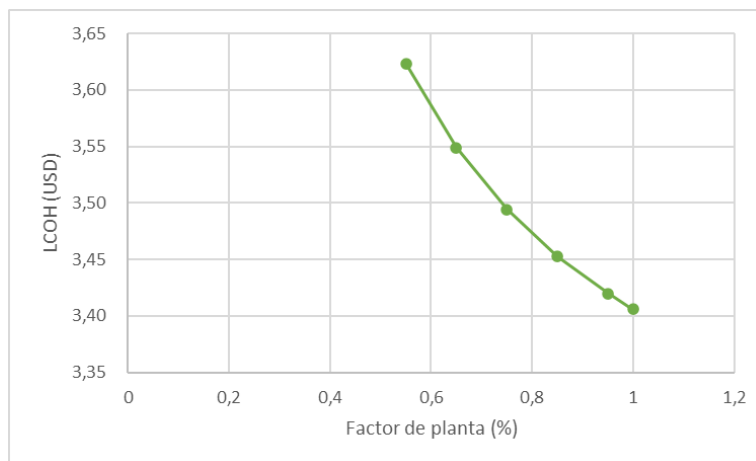


Figura 9: Variación del costo nivelado según distintos factores de planta.

(Fuente: Elaboración propia.)

Generalmente los valores sobre 80% son asociados a electrolizadores on grid, y los más bajos a los electrolizadores conectados off grid, por lo que el desarrollo de la generación de energía renovable es un factor clave para llegar a valores económicamente competitivos con derivados del petróleo, en términos de generación de energía.

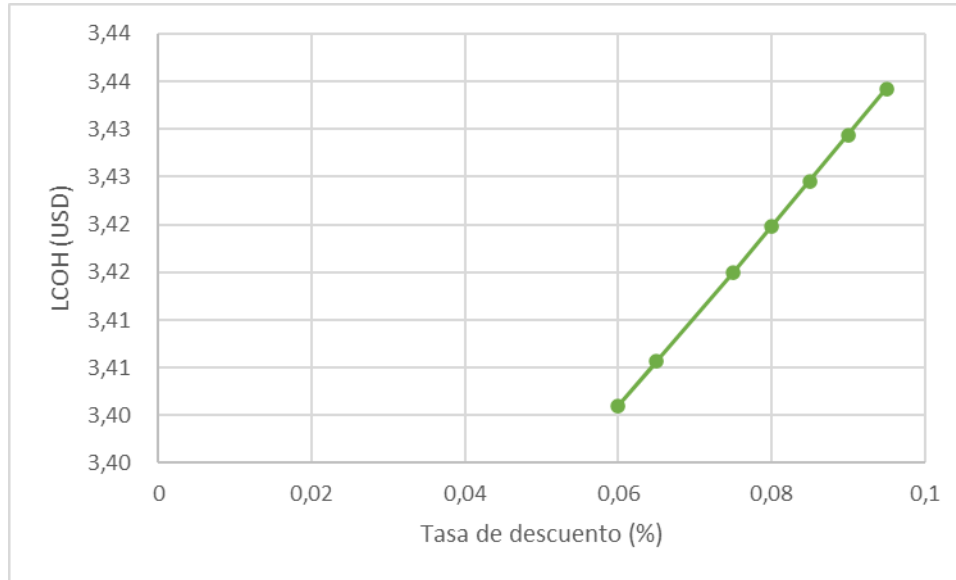


Figura 10: Variación del costo nivelado del hidrógeno verde respecto de la tasa de descuento (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 10, se muestra la variación del precio en función de la tasa de descuento, considerando el rango típico de tasas de descuento utilizadas en proyectos de hidrógeno (F, Guerrero, 2020) según la situación actual del mercado, considerando los costos de inversión, la producción y el precio actual del hidrógeno, lo que evidencia un cambio de aproximadamente 0,25 dólares, valor no significativo considerando la alteración independiente de esta variable.

2.5 Discusión de resultados

Desde los hallazgos establecidos en este proyecto, es posible destacar que los requerimientos para producir H₂ verde a costo competitivo y que tenga una incorporación exitosa en el mercado es que se deben desarrollar soluciones que permitan mejorar de manera integral las variables que componen su precio, sin embargo las condiciones de mayor impacto son dos 1) Una matriz energética compuesta en su totalidad por energías renovables, y 2) El incentivo gubernamental a las condiciones del mercado requeridas para otorgar factibilidad

financiera, ya que esto mejoraría el factor de planta y a su vez la evaluación de proyectos debido al impacto de esta variable en los beneficios económicos, y además se fomenta la inversión, desarrollo de equipos y el uso de equipos electrolizadores lo que eventualmente disminuiría el costo de estos dada la competencia generada a los productores por el requerimiento de estos equipos. Dichos hallazgos coinciden con las propuestas de (Guerrero, 2020), donde se especifica que el factor de planta influye de gran magnitud en el costo nivelado y que un alto factor de planta se logra al cumplir las condiciones antes expuestas. Para lograr el factor de planta requerido se propone: Adherir a un plan nacional de integración y diversificación de la matriz energética, para facilitar el objetivo de conectar los electrolizadores a la red local.

Otro de los puntos más relevantes observados en el cálculo realizado, son el precio de los equipos asociados a la producción de hidrógeno, junto con la capacidad de producción asociada a la potencia instalada del equipo, ya que se espera que estos disminuyan su valor, efecto producido por economías de escala, un ejemplo de esto es lo que ocurrió con los aerogeneradores, que en los últimos 10 años duplicaron su altura y aumentaron su capacidad de valores cercanos a los 9 MW en 2010 hasta 15 MW al año 2020 (Cruz, 2020).

Considerando que las materias primas para generar hidrógeno, mediante un electrolizador PEM, son agua y electricidad, se hace estrictamente necesario tener certeza sobre la disponibilidad del recurso hídrico, del cual existen dos fuentes de obtención, las cuencas naturales o la desalinización de agua de mar.

3 ARTÍCULO

El presente apartado, recoge la investigación contextualizada motivo de este proyecto de grado, y es presentada en formato de artículo académico. Se trata de un artículo conciso, escrito en el formato típico de revistas especializadas o de conferencias, de acuerdo con reglas específicas definidas por la dirección del programa.

El artículo, ha sido cuidadosamente redactado con el fin de que se haga fácilmente entendible y logre expresar de un modo claro y sintético lo que se pretende comunicar, considerando las citas y referencias respectivas de los estudios que lo fundamentan. El trabajo realizado, se sintetiza entonces como artículo, para facilitar al trabajo de quienes puedan estar interesados en consultar la obra original.

Este trabajo, considera y discute, a través de un proyecto aplicado, desarrollado en un contexto de realidad profesional, la integración de herramientas y conocimientos que se han adquirido en las líneas de desarrollo del programa. Lo que se consolida en una investigación profesional contextualizada a la realidad profesional que se expone, la que se relacionada con líneas y ámbitos específicos abordados en el plan de estudios del programa, permitiendo integrar, de manera adecuada, los conocimientos teóricos y metodológicos desarrollados en él.

Evaluación del escenario de producción de hidrógeno verde mediante electrolizador PEM

Augusto Javier Gallardo Henríquez

^a Graduado del programa de Magister en Gestión de la Sustentabilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad de Desarrollo, agallardoh@ingenieros.udd.cl

^b Director de Postgrados y Educación Continua, Facultad de Ingeniería, Universidad de Desarrollo, hvaldes@udd.cl.

Resumen:

Este trabajo presenta una estrategia de cálculo para la evaluación de los costos de la producción de hidrógeno verde, en condición actual para Chile. Ello considera la relación entre matriz energética, electrolizadores, el mercado eléctrico, y los incentivos del gobierno, para la generación de energías renovables y la descarbonización de la generación eléctrica. El objetivo de este trabajo es calcular el costo nivelado del hidrógeno verde para la evaluación de factibilidad de producción según las condiciones actuales del mercado chileno. Para lograrlo se propone una aproximación cuantitativa basada en el análisis de fuentes de información relevantes, proveedores de equipos electrolizadores, junto con el costo de la energía eléctrica y agua como materias primas, además del oxígeno como subproducto y el factor de planta, para el cálculo del costo nivelado. Los resultados muestran el costo de producción nivelado del hidrógeno por kilo se estima en aproximadamente 3 USD, como consecuencia de la relación de variables claves en el entorno actual. Este estudio concluye que, dado el cálculo propuesto, se requiere afectar a la baja, sus materias primas, los costos de inversión y operación junto con la consideración de que se requiere de una matriz energética compuesta en su totalidad por energía renovable

Palabras clave: Mercado eléctrico; Energías renovables; Análisis de costos; Costo nivelado del hidrógeno; Matriz energética

1. Introducción

La necesidad de disminuir los gases efecto invernadero, dada la situación actual producida por el calentamiento global se ha vuelto una prioridad a nivel mundial, la utilización de combustibles fósiles como fuente de energía representa aproximadamente un 85% de la contaminación del aire en países de bajos ingresos (Hurtubia, 2019). Es por esto, que por lo él hidrógeno verde, se presenta como solución a la contaminación proveniente de la generación de energía ya que su consumo permite el reemplazo de los derivados del petróleo y del uso del carbón, como fuentes energéticas.

El crecimiento de áreas urbanas junto con el aumento del bienestar social se asocia a un mayor consumo energético (Mendes, F. H., Romero, H., & Ferreira da Silva Filho, D, 2020.) esto explica en parte, el aumento de la contaminación global debido al desarrollo humano sostenido en el tiempo.

La producción de energía y combustibles de manera sustentable se expone entonces como un pilar fundamental para el desarrollo futuro de las próximas generaciones.

La sinergia en función de la sustentabilidad entre planes tanto sociales como gubernamentales, junto con la evaluación y ejecución de proyectos se muestran como un mecanismo clave para la disminución de la contaminación. (Giannotti, et al., 2019).

El potencial de generación de energía renovable en Chile, se estima en aproximadamente 70 veces la capacidad instalada (Ministerio de energía, 2020), por lo que la producción de hidrógeno verde, como vector energético (almacenamiento de energía) se presenta como una herramienta clave para disminuir la contaminación y aprovechar los peaks de generación, ya que actualmente cuando la generación renovable es superior a la demanda del sistema eléctrico el diferencial de energía no es utilizado, debido a que el

costo del almacenamiento de electricidad en baterías a gran escala no presenta viabilidad económica (Ministerio de energía, 2018.) por lo que utilizando el excedente de energía renovable se podría generar hidrógeno verde. Los beneficios más evidentes de almacenar este combustible son aumentar la generación eléctrica renovable, dar confiabilidad al sistema eléctrico nacional y la disminución de las emisiones producidas por el uso de carbón, el diésel y sus derivados.

Condiciones necesarias para la producción económicamente viable de hidrógeno verde

El costo de la generación de hidrógeno, mediante electrolizadores, depende mayoritariamente de la disponibilidad de electricidad, junto con los costos de inversión y operación del equipo (Guerrero, 2020), sin embargo, para la producción de hidrógeno verde en particular, es necesario que la electricidad utilizada en el proceso productivo sea renovable, debido a que, si existen emisiones de gases contaminantes en el proceso, el hidrógeno resultante no se clasifica como verde.

Dado el contexto anterior es que para una disminución importante en el costo de producción del hidrógeno verde, se requiere una matriz energética compuesta en su totalidad por energía renovable, ya que de lo contrario, los equipos electrolizadores al ser conectados al sistema eléctrico (on grid), no estarían produciendo hidrógeno verde, y los sistemas eléctricos independientes (off grid), tienen la desventaja de presentar un menor tiempo de operación lo que en términos de evaluación de proyectos se entiende como factor de planta, esto se explica por la variabilidad de los recursos para la generación eléctrica renovable como los eólicos y solares, que no permiten una alimentación continua sin baterías.

Electrolizador PEM

Un equipo electrolizador se compone de dos terminales metálicos: ánodo y cátodo, separados a una cierta distancia, los cuales deben ser sumergidos en una solución o electrolito para generar la electrolisis. El electrolizador PEM permite generar el proceso de electrolisis utilizando agua como electrolito, esto se hace mediante una corriente continua en contacto con el agua lo que genera la separación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo que se llama electrolizador. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal

positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua. El cátodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal negativo. Al aplicar tensión eléctrica en estos electrodos se produce la reacción electroquímica en la superficie de ellos, Finalmente en el ánodo se produce oxígeno y en el cátodo se produce hidrógeno (Soto, 2021).

Producción global de hidrógeno

El método de producción de hidrógeno denominado reformación de metano con vapor (Steam methane Methane Reformation - SMR) es el más común y de menores costos tanto de inversión como de operación (Basile, 2015). El proceso SMR genera emisiones de CO₂, por lo que el resultado es hidrógeno que no es verde ya que existen emisiones de gases contaminantes en su proceso productivo. Este método presenta una amplia utilización comercial, la variación en el costo de la producción se relaciona directamente con el precio del gas natural debido a que esta es la principal materia prima. (Fraile et al., 2015). A su vez, la producción mundial de hidrógeno en base a carbón, es decir hidrógeno gris, es actualmente responsable de unos 830 millones de toneladas de dióxido de carbono al año, equivalentes al 2% de emisiones en el mundo en el año 2017 (Agencia Internacional de energía, 2020).

Actualmente la distribución del uso del hidrógeno se presenta como: producción de amoníaco (84%) usado para obtención de plásticos y fertilizantes principalmente, producción de metanol (12%) utilizado para la obtención de formaldehído y anticongelantes, poliuretano (2%) producto relacionado a la producción de insumos relacionados a la industria de la construcción, y finalmente nylon (2%) utilizado mayoritariamente en la industria textil. (Vásquez & Salinas, 2015).

Sin embargo, considerando que el hidrógeno puede ser utilizado en celdas de combustible, para producir energía eléctrica, es que podría reemplazar los equipos que actualmente funcionan a diésel o carbón, que son los combustibles que emiten la mayor cantidad de gases contaminantes en el mundo, por lo que el hidrógeno verde se presenta como solución a la contaminación del planeta

Beneficios del hidrógeno verde: Caso de la minería

La industria minera emite una gran cantidad de gases efecto invernadero, debido a la naturalidad de sus operaciones, por lo que su descarbonización es

fundamental para la disminución de emisiones de gases que propician el efecto invernadero.

Considerando la geología de los yacimientos mineros, y los costos asociados al transporte de mineral, que afectan directamente el precio de venta del producto final, es que, en el largo plazo, la minería subterránea presenta una ventaja competitiva sobre la minería a cielo abierto, al ser selectiva en cuanto a la construcción de la infraestructura de producción, junto con presentar menores distancias de acarreo.

El uso de hidrógeno en operaciones mineras subterráneas, permite una disminución en los costos tanto de inversión como de operación de los equipos de ventilación lo que además genera un ambiente subterráneo menos contaminado, por otra parte, la minera BHP tiene un proyecto piloto en marcha en el cual incorpora hidrógeno en calderas de electro-obtención, que actualmente funcionan con gas natural, (Ramos, 2021). Además, existe factibilidad económica y técnica de migrar equipos de producción de diésel a hidrógeno. (Fúnez Guerra et al., 2019).

Entendida esta realidad, y considerando la revisión bibliográfica presentada, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿Qué condiciones deben existir para que el hidrógeno verde presente un costo competitivo que permita una incorporación exitosa al mercado?

En efecto, actualmente en Chile se adolece de tecnologías desarrolladas a nivel comercial que permitan utilizar hidrógeno como combustible de manera masiva, además de una cultura relacionada a su uso y manejo. Lo que claramente representa una brecha, como por ejemplo ya se tiene con el diésel, ya que este frente al manejo del diésel, ya que este tiene la ventaja de ser líquido a temperatura y presión ambiental y, y además su manipulación es de diésel es un procedimiento conocido y habitual, no así con el hidrógeno.

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido la ausencia de operaciones soluciones concretas que utilicen hidrógeno verde como combustible, aunque existen algunos estudios, que aportan a la mitigación del cambio climático producido por las emisiones de gases contaminantes, desde el uso de hidrógeno verde. Se propone entonces un plan de análisis de sus costos de producción, en función de las variables que componen la ecuación de costo nivelado, junto con un análisis de

sensibilidad para determinar la prioridad de los impactos de cada una de estas variables. En este sentido este trabajo contribuye a la comprensión de las condiciones necesarias y los impactos que tiene el desarrollo de tecnologías que permitan el consumo y producción del hidrógeno verde en Chile.

Entendido esto, el objetivo de este trabajo es calcular el costo nivelado del hidrógeno verde para la evaluación de la factibilidad de su producción según las condiciones actuales del mercado chileno, considerando el contexto de la matriz energética renovable y el mercado eléctrico.

2. Metodología

El estudio considera un análisis cuantitativo, basado en análisis de las distintas variables que influyen en la producción del hidrógeno verde para la cuantificación del costo de nivelado de producción del hidrógeno por kilo, junto con la exposición de las condiciones actuales de la matriz energética, el mercado eléctrico y los equipos electrolizadores.

Para la composición de la matriz energética se utiliza la información publicada por la asociación de generadoras de Chile (Asociación de generadoras de Chile, 2021), gremio que representa a las empresas de generación eléctrica, que desarrollan, construyen y operan proyectos de energías de todas las tecnologías presentes en Chile. A su vez, el mercado eléctrico se rige por la comisión nacional de energía, el cual se define como el organismo técnico encargado de analizar precios, tarifas y normas técnicas a las que deben adherirse las empresas de producción, generación y distribución de energía, este se relaciona con el presidente de la República a través del Ministerio de Energía, por lo que la información relacionada se obtuvo de esta fuente.

Para los equipos electrolizadores, los datos utilizados provienen del proveedor de estos equipos Nelhydrogen, empresa líder en la producción de electrolizadores, que tiene como objetivo ofrecer soluciones óptimas para producir, almacenar y distribuir hidrógeno a partir de energías renovables.

Actualmente en Chile no existe una producción a gran escala de hidrógeno verde, sin embargo los primeros pilotos, si bien contemplan la producción de energía renovable para la alimentación de los electrolizadores, comprueban la factibilidad de la generación, lo que facilita la incorporación de nuevos actores al mercado, a su vez debido a la necesidad de una mayor

confiabilidad en la producción masiva de hidrógeno verde, dada en gran parte por la cantidad de horas de operación en base a energía renovable de los electrolizadores, termino conocido como factor de planta, es que el ministerio de energía, se enfoca en generar un ambiente prospero para los inversionistas de energías renovables, con el fin de acceder a una alimentación directa del sistema eléctrico nacional (on grid), y no independiente (off grid), es que se implementa el sistema de cuotas que fomenta la competencia entre generadores renovables, motivando la generación a un costo menor mediante la fijación de cuotas de producción y sanciones por incumplimiento, además de la transmisión activa, la cual sugiere licitar las líneas de transmisión, antes de la construcción de plantas de generación renovables, para evitar desfases entre el inicio de la producción y el termino de construcción de las generadoras renovables. (Sauma, 2021).

En este estudio, el costo de producción del hidrógeno se estima con la ecuación del LCOH (Leveled cost of Hydrogen) propuesta por Julien Armijo, que considera la inversión inicial, los costos de operación, mantención, electricidad, agua y el precio de venta del oxígeno, que se obtiene como subproducto en el proceso de electrólisis, la cual se muestra a continuación.

Ecuación del LCOH (1)

$$LCOH = P_{mst} * I * \frac{FRC + O}{h * f_p * Q_{H_2}} + (Q_{H_2O} * P_{H_2O}) + \dots (P_e * Q_e) - (Q_{O_2} * P_{O_2})$$

Donde las variables y parámetros corresponden a los descritos en la tabla I.

Luego del análisis de los distintos factores que influyen en la generación de hidrógeno verde como lo son la matriz energética nacional, el mercado eléctrico y el funcionamiento de los equipos electrolizadores, el cálculo se realizó para un electrolizador PEM ya que este presenta ventajas en cuanto a la sustentabilidad del proceso ya que permite realizar la electrolisis con agua por lo que no requiere utilizar electrolitos químicos como el alcalino, y presenta una mayor viabilidad técnica que los equipos SOEC, que aun su tecnología se encuentra en etapa de desarrollo. (Soto, 2021)

Después de realizado el cálculo, del costo nivelado, se muestra un análisis de sensibilidad de las distintas variables que componen la ecuación del hidrógeno, el

cual muestra la variación del precio del hidrógeno ante las variaciones en cada parámetro.

Tabla I: Variables y parámetros para la caracterización de la ecuación (1)

Parámetro	Detalle
P_{mst}	Potencia instalada del electrolizador
FR	Factor de recuperación del capital según la tasa de descuento
f_p	Factor de planta del electrolizador
O	OPEX (% de la inversión inicial)
Q_{H_2O}	Metros cúbicos de agua consumida por metro cubico de hidrógeno.
P_{H_2O}	Precio del agua.
H	Horas al año
P_e	Precio de la electricidad
Q_e	Cantidad de electricidad consumida por kilo de hidrógeno producido
P_{O_2}	Precio de venta del kilo de oxígeno.
Q_{O_2}	Cantidad de oxígeno producido por kilo de hidrógeno
Q_{H_2}	Cantidad de producción del electrolizador

3. Antecedentes del caso de estudio

La situación actual de la matriz energética de Chile, en marzo del 2021, se compone por un 51,8% de energía renovable y la no renovable un 48,2% (figura 1) (Asociación de generadoras de Chile, 2021).

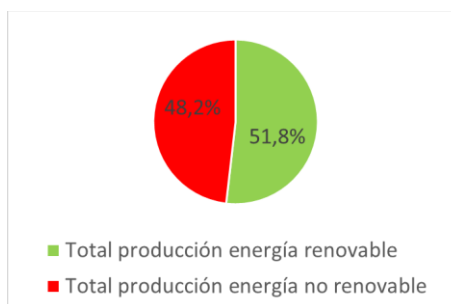


Figura 1. Distribución de la energía en Chile, marzo, 2021.

(Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

Las cantidades de cada tipo de energía se muestran en la tabla II, en donde se destaca una que la producción de energía renovable supero a la no renovable por aproximadamente un 7% a marzo del 2021.

Tabla II: Cantidad y tipo de energía en Chile, marzo 2021.

(Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

Tipo	Capacidad (MW)
No renovable	12.918
Renovable	13.906
Total	26.824

De la figura 1, se aprecia la gran participación que han logrado las energías renovables, sin embargo, aún se presenta un 48,2% de energía termoeléctrica (Asociación de generadoras de Chile, 2021), que se genera a partir de carbón, gas natural o derivados del petróleo (figura 2).

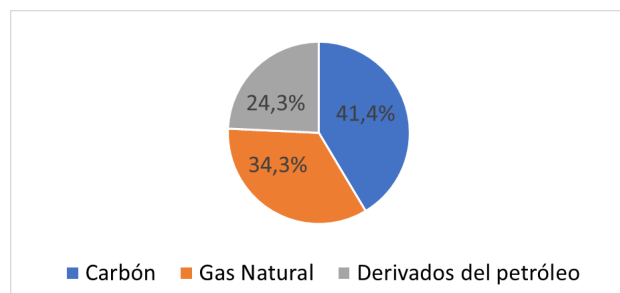


Figura 2. Distribución de la energía no renovable en Chile, marzo 2021.

(Fuente: Elaboración propia en base a la información publicada por la asociación de generadoras de Chile)

Por su parte, la energía renovable en Chile presenta la siguiente distribución, en donde destacan una mayor participación la energía hidroeléctrica y solar (figura 3). Sin embargo, cada vez la energía eólica toma una mayor participación debido al efecto de economías de escala sobre los aerogeneradores, los cuales han aumentado su capacidad de producción, lo que implica una disminución en el costo unitario (Cruz, 2020).

Figura 3. Distribución de la energía renovable en Chile, marzo 2021 Fuente: Elaboración propia

También cabe destacar que en Chile solo se tiene una planta de generación geotérmica llamada Cerro Pabellón, esto se explica por los costos de generación, debido a que este tipo de energía aun no logra un precio competitivo respecto de las otras fuentes de energía renovable, dado que el costo de exploración para

descubrir nuevas fuentes geotérmicas aun es demasiado alto. (Sauma, 2021).

Mercado eléctrico

Existen múltiples factores asociados a los costos de la energía eléctrica, por lo que también existen distintos costos de la energía. Por otra parte, el sistema eléctrico está conformado por la generación, transmisión y distribución (Sauma, 2021)., en cada una de estas áreas existen distintos precios asociados a la generación o el transporte de la energía. De esta forma, el precio que un usuario final paga por la electricidad contiene diversas componentes. A continuación, se detallan los principales componentes del precio que pagan los usuarios residenciales del sistema eléctrico chileno por la electricidad consumida.

Precio de la transmisión

En Chile existen sistemas de transmisión nacional, sistemas zonales y sistemas dedicados. El sistema nacional está formado todas las líneas de transmisión de mayor capacidad y voltaje, cuya utilización es compartida por centrales generadoras y los consumidores. El sistema de zonas está constituido por el conjunto de líneas que abastecen directamente a zonas de distribución determinadas desde el sistema nacional. El sistema dedicado, por su parte, está constituido por líneas dedicadas al abastecimiento de grandes clientes industriales específicos, esto quiere decir que según sea la naturaleza y la ubicación del consumidor será el cobro asociado a este ítem (Sauma, 2021).

Precio de la distribución (VAD)

Las empresas distribuidoras venden la energía que producen a los consumidores de una determinada área geográfica y están obligadas a satisfacer la demanda eléctrica de esta, a un precio de distribución regulado llamado Valor Agregado de Distribución (VAD). El VAD es una tarifa que incluye distintos factores relacionados al uso de la infraestructura de distribución y está compuesta por un cargo fijo (de gestión, facturación, servicio al consumidor, pérdida de potencia y energía promedio) y un cargo por unidad de potencia para pagar los costos de operación, mantención e inversión (Sauma, 2021).

Precio final

El precio que pagan los usuarios de la energía viene dado por la siguiente ecuación:

$$PUF=PG+PT+VAD+CUST(2)$$

Donde:

PUF: Precio a usuario final

PG: Precio de generación

PT: Precio de transmisión

VAD: Valor agregado de distribución

CUST: Cargo Único por uso del sistema troncal.

(Fuente: Comisión nacional de energía, 2020)

Clientes regulados

Para consumidores de energía que posean una capacidad instalada inferior o igual a 5.000 kW se establece que existen condiciones de mercado de asociadas a un monopolio natural y, por lo tanto, la ley establece su precio debe ser regulado. (Comisión nacional de energía, 2020).

Clientes Libres

Para suministros a usuarios finales cuya capacidad instalada sea superior a 5.000 kW, la Ley dispone la libertad de precios, suponiéndoles capacidad negociadora y la posibilidad de proveerse de electricidad de otras formas, tales como la autogeneración o el suministro directo desde empresas generadoras. Sin embargo, clientes que posean una potencia conectada superior a 500 kW pueden elegir a cuál régimen adscribirse (libre o regulado) por un período de 4 años (Comisión nacional de energía, 2020).

Conexión eléctrica On-grid y OFF-grid

La alimentación del electrolizador puede ser de tres formas: On-grid, Off-grid o mixto.

On-grid: Está representa la conexión con el sistema eléctrico nacional. Esta tiene la ventaja de una operación constante, independiente de la generación eléctrica renovable que pueda haber asociada a una planta de hidrógeno verde. Su principal desventaja es que, si el país no funciona en base a energías renovables, el hidrógeno producido no sería verde, ya que en su cadena productiva (generación eléctrica en este caso), habría emisiones de carbono al

medioambiente. Su principal ventaja es que permite un mayor factor de planta (Guerrero, 2020).

Off-grid: Está representa una alimentación eléctrica independiente del sistema eléctrico nacional, es decir, requiere una planta de generación de energía (renovable para que el hidrógeno sea verde), para la alimentación del electrolizador. Sus principales desventajas son que requieren baterías para almacenar energía y son dependientes de la disponibilidad de los recursos para la generación de energías renovables. (Guerrero, 2020).

También es posible alimentar un electrolizador con ambos métodos, según sea el requerimiento.

Incentivos para la generación de energía renovable

Sistema de cuotas

Con el fin de incentivar la generación de energía renovable, generando confianza para los inversionistas de la producción de energía renovable, el Estado fija un porcentaje mínimo de generación de energía a través de fuentes renovables e incluye multas en caso de no cumplir. La principal característica de este sistema es que los generadores renovables compiten independientemente de la tecnología empleada para la generación de energía. Con ello, se fomenta la competencia entre generadores renovables, motivando la generación a un costo menor, lo que disminuye su precio final e incentiva a los consumidores. (Sauma, 2021).

Transmisión activa

Con el fin de incentivar la inversión y a modo de solución para el desfase producido por el mayor tiempo de construcción de las líneas de transmisión en comparación con las plantas de generación renovables, el gobierno de Chile contempla licitar primero las líneas de transmisión, que su construcción puede tardar entre 3 y 5 años, en cambio una planta de generación puede tardar entre 1 y 3 años, esto permite adelantar el inicio de la producción de las plantas de generación y a su vez el beneficio de estas (Sauma, 2021).

Tipos de electrolizadores

Actualmente existen 3 tipos de electrolizadores que han alcanzado desarrollo comercial: Electrolizador PEM, Alcalinos y SOEC, su principal descripción se muestra a continuación:

Electrolizador PEM

El electrolizador de membrana de intercambio protónico PEM (Proton Exchange Membrane) funciona con electrodos, estos pueden ser sumergidos agua y se estos reciben la carga eléctrica, la calidad del agua va a estar relacionada directamente con la vida útil de algunos componentes del equipo, por lo que algunos proveedores incluyen sistemas para aumentar su pureza previo al ingreso del agua al equipo.

El electrolizador PEM contiene una membrana entre los electrodos, recubierta por metales de alto costo, como el platino y el iridio, la principal función de esta membrana es que no permite que se mezclen los gases emitidos en el proceso, su mayor ventaja es que no utiliza productos químicos como solución para el proceso de electrolisis, a diferencia electrolizador alcalino que requiere una solución química para el proceso este proceso(Soto, 2021), sin embargo su principal desventaja es que a la salida del electrolizador, el hidrógeno producido sale a una presión en el rango de las 30 atmosferas, por lo que para un transporte económicamente viable del hidrógeno producido por este tipo de electrolizador se requiere estrictamente un gasto energético extra para su compresión o licuefacción, según sea el caso, a modo de aumentar la cantidad de energía transportada por unidad de volumen. Su principio de operación se muestra en la figura 6.

Electrolizador Alcalino

Este tipo de electrolizador se compone por dos electrodos separados por una membrana que no impide una separación tan efectiva como la del electrolizador PEM, lo que produce un hidrógeno de menor pureza al comparar ambos electrolizadores. Los electrodos se encuentran sumergidos en una solución acuosa concentrada de agua destilada con un 25 a 30% de hidróxido de potasio (KOH), siendo esta la principal desventaja en cuanto a la sustentabilidad del proceso ya que este electrolito químico puede producir contaminación durante su uso o producción.

Actualmente estos equipos presentan un menor costo de inversión y una mayor tasa productiva y vida útil que

los electrolizadores PEM, y son los equipos con un mayor desarrollo comercial (Soto, 2021).

Se produce hidrógeno y oxígeno a baja presión, ambos en estado gaseoso, a continuación, se muestra el principio de operación de un electrolizador alcalino en la figura 5:

Electrolizador SOEC

El electrolizador de oxido solido SOEC (Solid Oxide Electrolyzer) opera en base a vapor de agua y electricidad, este equipo contiene una membrana de un material cerámico llamado Zirconio, el cual funciona mediante electrólisis de vapor de agua a temperaturas entre 600°C y 900°C, lo que permite un funcionamiento a mayores presiones, por lo que disminuye el gasto requerido para la compresión del hidrógeno a la salida del electrolizador, Pero dadas las condiciones requeridas por este tipo de equipos para operar de alta presión y temperatura (Soto, 2021), su incorporación en operaciones cotidianas se hace más compleja que los otros tipos de electrolizadores, por lo que este tipo de electrolizador, aún se encuentra en etapa de investigación y desarrollo, su principio de operación se muestra a continuación en la figura 4

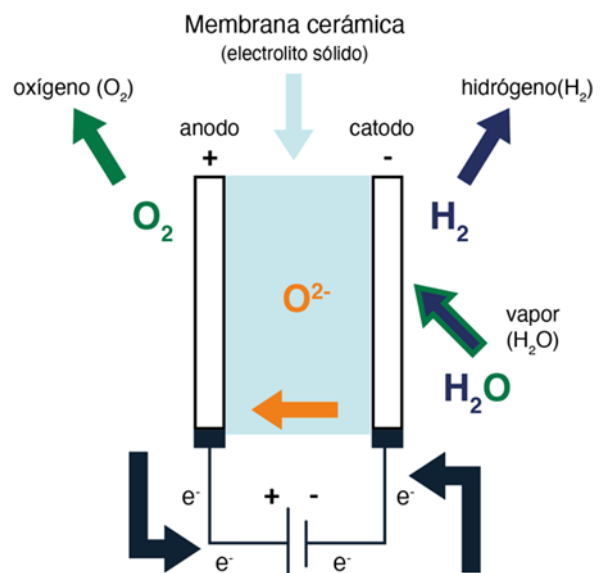


Figura 4. Principio de operación de un electrolizador SOEC

Fuente: Adaptado desde (Soto, 2021)

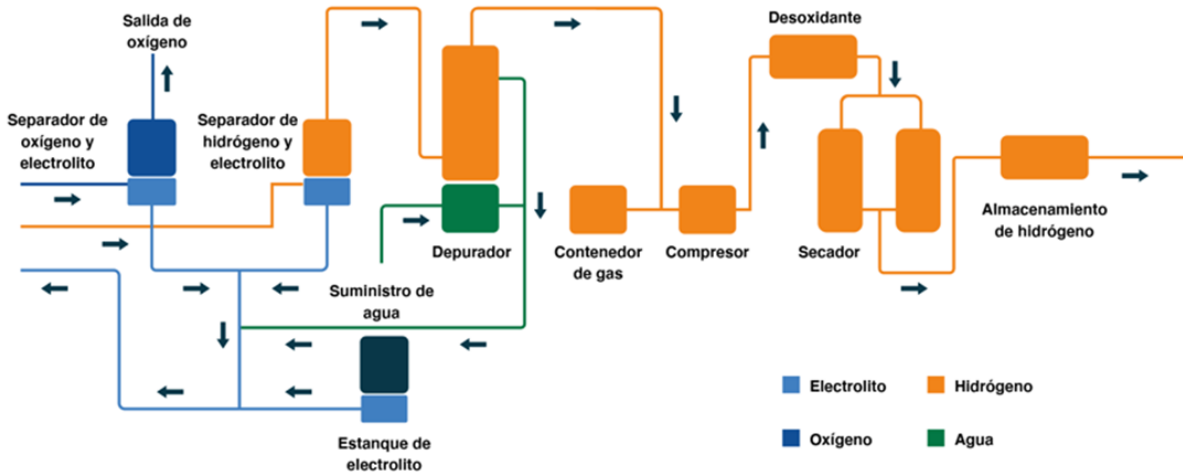


Figura 5. Principio de operación de un electrolizador alcalino
Fuente: Adaptado desde (Nel Hydrogen, 2019).

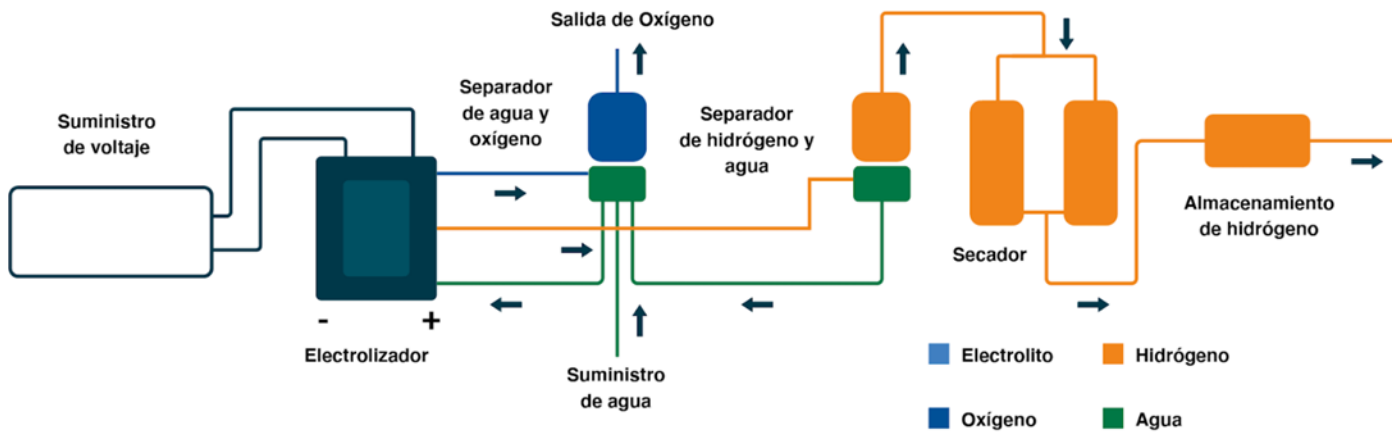


Figura 6. Principio de operación de un electrolizador PEM
Fuente: Adaptado desde (Nel Hydrogen, 2019).

3. Resultados

Para este análisis se consideraron los siguientes valores:

(Tabla III: Valores utilizados Fuente: Elaboración propia)

Capacidad instalada del electrolizador (kW)	10.000
CAPEX electrolizador (USD/kW)	600
OPEX (% del CAPEX)	0,02
Factor de planta electrolizador (%)	0,95
Horas en un año (h)	8.760
Producción del electrolizador (kg H ₂ /h)	500
Agua requerida (litro/kg H ₂)	15
Precio del agua (USD/litro)	0,006
Electricidad requerida por kilo de hidrógeno (kWh/kg H ₂)	50
Precio electricidad (USD/kWh)	0,07
Precio de venta Oxígeno (USD/kg O ₂)	0,05
Producción Oxígeno (kg O ₂ / kg H ₂)	9
Vida útil del electrolizador (años)	8
Tasa de descuento (%)	0,08
Factor de recuperación de capital (%)	0,174
Valor calculado del LCOH (USD/KG)	3,42

3.1 Competitividad del valor calculado

En la siguiente tabla se muestran distintos resultados del costo nivelado del hidrógeno, realizado por las siguientes instituciones:

Tabla IV: Comparación del LCOH calculado con otros estudios. (Fuente: F, Guerrero 2020)

Nombre del estudio	LCOH calculado (USD/kg)
GIZ 2018	5,8
In - data 2019	3,9
Implementa Sur 2019	3,52
Este estudio	3,42
Tractebel - Engie 2018	3,03
Julien Armijo IEA 2019	2,19

3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se basa en evaluar como los valores utilizados pueden variar el resultado, según alteraciones en cada variable de manera independiente (Bordalejo, 2018).

En este caso después de analizar las distintas variables que afectan el costo nivelado del hidrógeno, se establece la variación del precio del hidrógeno según alteraciones de las variables respectivas como se indica en las siguientes figuras.

De la figura 7 se puede apreciar una variación de 0,02 dólares por kilo de hidrógeno al variar en 50 kilos por hora la capacidad de la producción del electrolizador, aproximadamente un 0,5%, manteniendo las otras variables constantes.

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de tecnologías de menor costo que permitan la producción de hidrógeno mediante membranas de intercambio protónico (PEM) es fundamental para disminuir el costo nivelado del hidrógeno verde, en la figura 8, se muestra el cambio en el valor del costo nivelado, para distintos valores de CAPEX, manteniendo la producción constante.

Sin embargo, cada una de estas variables de manera independiente, no son suficientes para lograr una incorporación competitiva del hidrógeno al mercado, por lo que debe existir un desarrollo integral de estos equipos que permita tanto un aumento en la eficiencia del equipo, como una disminución del costo de inversión.

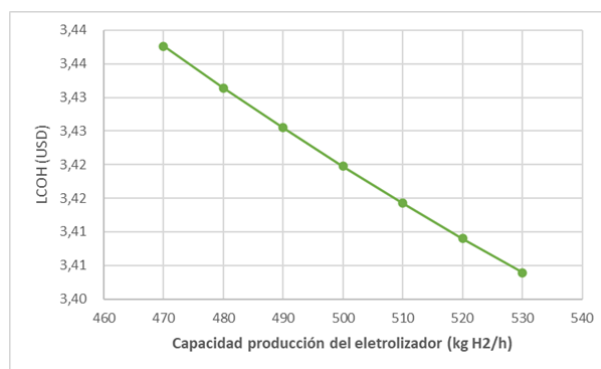


Figura 7: Variación del costo nivelado del hidrógeno para distintos niveles de producción. (Fuente: Elaboración propia)

La figura 8 muestra el cambio en el costo nivelado del hidrógeno, cercano al 1%, esto indica que mientras la inversión, es decir, el costo de las tecnologías para

producir hidrógeno, no sea significativamente disminuida, el LCOH no se ve afectado drásticamente, lo que destaca la necesidad de desarrollar tecnologías de menor costo además de mejorar el valor de otras variables en conjunto para tener un precio menor de hidrógeno verde.

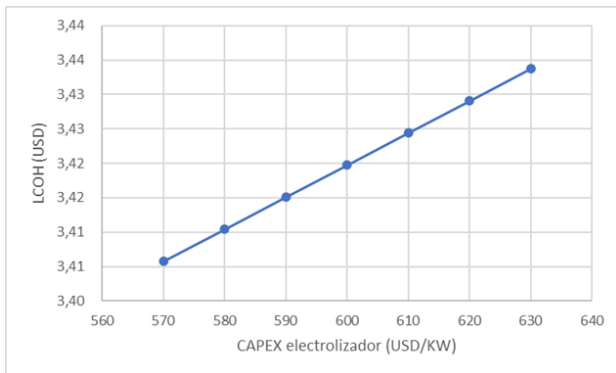


Figura 8: Variación del costo nivelado para distintos valores de inversión por kW en el electrolizador. Fuente: Elaboración propia.

La figura 9 deja en evidencia la necesidad de generar una matriz energética de energía renovable, debido a la variación en el precio que existe respecto a los distintos factores de planta expuestos.

Generalmente los valores sobre 80% son asociados a electrolizadores on grid, y los más bajos a los electrolizadores conectados off grid, por lo que el desarrollo de la generación de energía renovable es un factor clave para llegar a valores económicamente competitivos con derivados del petróleo, en términos de generación de energía.

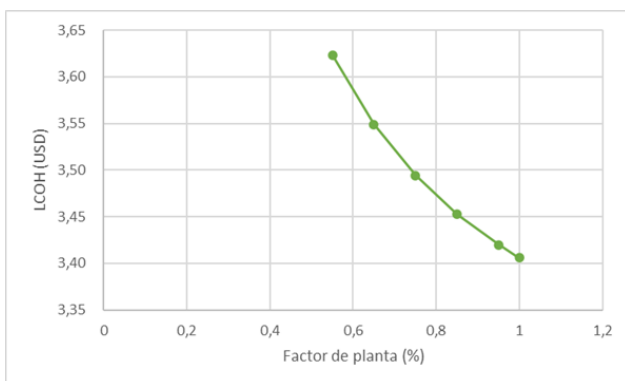


Figura 9: Variación del costo nivelado según distintos factores de planta. Fuente: Elaboración propia.

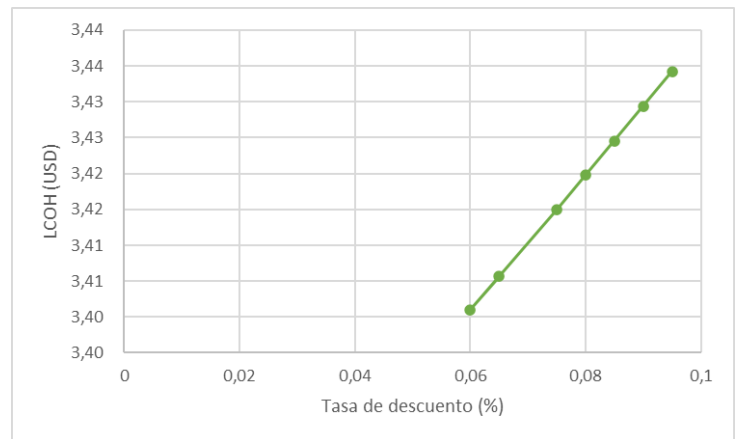


Figura 10: Variación del costo nivelado del hidrógeno verde respecto de la tasa de descuento Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10, se muestra la variación del precio en función de la tasa de descuento, considerando el rango típico de tasas de descuento utilizadas en proyectos de hidrógeno (F, Guerrero, 2020) según la situación actual del mercado, considerando los costos de inversión, la producción y el precio actual del hidrógeno, lo que evidencia un cambio de aproximadamente 0,25 dólares, valor no significativo considerando la alteración independiente de esta variable.

3.3 Discusión de resultados

Desde los hallazgos establecidos en este proyecto, es posible destacar que los requerimientos para producir H2 verde a costo competitivo y que tenga una incorporación exitosa en el mercado es que se deben desarrollar soluciones que permitan mejorar de manera integral las variables que componen su precio, sin embargo las condiciones de mayor impacto son dos 1) Una matriz energética compuesta en su totalidad por energías renovables, y 2) El incentivo gubernamental a las condiciones del mercado requeridas para otorgar factibilidad financiera, ya que esto mejoraría el factor de planta y a su vez la evaluación de proyectos debido al impacto de esta variable en los beneficios económicos, y además se fomenta la inversión, desarrollo de equipos y el uso de equipos electrolizadores lo que eventualmente disminuiría el costo de estos dada la competencia generada a los productores por el requerimiento de estos equipos. Dichos hallazgos coinciden con las propuestas de (Guerrero, 2020), donde se especifica que el factor de planta influye de gran magnitud en el costo nivelado y

que un alto factor de planta se logra al cumplir las condiciones antes expuestas. Para lograr el factor de planta requerido se propone: Adherir a un plan nacional de integración y diversificación de la matriz energética, para facilitar el objetivo de conectar los electrolizadores a la red local.

Otro de los puntos más relevantes observados en el cálculo realizado, son el precio de los equipos asociados a la producción de hidrógeno, junto con la capacidad de producción asociada a la potencia instalada del equipo, ya que se espera que estos disminuyan su valor, efecto producido por economías de escala, un ejemplo de esto es lo que ocurrió con los aerogeneradores, que en los últimos 10 años duplicaron su altura y aumentaron su capacidad de valores cercanos a los 9 MW en 2010 hasta 15 MW al año 2020 (Cruz, 2020).

Considerando que las materias primas para generar hidrógeno, mediante un electrolizador PEM, son agua y electricidad, se hace estrictamente necesario tener certeza sobre la disponibilidad del recurso hídrico, del cual existen dos fuentes de obtención, las cuencas naturales o la desalinización de agua de mar.

4. Conclusiones

Este trabajo establece que las condiciones que deben existir para que el hidrógeno verde presente un costo competitivo que permita una incorporación exitosa al mercado son: matriz energética compuesta en su totalidad por energías renovables, electrolizadores operando con un alto factor de planta y la influencia del efecto de las economías de escala sobre estos equipos, lo que afecta directamente la capacidad de producción y los costos tanto de inversión como de operación.

En efecto, los resultados mostraron que la ausencia de una matriz energética con base en energía renovable implicaría que el hidrógeno producido, por electrolizadores que estén conectados al sistema eléctrico nacional, no será verde. Esto debido a que la energía utilizada para producir este hidrógeno, tendrá emisiones de gases efecto invernadero, a su vez, para lograr los precios proyectados 1,6 dólares el kilo de hidrógeno verde (Ministerio de energía, 2020), es necesario que los electrolizadores tengan un alto factor de planta, se estima que los electrolizadores on grid pueden tener más de 90% de factor de planta, mientras que para el caso de los off grid su factor de planta puede ser entre 40% y 60%, lo que afecta directamente la cantidad de producción de hidrógeno verde por cada equipo, y por ende el precio del mismo.

Dado lo anterior este trabajo contribuye al entendimiento de las condiciones necesarias que permitan la producción y consumo de hidrógeno verde, y el impacto económico de este combustible sustentable.

4.1 Acciones futuras según brechas detectadas.

Evaluar mediante análisis de escenarios las condiciones proyectadas para la producción de hidrógeno verde.

Evaluar el LCOH del electrolizador PEM al utilizar otros líquidos no contaminantes como solución para la electrolisis.

Estudiar la regulación de la alimentación eléctrica de las desalinizadoras, para que el hidrógeno producido sea considerado verde.

Referencias

Agencia Internacional de energía (2020). *Perspectivas energéticas mundiales 2020*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energyoutlook-2020><https://www.iea.org/reports/world-energyoutlook-2020>

Asociación de generadoras de Chile (2020). *Informe de Capacidad instalada por fuente*. Recuperado de <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

Basile, A. (2015). *Reactores de membrana para reformado con vapor de metano (SMR)*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242235000029>

Nel Hydrogen (2019). *Unlocking the potential of renewables*. Nel Hydrogen. Recuperado de <https://nelhydrogen.com/>

Guerra, C. F., Reyes-Bozo, L., Vyhmeister, E., Caparrós, M. J., Salazar, J. L., Godoy-Faúndez, A., ... & Verastegui-Rayó, D. (2020). *Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel*. *international journal of hydrogen energy*, . Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991932912X>

Comisión nacional de energía, (2020). Recuperado de, <https://www.cne.cl/tarifificacion/electrica/>

Soto, O. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada*. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176192>

Cruz, I. (2019). *Guía específica de trabajo sobre "La energía eólica marina*. Recuperado de <https://programainvestiga.org/pdf/guias2019-20/guiaenergiaeolicamarina.pdf>

Fraile, D. (2015). *Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas*. European Commission. Recuperado de http://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdfhttp://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf

Guerrero, F. (2020). *Análisis del uso de hidrógeno verde en camiones de extracción en la minería para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto*

invernadero. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50108/3560903501483UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hurtubia, J. (2019). *Breve examen al cambio climático, contaminación del aire y salud en Chile*. Recuperado de https://defensoriaambiental.org/wp-content/uploads/Cuadernos-Medicos-Sociales_2019_Vol_59_N1.pdf#page=9

Hydrogen Council. (2017). *Hydrogen scaling up*. Recuperado de <https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/><https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>

Mendes, F. H., Romero, H., & Ferreira da Silva Filho, D. (2020). *Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile*. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-34022020000300191&script=sci_arttext

Ministerio de energía. (2020). *Estrategia nacional de hidrógeno verde*. Recuperado de <https://energia.gob.cl/h2/Estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>

Ministerio de Energía. (2018). *Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo Informe Final corregido*, Recuperado de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_corregido_pelp_2018-2022.pdf

Giannotti, E., Vásquez, A., Galdámez, E., Velásquez, P., & Devoto, C. (2021). *Planificación de infraestructura verde para la emergencia climática: aprendizajes desde el proyecto "Stgo+", Santiago de Chile*. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2021000200359

Sauma, E. (2021). *Pontificia Universidad Católica de Chile, Diplomado en hidrógeno verde, Curso Economía de la Energía*.

Vásquez R., Salinas F., Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2015). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile*. Recuperado de <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wpcontent/uploads/2020/07/23185348/L>

4 CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo establece que las condiciones que deben existir para que el hidrógeno verde presente un costo competitivo que permita una incorporación exitosa al mercado son: una matriz energética compuesta en su totalidad por energías renovables, electrolizadores operando con un alto factor de planta y la influencia del efecto de las economías de escala sobre los equipos electrolizadores.

En efecto, los resultados mostraron que la ausencia de una matriz energética con base en energía renovable implicaría que el hidrógeno producido, por electrolizadores que estén conectados al sistema eléctrico nacional, no será verde. Esto debido a que la energía utilizada para producir este hidrógeno, tendrá emisiones de gases contaminantes, a su vez, para lograr los precios proyectados 1,6 dólares el kilo de hidrógeno verde (Ministerio de energía, 2020), es necesario que los electrolizadores tengan un alto factor de planta, se estima que los electrolizadores on grid pueden tener más de 90% de factor de planta, mientras que para el caso de los off grid su factor de planta puede ser entre 40% y 60%, lo que afecta directamente la cantidad de producción de hidrógeno verde por cada equipo, y por ende el precio del mismo.

Luego del análisis de sensibilidad, se pudo concluir que no es suficiente para que el hidrógeno alcance un costo competitivo, que solo una variable tenga un comportamiento prospero, sino que es necesaria una alineación de todas las variables para lograr el objetivo.

Dado lo anterior este trabajo contribuye al entendimiento de las condiciones necesarias que permiten la producción y consumo de hidrógeno verde, y el impacto económico de este combustible sustentable.

La composición de la matriz energética nacional se muestra en cantidades y porcentajes, según los distintos tipos, tanto de renovables como de no renovables, mediante la información obtenida de la asociación de generadoras de Chile, gremio

que representa a las empresas de generación eléctrica que construyen y operan proyectos de energías en todas las tecnologías presentes en Chile.

La factibilidad de producción del hidrógeno verde se muestra dado el comportamiento de las distintas variables que componen la aproximación de su costo de producción, además del mercado eléctrico nacional y sus políticas de incentivo a la generación de energías renovables, considerados elementos claves para la producción de hidrógeno verde

El costo nivelado del hidrógeno verde se calculó mediante una aproximación de cada variable que compone la ecuación, considerando el contexto actual de las tecnologías de producción, el mercado eléctrico nacional, para el caso de una matriz energética compuesta en su totalidad por energía renovable.

4.1 Propuesta para trabajos futuros

Como continuación de este trabajo de tesis, hay varias líneas de desarrollo que quedan pendientes, y en las que es posible continuar trabajando; algunas de ellas, están más directamente relacionadas con este trabajo de tesis y son el resultado de preguntas que han ido surgiendo durante el proceso de investigación, como otras que son más tangenciales a la investigación. A continuación, revisaremos trabajos futuros que pueden investigarse como conclusión de esta investigación:

Evaluar mediante análisis de escenarios las condiciones proyectadas para la producción de hidrógeno verde.

- Evaluar el LCOH del electrolizador PEM al utilizar otros líquidos no contaminantes como solución para la electrolisis.
- Estudiar la regulación de la alimentación eléctrica de las desalinizadoras, para que el hidrógeno producido sea considerado verde.
- Analizar otras tecnologías de producción de hidrógeno verde.
- Considerar otros proveedores de equipos electrolizadores.

- Analizar la variabilidad del precio de la electricidad en función de la ubicación.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agencia Internacional de energía (2020). Perspectivas energéticas mundiales 2020. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energyoutlook-2020>

Asociación de generadoras de Chile (2020). Informe de Capacidad instalada por fuente. Recuperado de <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

Basile, A. (2015). Reactores de membrana para reformado con vapor de metano (SMR). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422235000029>

Nel Hydrogen (2019). Unlocking the potential of renewables. Nel Hydrogen. Recuperado de <https://nelhydrogen.com/>

Guerra, C. F., Reyes-Bozo, L., Vyhmeister, E., Caparrós, M. J., Salazar, J. L., Godoy-Faúndez, A., ... & Verastegui-Rayó, D. (2020). Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel. international journal of hydrogen energy, . Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991932912X>

Comisión nacional de energía, (2020). Recuperado de, <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/>

Soto, O. (2020). Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176192>

- Cruz, I. (2019). Guía específica de trabajo sobre “La energía eólica marina. Recuperado de <https://programainvestiga.org/pdf/guias2019-20/guiaenergiaeolicamarina.pdf>
- Fraile, D. (2015). Overview of the Market Segmentation for Hydrogen Across Potential Customer Groups, Based on Key Application Areas. European Commission. Recuperado de http://www.certifyhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf
- Guerrero, F. (2020). Análisis del uso de hidrógeno verde en camiones de extracción en la minería para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50108/3560903501483 UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hurtubia, J. (2019). Breve examen al cambio climático, contaminación del aire y salud en Chile. Recuperado de https://defensoriaambiental.org/wp-content/uploads/Cuadernos-Medicos-Sociales_2019_Vol_59_N1.pdf#page=9
- Hydrogen Council. (2017). Hydrogen scaling up. Recuperado de <https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>
<https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>
- Mendes, F. H., Romero, H., & Ferreira da Silva Filho, D. (2020). Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-34022020000300191&script=sci_arttext

Ministerio de energía. (2020). Estrategia nacional de hidrógeno verde. Recuperado de <https://energia.gob.cl/h2/Estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>

Ministerio de Energía. (2018). Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo Informe Final corregido, Recuperado de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_corregido_pel_p_2018-2022.pdf

Giannotti, E., Vásquez, A., Galdámez, E., Velásquez, P., & Devoto, C. (2021). Planificación de infraestructura verde para la emergencia climática: aprendizajes desde el proyecto "Stgo+", Santiago de Chile. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2021000200359

Sauma, E. (2021). Pontificia Universidad Católica de Chile, Diplomado en hidrógeno verde, Curso Economía de la Energía.

Vásquez R., Salinas F., Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2015). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile. Recuperado de <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wpcontent/uploads/2020/07/23185348/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-YPERSPECTIVAS-CHILE.pdf><https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wpcontent/uploads/2020/07/23185348/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-YPERSPECTIVAS-CHILE.pdf>

Ramos, C. (2021). BHP trabaja en un proyecto piloto de hidrógeno verde en minera spence. Recuperado de <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/bhp-trabaja-en-un-proyecto-piloto-de-hidrogeno-verde-en-minera-spence/>

Bordalejo, M. (2018). Las becas y ayudas al estudio como elemento determinante de la continuidad escolar en el nivel secundario post-obligatorio. Un análisis de sensibilidad a partir de la aplicación del Propensity Score Matching. Recuperado de <https://repec.economicsofeducation.com/2010zaragoza/05-29.pdf>

6 ANEXO: REPORTE DE PLAGIO

El reporte de posibilidad de plagio de este trabajo, con otros trabajos publicados entrega un porcentaje de similitud de: 0%

Resultado del análisis

Archivo: Formato Final Tesis MAGS AUGUSTO GALLARDO.docx

Estadísticas

Sospechosas en Internet: **0%**

Porcentaje del texto con expresiones en Internet Δ .

Sospechas confirmadas: **0%**

Confirmada existencia de los tramos en las direcciones encontradas Δ .

Texto analizado: **85,36%**

Porcentaje del texto analizado efectivamente (no se analizan las frases cortas, caracteres especiales, texto roto).

Éxito del análisis: **100%**

Porcentaje de éxito de la investigación, indica la calidad del análisis, cuanto más alto mejor.

Direcciones más relevantes encontrados:

Dirección (URL)	Ocurrencias	Semejanza
Solo disponible con una licencia válida	40	0%
Solo disponible con una licencia válida	31	0%
Solo disponible con una licencia válida	29	0%
https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/88749	26	3,16 %
Solo disponible con una licencia válida	25	0%
Solo disponible con una licencia válida	21	0%

Texto analizado:

Evaluación del escenario [de producción de hidrogeno verde mediante electrolizador PEM](#)

[AUGUSTO JAVIER GALLARDO HENRIQUEZ](#)

PROFESOR(ES) [GUÍA: HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD](#)

[PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD](#)

[SANTIAGO CHILE](#)
[2022](#)

Evaluación del escenario [de producción de hidrogeno verde mediante electrolizador PEM](#)
Por: [AUGUSTO JAVIER GALLARDO HENRIQUEZ](#)

[Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:](#)

[profesor GUIA: Héctor Valdés-González, PhD](#)

