



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS CON COMBUSTIÓN EN UNA FUNDICIÓN DE ACERO

CARLOS EDUARDO MAYA LIZANA

PROFESOR GUÍA: ALEX GODOY

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

SANTIAGO- CHILE
2024



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS CON COMBUSTIÓN EN UNA FUNDICIÓN DE ACERO

POR: CARLOS EDUARDO MAYA LIZANA

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

PROFESOR GUIA: ALEX GODOY

PROFESOR INTEGRANTE 1: LUIS ALONSO DIAZ

PROFESOR INTEGRANTE 2: DIEGO RIVERA

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Gestión de la sustentabilidad

Enero, 2024
Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: **ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS CON COMBUSTIÓN EN UNA FUNDICIÓN DE ACERO**, 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.

Carlos Eduardo Maya Lizana

Firma

AGRADECIMIENTOS

A mi querida familia y a todas las personas que me han apoyado y han hecho que el presente trabajo se realizara con éxito, en especial a aquellos que nos compartieron sus conocimientos.

ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PROCESOS CON COMBUSTIÓN EN UNA FUNDICIÓN DE ACERO

Carlos Eduardo Maya Lizana

Bajo la supervisión del Profesor Alex Godoy en la Universidad del Desarrollo de Chile

Resumen

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para la mitigación y adaptación al cambio climático; tiene foco en la eficiencia energética y transición al uso de energía eléctrica renovable. En este contexto, al año 2023 se observa poca atención en los procesos con combustión en la industria manufacturera. El objetivo de este trabajo es analizar las alternativas de transición energética en procesos con combustión de una industria de acero que usa gas natural como insumo y presentar una opción técnica viable, generando menos emisiones de efecto invernadero. Para esto, se realiza un análisis técnico, económico y ambiental de las diferentes tecnologías existentes en el mercado nacional; para el reemplazo del gas natural. Los antecedentes muestran que, una alternativa estratégica para el gobierno de Chile es el uso de hidrógeno verde, sin embargo, hay aspectos no resueltos como, disponibilidad nacional de plantas generadoras de hidrógeno, emisiones de CO_{2eq} limitado (6%), el aumento de emisiones de NO_x en la combustión, invisibilidad de llama, seguridad y normalización técnica en su uso. Dado lo anterior, se concluye que el biometano se presenta como una alternativa más prometedora en la reducción de emisiones de CO_{2eq} (35%), ya que su desarrollo no implica limitantes técnicas significativas en los procesos con combustión existentes, y tiene un impacto neutro en la generación de Biogás y moderado en el proceso de metanización y transporte. Esto lo convierte en una opción costo-efectiva desde el inicio, ofreciendo un camino hacia una industria del acero más sustentable.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	DESAFÍO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN SECTOR MANUFACTURERO METALMECÁNICO INSERTO EN UNA ECONOMÍA COMPLEJA CON INFRAESTRUCTURA, REGLAS E INCENTIVOS DESACTUALIZADOS PARA LOGRAR CUMPLIR COMPROMISOS DE DESCARBONIZACIÓN TOTAL EN MERCADOS DINÁMICOS.....	12
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA	13
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO	20
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	21
1.4.1	<i>Objetivos específicos</i>	21
1.5	PROPUESTA METODOLÓGICA	22
2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:.....	24
2.1	PLAN DE INVESTIGACIÓN	24
2.2	PROCESO DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN.....	25
2.3	DATOS	26
2.1	RESULTADOS	37
2.2	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN.....	46
3	CONCLUSIONES GENERALES	49
4	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA	53

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SUMINISTRO BÁSICO TÍPICO ANUAL FUNDICIÓN DE ACERO	29
TABLA 2. EMISIONES TÍPICAS DE FUNDICIÓN DE ACERO	29
TABLA 4. PARÁMETROS DE INTERÉS PARA LAS DISTINTAS OPCIONES DE COMBUSTIBLES CONSULTADAS.	33
TABLA 3. LÍMITES Y NORMA DE CALIDAD DE GAS NATURAL.....	34
TABLA 5. DATOS DE REFERENCIA HIDRÓGENO, GAS NATURAL Y BIOMETANO	35
TABLA 6. COMPOSICIÓN GAS Y PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN DE GAS NATURAL Y BIOMETANO	36
TABLA 7. DATOS DE REFERENCIA HIDRÓGENO, GAS NATURAL Y BIOMETANO	36
TABLA 8. RESULTADOS DE MEZCLA DE BIOMETANO96/GAS NATURAL(GN)	37
TABLA 9. RESULTADOS DE MEZCLA DE HIDRÓGENO/GAS NATURAL(GN).....	39
TABLA 10. RESULTADOS ENERGÍA Y EMISIONES DE MEZCLA DE GASES BIOMETANO 96/GAS NATURAL.....	40
TABLA 11. RESULTADOS ENERGÍA Y EMISIONES DE MEZCLA DE GASES H2V/GAS NATURAL	42
TABLA 12. COMPARATIVO TÉCNICO.....	43
TABLA 13. COMPARATIVO IMPACTO AMBIENTAL.....	43
TABLA 14. COMPARATIVO ECONÓMICO	44
TABLA 15. VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES DE COMBUSTIBLES ESTUDIADOS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESO PRODUCTIVO FUNDICIÓN DE ACERO	10
FIGURA 2. ESQUEMA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	22
FIGURA 3. HORNO TRATAMIENTOS TÉRMICOS	27
FIGURA 4. HORNO SECADO DE ALMAS.....	28
FIGURA 5. RECUPERADOR TÉRMICO DE ARENA	28
FIGURA 6. EMISIONES DE CARBONO ALCANCE 1 Y 2	30
FIGURA 7. RESULTADO ÍNDICE DE WOBBE INFERIOR; MEZCLA GAS NATURAL Y BIOMETANO96.....	38
FIGURA 8. RESULTADO ÍNDICE DE WOBBE INFERIOR; MEZCLA HIDRÓGENO Y GAS NATURAL (GN).....	39
FIGURA 9. EMISIONES DE CARBONO A DISTINTA PROPORCIÓN DE MEZCLA DE BIOMETANO96.....	41
FIGURA 10. EMISIONES DE CARBONO A DISTINTA PROPORCIÓN DE MEZCLA DE HIDRÓGENO VERDE.....	42

1 INTRODUCCIÓN

El concepto de innovación y transición sustentable ha ganado atención en los últimos años, pues los reportes del IPCC han sido categóricos en alertar sobre el incremento de la temperatura en 1,5 °C y sus implicancias en la vida en la tierra. El cambio climático ha provocado daños sustanciales y pérdidas irreversibles en ecosistemas terrestres, acuáticos continentales y marinos. La gravedad de los efectos del cambio climático ha llevado a catalogarlo como una crisis climática. Esto ha empujado a algunos países de Latinoamérica a adoptar compromisos más ambiciosos, como Chile, Colombia y Costa Rica, están entre las únicas seis naciones en el mundo con metas claras para lograr una reducción de sus emisiones que permita lograr la carbono neutralidad al 2050 (CAT net zero target evaluations, 2022). Asimismo, tras la cumbre del cambio climático de las Naciones Unidas y la COP25, 73 países se comprometieron a presentar contribuciones nacionales más ambiciosas. En la Cumbre del Clima (COP28), realizada en Dubái, Emiratos Árabes Unidos, en el año 2023, la decisión final del Balance Mundial insta a los países a emprender una transición alejada de los combustibles fósiles.

En los países de la OCDE, el 36 % de la demanda de energía es usada en la industria manufacturera de productos consumidos por la sociedad (OECD, 2023). Gran parte de esa energía está dedicada a la producción de materiales básicos usados en los productos. En el caso del acero, a principios de mayo 2022, Atlantic Council Global Energy Center publicó un trabajo de investigación de Kelsey Forren y Maia Sparkman, en el que afirman que, si bien a escala global la industria pesada emitía 40 por ciento de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, el sector acerero participaba con 8 por ciento.

Dado que el acero es base de nuestra sociedad, con aplicaciones desde la minería hasta el sector de construcción, transporte o telecomunicaciones, pero también es una de las mayores amenazas para el futuro del planeta, contribuyendo con un

porcentaje importante de las emisiones globales de carbono pues es una de las mayores fuentes de emisiones del grupo de las grandes industrias manufactureras (Reportacero, 2022). Más aún, gran parte del metal que se usa cada año se extrae desde la corteza terrestre, lo que continuará durante las próximas décadas. Igualmente, la fabricación del acero será difícil de reducir. En efecto, la producción mundial de acero casi se ha triplicado en los últimos 50 años con casi 2 mil millones de toneladas producidas en 2021 (World Steel Association 2022). Como el principal material estructural, la demanda de acero seguirá creciendo, junto a la demanda total de energía y las emisiones de CO₂. Por lo tanto, se necesitarán recortes sustanciales en la demanda de energía y las emisiones de CO₂ para 2030 para encaminarse hacia el Escenario de Emisiones “Cero netos” para el 2050. Según el informe de seguimiento (AIE, 2021), marca a la industria del acero mundial como “Not on track” para cumplir con las reducciones de emisiones del Acuerdo Climático de París para evitar un calentamiento global.

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como parte de la mitigación al cambio climático se centra en la eficiencia energética. Este enfoque es crucial dado el aumento del consumo provocado por los efectos del cambio climático y el crecimiento de la población, lo que conlleva a una mayor demanda de energía. Para abordar este desafío, resulta imperativo mejorar la eficiencia en el consumo de energía. Aunque Chile destaque en la región con su compromiso de reducir emisiones contaminantes a través de planes de descarbonización, la realidad en la industria nacional revela una falta de atención a la energía no eléctrica. Esta carencia se observa especialmente en procesos térmicos de la industria y maquinarias, así como en actividades como el movimiento de tierra y el transporte pesado, que normalmente dependen de combustibles fósiles como el Diesel, gas natural o gas licuado de petróleo, generando emisiones de efecto invernadero.

Al analizar la operación específica de una empresa de fundición de acero, se evidencia cómo esta forma parte de la problemática mencionada anteriormente. La cadena de producción inicia con la recepción de chatarra de acero, la cual se descarga y almacena en la planta. El proceso de fundición se inicia con la preparación de la chatarra de acero, que luego pasa por etapas secuenciales en hornos de arco eléctrico (EAF) y horno de refinamiento (AOD) para fundir y refinar el acero. Una vez fundido, el acero se vierte en moldes de arena y se enfría para obtener las piezas requeridas. Las fases posteriores, como el desmoldeo, granallado, tratamiento térmico y terminación, también forman parte del proceso. Este análisis revela la conexión entre la eficiencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores industriales específicos, como la fundición de acero, subrayando la necesidad de estrategias de descarbonización más integrales.

En la Figura 1 se detalla el flujo del proceso productivo de la fundición de acero en estudio:

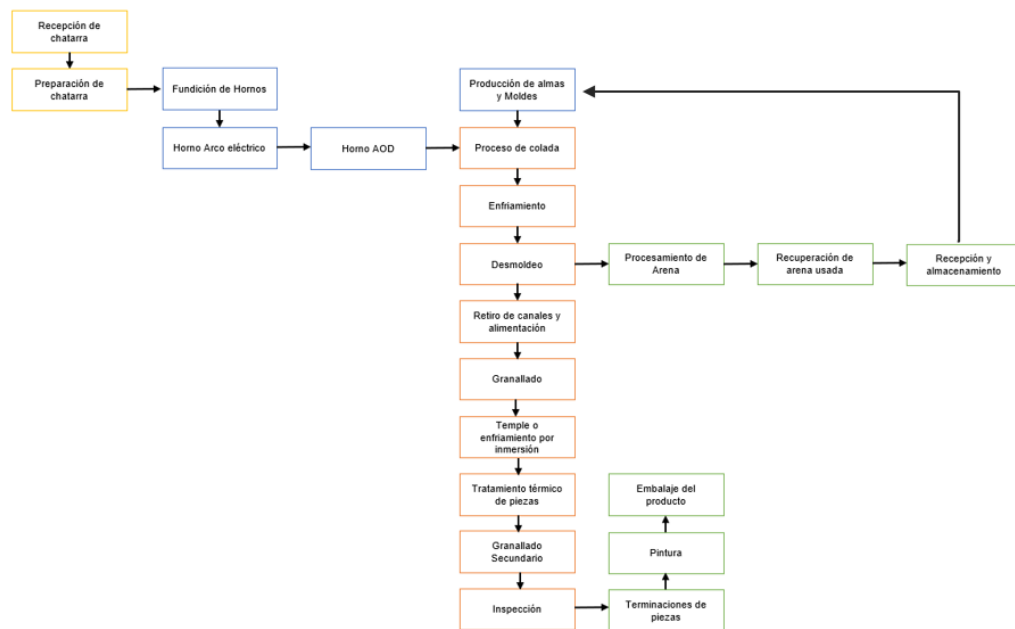


Figura 1. Proceso productivo fundición de acero
Fuente: Elaboración propia.

Los procesos industriales que incorporan la combustión de gas natural en la fundición de acero comprenden diversas aplicaciones, destacándose entre ellas los hornos de tratamientos térmicos, la recuperación térmica de arena y el secado de almas de arena. En estos procesos, la selección del gas natural como fuente de energía se basa en su eficiencia intrínseca y su habilidad para atender de manera efectiva las demandas particulares de cada aplicación.

1.1 Desafío de la transición energética en sector manufacturero metalmecánico inserto en una economía compleja con infraestructura, reglas e incentivos desactualizados para lograr cumplir compromisos de descarbonización total en mercados dinámicos.

En este contexto, el presente trabajo busca analizar las alternativas de transición energética para procesos que usan gas natural como combustible en una fundición de acero ubicada en la Región Metropolitana de Santiago de Chile. Así, una de las preguntas de investigación es ¿Cómo descarbonizar los procesos térmicos en la industria del acero nacional, donde la innovación tecnológica baja en carbono y políticas regulatorias de Chile para estas aplicaciones están atrasada conforme a metas para cero emisiones de CO₂eq?

Una de las principales brechas en Chile, a pesar de su potencial, es la falta de políticas, regulaciones e incentivos para el recambio de estas fuentes de energía térmicas para industrias manufactureras y/o maquinarias. Esta falta de apoyo dificulta el acceso a la innovación y el uso de energías renovables de emisión cero. Según la percepción empresarial, existen barreras financieras, de conocimiento, de cooperación, de mercado, de demanda y regulaciones que deben superarse para fomentar la innovación en Chile (Ortiz, R., & Fernandez, V., 2022).

Chile es actualmente uno de los países miembro de la OCDE que menos invierte en Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Entre otros avances, el país podría, si invirtiera más, desarrollar nuevas tecnologías y procesos de transformación energética más efectivos. Pero esto requiere acciones que transformen la sociedad y la economía (Objetivos y metas de desarrollo sostenible, 2023)

1.2 Breve discusión de la literatura

Para descarbonizar la industria, se debe descarbonizar la energía térmica, considerando que la emisión de carbono de esa área representa un 20% de las emisiones globales de CO₂ en el mundo. Sin embargo, las tecnologías existentes aún no son competitivas en comparación a la generación de calor en base a combustibles fósiles (Thiel & Stark, 2021).

En la búsqueda de fuentes energéticas que reemplacen a los combustibles fósiles, el hidrógeno se perfila como una opción importante, considerando el hidrógeno verde como un componente clave para avanzar hacia el carbono neutralidad del país. El 2020, la consultora global McKinsey&Company en su reporte “Chilean hydrogen pathway”, indicó que Chile podría producir el hidrógeno verde a muy bajo precio, siendo altamente competitivo a nivel mundial y se alinea con los compromisos de Chile para la mitigación contra el cambio climático.

El 2021, Osman et al, realizaron una evaluación a los impactos ambientales debido a la producción de hidrógeno, analizando 24 estudios de evaluación del ciclo de vida (ACV) publicados entre 2019 y 2021. Los enfoques metodológicos importantes y hallazgos claves observados son:

- 1) No se identificaron dos estudios de evaluación del ciclo de vida que fueran similares. Por lo tanto, se recomienda que los formuladores de políticas presten atención a los procesos modelados y al alcance del límite del sistema para tomar decisiones para crear una economía de hidrógeno sostenible.
- 2) Los ciclos de vida evaluados no abarcan todos los procesos, entradas y salidas, para el análisis 'de la cuna a la tumba'. Por lo tanto, las investigaciones futuras deberían prestar más atención a la evaluación "de la cuna a la tumba" y se deben evaluar los impactos ambientales en más categorías para los procesos de producción de hidrógeno, para una toma de decisiones sólida.

- 3) El almacenamiento de energía a gran escala es clave para asegurar la cadena de suministro de energía para la próxima transición energética utilizando hidrógeno generado por electrólisis.

Considerando las iniciativas del Chile para impulsar el desarrollo del mercado en torno al hidrógeno, es importante destacar que, en términos de energía, el poder calorífico inferior para el hidrógeno es 2580 Kcal/Nm³ contra 8500 kcal/Nm³ del gas natural, es decir, para lograr la misma energía, se requiere del orden de 3 veces más que el caudal necesario con gas natural. También, la temperatura de llama es 170°C superior al del gas natural, genera mayores emisiones de NOx que un quemador de gas natural, es corrosivo, tiene mayor invisibilidad de llama y mayor probabilidad de fugas (E&M Combustion,2021),

Los problemas del uso del hidrógeno no se limitan a los asuntos de su producción, almacenamiento y transporte (Alexander et al., 2021). El hidrógeno y los combustibles fósiles, como el gas natural, son gases combustibles dispares en cuanto a sus principales indicadores. El poder calorífico y la densidad, el consumo de aire, la velocidad de la llama y los límites de inflamabilidad: todas estas características más importantes difieren (Staskevich et al., 1990). Por lo tanto, se requiere el reemplazo completo de los quemadores de gas en lugar de su adaptación. Sin embargo, es imposible el recambio de una sola vez para millones de dispositivos asociados a la combustión. En esta condición, la idea de utilizar hidrógeno en mezclas con gas natural parece más razonable (Comisión Europea, 2020). No se trata de cero emisiones de CO₂, pero cada 10% de hidrógeno en tal mezcla permite reducir proporcionalmente las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera (Szkawski, 2020).

El Gobierno de Chile está implementando medidas para promover el hidrógeno verde (H2V) y fomentar su desarrollo en el país. Una de las iniciativas clave ha sido

la presentación de un proyecto de ley que busca impulsar la producción y uso del hidrógeno verde. El objetivo de esta propuesta es establecer un mercado nacional de hidrógeno verde mediante la mezcla de hidrógeno en las redes de gas natural y permitir que la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) participe en su desarrollo. Según el proyecto, a partir de enero de 2030, las concesionarias de distribución de gas en Chile estarían obligadas a distribuir anualmente un porcentaje específico de hidrógeno verde en relación con el volumen total de gas distribuido. Esto demuestra la intención del gobierno de incentivar la demanda de hidrógeno verde y promover su adopción en el sector energético. Se visualiza ciertas condiciones establecidas en el Proyecto de Ley de Inyección de Gases Sustentables (Boletín N° 14756-08 el día 19-12-2021), en el que se exige al 2030, inyección de hidrogeno verde hasta un 50%.

En este contexto, el gobierno actual lanzó este proyecto de ley para alcanzar algunas de las metas establecidas en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, publicada por el Ministerio de Energía en noviembre de 2020. Dicha estrategia establece tres puntos fundamentales: (i) posicionar a Chile como el principal destino de inversión en hidrógeno verde en Latinoamérica, con una inversión comprometida de 5 mil millones de dólares y una capacidad de electrólisis en desarrollo de 5 GW para 2025; (ii) producir el hidrógeno verde más económico del planeta para 2030, por debajo de los 1,5 dólares por kilogramo de hidrógeno; y (iii) exportar hidrógeno verde y sus derivados por un valor de 2,5 mil millones de dólares al año para 2030 y convertirse en uno de los tres principales exportadores para 2040 (Gubinelli, 2021).

Estos tres objetivos reflejan el compromiso del Gobierno de Chile de liderar en el campo del hidrógeno verde, promoviendo la inversión, la competitividad y el desarrollo sostenible. Además, se espera que el cumplimiento de estas metas impulse la economía del país, genere empleo y fortalezca la industria del hidrógeno verde en Chile.

El cambio tecnológico sustancial necesario para la transformación del modelo energético a corto plazo plantea un desafío crucial. Con este propósito, el Ministerio de Energía de Chile, la Agencia Sostenibilidad Energética y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH encargaron un informe exhaustivo que refleja la oferta actual en los mercados de América, Europa y Asia, con el objetivo de construir una base de datos completa. Esta información fue utilizada para elaborar un listado de proveedores de quemadores de hidrógeno. La investigación realizada revela un gran interés por parte de distintos proveedores en el proceso de transformación energética que está experimentando Chile, reconocido por su vasto potencial en energías renovables. Aunque el mercado chileno aún se considera pequeño en comparación con otras regiones, se ha observado que algunas empresas están dispuestas a examinar detenidamente los antecedentes en caso de que surja un proyecto concreto. Sin embargo, es importante destacar que aún no se han establecido las condiciones necesarias para la viabilidad normativa de dicho proyecto (ARCA SPA, 2022).

Las pruebas citadas anteriormente han llevado a apreciar que la alternativa estratégica del uso de hidrógeno planteada por parte del Gobierno de Chile, no está viabilizada técnicamente para el uso industrial en procesos térmicos, como el caso en revisión. Los estudios más recientes en este ámbito apoyan el uso de hidrógeno mezclado con gas natural, como alternativa de transición paulatina hacia cero emisiones, indicando un límite óptimo para su uso del 10 % hidrógeno en la mezcla, proporción que no afectaría los procesos y dispositivos de combustión existentes, esperando desarrollar la tecnología necesaria para el uso de combustible libres de emisiones de carbono (Alexander, S., Anatolii, K., & Vitalii, 2021). De todas maneras, no está exento de problemas, incompatibilidad con los dispositivos existentes, las altas emisiones de gases contaminantes como el NOx y la baja capacidad de transferencia de calor por radiación, lo que según nuestra propia experiencia es un tema clave para el proceso tratamientos térmicos.

Por otra parte, el uso del amoníaco en el proceso de combustión establece una ventaja por sobre el hidrógeno para este fin, debido a que es una actividad que se ha desarrollado por cerca de 100 años, y también es una alternativa de combustible en temas de generación, almacenamiento y distribución en condiciones más amigables (Kobayashi et al., 2019). Además, el amoníaco contiene hidrógeno, y puede ser producido con energías renovables y ser una alternativa para lograr cero emisiones. No obstante, el amoníaco tiene algunos desafíos que resolver, como la baja inflamabilidad, mayores emisiones de NO_x y falta de conocimiento en el uso para la combustión.

En relación uso de biometano como sustituto del gas natural, es un tema ampliamente estudiado en los últimos años, se han realizado varios estudios con el objetivo de analizar las políticas de combustible para promover el desarrollo del biometano. El 2023, Carvalho et al, estudiaron la sustitución del gas natural por biometano en equipos industriales, indicando que existen tecnologías de tratamiento del biogás comercialmente desarrolladas y disponibles que pueden producir biometano con un contenido molar de metano superior al 97%. Por lo tanto, el biometano puede contribuir significativamente a estabilizar el suministro energético y compensar las fluctuaciones de la calidad del gas. En el estudio se identifican tres problemas relevantes: (a) todavía existen preocupaciones sobre la calidad y disponibilidad del biometano a gran escala; (b) la mayoría de los gobiernos aún necesitan mejorar las políticas que estimulen el uso de biometano para cumplir con los acuerdos internacionales sobre emisiones de gases de efecto invernadero; y (c) existe incertidumbre relacionada con los beneficios económicos del uso de biometano debido a posibles ceses de incentivos gubernamentales.

Aunque los trabajos citados anteriormente aportan pruebas convincentes de que el hidrógeno y amoníaco verde son las opciones de combustible para lograr cero emisiones de CO₂eq, bajo el contexto de uso de energías renovables para su

producción, es importante destacar que, de momento no se visualiza como una alternativa recomendable, específicamente en procesos con combustión, considerando que, por ejemplo, para el caso de hidrógeno, la incompatibilidad de las instalaciones existentes, la baja radiación de la llama y escasa disponibilidad de tecnología compatible con el uso de este combustible, temas de seguridad no resuelto, impiden la implementación al corto plazo.

El artículo "Business Perception of Obstacles to Innovate: Evidence from Chile with Pseudo-Panel Data Analysis", identifica diversos obstáculos que enfrentan las empresas chilenas para innovar y promover la investigación y desarrollo (I+D). Estos obstáculos tienen un impacto significativo en la capacidad de las empresas para generar innovación y mantenerse competitivas en un entorno empresarial cada vez más dinámico.

Uno de los principales obstáculos es la falta de recursos financieros. Las empresas chilenas encuentran dificultades para acceder a financiamiento y para destinar recursos a actividades de I+D. La falta de inversión en investigación y desarrollo limita su capacidad para introducir nuevos productos, procesos o servicios innovadores. Esta falta de recursos puede deberse a la falta de acceso a fuentes de financiamiento adecuadas, tanto internas como externas, así como a los altos costos asociados con la innovación.

Otro obstáculo importante es la limitación en términos de conocimientos técnicos y recursos humanos especializados. Las empresas necesitan personal capacitado y especializado en áreas relacionadas con la innovación para llevar a cabo actividades de I+D. Sin embargo, muchas empresas enfrentan dificultades para encontrar y retener talento con las habilidades y conocimientos necesarios. Esta falta de recursos humanos especializados puede dificultar la implementación de proyectos de innovación y limitar el desarrollo de nuevas ideas.

Además, la falta de demanda de productos y servicios innovadores también se destaca como un obstáculo significativo. Si no hay una demanda clara en el mercado para productos y servicios innovadores, las empresas pueden experimentar una falta de incentivos para invertir en actividades de innovación. La falta de demanda puede resultar en una baja rentabilidad de los esfuerzos de innovación y desincentivar a las empresas a destinar recursos a estas actividades.

Las barreras regulatorias también se presentan como un obstáculo para la innovación empresarial. Las regulaciones y normativas pueden ser complejas y costosas de cumplir, especialmente para las empresas más pequeñas. Los requisitos regulatorios rigurosos y los altos costos asociados pueden dificultar la introducción de innovaciones y desalentar a las empresas a embarcarse en proyectos de investigación y desarrollo.

La cultura empresarial también desempeña un papel importante en los obstáculos a la innovación. Si una empresa no valora la innovación y la creatividad en su toma de decisiones y estrategia empresarial, es probable que se enfrenten barreras internas para impulsar la innovación. La falta de una cultura de innovación puede limitar la disposición de las empresas para experimentar con nuevas ideas, tomar riesgos y adaptarse a los cambios del entorno empresarial.

Es importante destacar que estos obstáculos pueden variar dependiendo del sector empresarial y del tamaño de la empresa. Algunos sectores pueden enfrentar desafíos particulares en términos de regulaciones específicas, demanda de mercado o disponibilidad de recursos financieros. Del mismo modo, las empresas más pequeñas pueden experimentar dificultades adicionales debido a sus limitaciones de recursos y capacidad.

1.3 Contribución del trabajo

Los combustibles fósiles, son una alternativa nociva para el calentamiento global y el cambio climático. Pero la tecnología de reemplazo para la transición a energía renovable en procesos que usan energía no eléctrica no está resuelta, por ejemplo, la opción de hidrógeno verde, como alternativa, a corto plazo, no está disponible para todas las aplicaciones. La innovación para la transición a tecnología de hidrógeno en Chile está atrasada, junto a la recesión mundial, el recambio a este tipo de energía, probablemente no se logrará en plazo, como medida de mitigación para la descarbonización.

Por lo anterior, el presente trabajo busca plantear un camino hacia la transición energética no eléctrica, con un análisis que permitirá contar con un acercamiento práctico hacia el uso de las mejores opciones tecnológicas disponibles o en desarrollo, buscando reutilizar instalaciones existentes de procesos con combustión de la industria del acero, conforme a los avances en el mercado industrial y los procesos de I+D+i, para lograr reemplazo de los combustibles fósiles en procesos con combustión.

1.4 Objetivo general

Analizar las alternativas de transición energética con el fin de reducir las emisiones de efecto invernadero y promover la adopción de fuentes de energía más limpia, para procesos con combustión que usan gas natural como combustible en una fundición de acero en la Región Metropolitana de Chile.

1.4.1 Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual de la fundición de acero en la Región Metropolitana de Chile en términos de uso de gas natural, emisiones de CO₂eq y disponibilidad de fuentes de energía renovable.
- Analizar las opciones tecnológicas disponibles para reemplazar el gas natural en los procesos con combustión.
- Evaluar los impactos técnicos, económicos y ambientales de cada opción tecnológica.

1.5 Propuesta metodológica

La metodología se divide en varias etapas para abordar de manera integral el estudio de las alternativas de transición energética en la industria del acero en la Región Metropolitana, ver Figura 2 .



Figura 2. Esquema metodología de investigación
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe la estructura de la propuesta:

- 1) Paradigma y diseño:** La investigación adoptó un enfoque cuantitativo. Su objetivo principal fue explorar las alternativas de transición energética en una fundición de acero con procesos con combustión, ubicada en la Región Metropolitana de Chile, lo que permitió un análisis de sus características y particularidades.
- 2) Recolección de datos:** Se recopiló información dentro de la fundición con el objetivo de obtener datos pertinentes sobre el uso de combustibles, las emisiones de gases de efecto invernadero y otras variables relacionadas con las alternativas de transición energética en el mercado nacional. Para ello, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la documentación disponible, como informes técnicos, registros de consumo de combustibles y otras fuentes de datos secundarios relevantes para el estudio.
- 3) Análisis de datos:** Se emplearon técnicas descriptivas para analizar los datos secundarios recopilados, como uso de gráficos y tablas para evaluar el consumo de combustibles, las emisiones de gases de efecto invernadero y otras variables relacionadas a la investigación.
- 4) Conclusiones y recomendaciones:** Los resultados de la investigación cuantitativa fueron integrados para obtener conclusiones y recomendaciones sobre la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles en los procesos con combustión de la fundición de acero en la Región Metropolitana.

2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:

2.1 Plan de investigación

- **Estudio exploratorio:**

- Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la transición energética en la industria del acero, enfocándose en los procesos con combustión y las alternativas de recambio tecnológico.
- Identificar fuentes de información relevantes, como informes técnicos, estudios de casos y regulaciones vigentes en Chile relacionadas con la temática.

- **Recopilación de datos:**

Se emplearon diversas estrategias de recopilación de datos. Se revisaron informes y estudios previos para obtener información relevante. Además, se utilizaron fuentes de datos públicos, como estadísticas y reportes del gobierno. Se obtuvieron datos específicos sobre las emisiones de CO₂eq generadas en procesos con combustión, la disponibilidad de suministro de nuevos combustibles, así como datos económicos relacionados con los costos de implementación y operación de las alternativas tecnológicas consideradas.

- **Análisis:**

El análisis se centró en evaluar y comparar las opciones tecnológicas disponibles, que incluyen el hidrógeno verde, el amoníaco verde y otras alternativas como el biogás y biometano.

- Análisis técnico: se evaluó la viabilidad técnica de cada opción tecnológica para su implementación en la fundición de acero. Se consideraron aspectos de infraestructura, compatibilidad con los procesos existentes en la fundición, la disponibilidad y confiabilidad de suministro, así como la capacidad de integración equipos presentes en la instalación.
- Análisis económico: se realizó un análisis de costos para cada opción tecnológica, teniendo en cuenta los costos de inversión y los costos operativos. Se compararon los costos de cada alternativa y se evaluó su viabilidad económica.
- Análisis ambiental: Se evaluaron los impactos ambientales de cada opción tecnológica, considerando las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2 Proceso de recogida de información

A lo largo del proceso de recogida de información, se utilizaron múltiples fuentes y referencias para abordar distintos aspectos de las tecnologías energéticas, centrándose especialmente en el contexto nacional chileno. La investigación involucró la revisión de informes técnicos, publicaciones de instituciones gubernamentales y organizaciones internacionales, así como también artículos y páginas web de creadores de contenido científicos, con análisis especializados sobre

el uso del gas natural, biometano e hidrógeno, tanto en su forma pura como en blending.

Las fuentes consultadas proporcionaron datos relevantes sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, las implicaciones técnicas de integrar diferentes tecnologías en la infraestructura energética existente y los desafíos económicos asociados a la adopción de nuevas formas de energía en el mercado chileno. Además, se consideraron estudios específicos que detallan los límites y ventajas del blending de hidrógeno en el gas natural, particularmente en relación con la reducción de emisiones de CO₂ y las implicaciones en los sistemas de quemadores industriales.

2.3 Datos

- **Empresa de fundición de acero en estudio**

- **Procesos con combustión:**

Los procesos que involucran combustión emplean quemadores atmosféricos alimentados con gas natural, tal como se muestra en la Figura 3.

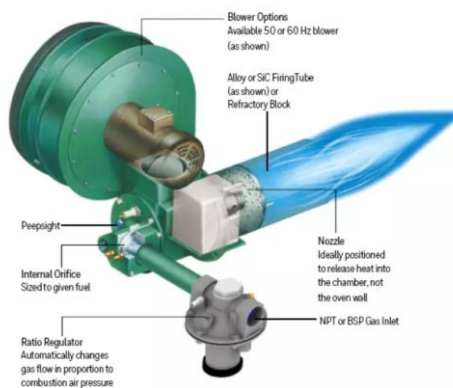


Figura 3. Quemador atmosférico

Fuente: marshallwnelson.com/product/ratiomatic-burner/

El gas natural es reconocido por sus propiedades caloríficas, se convierte en un recurso energético ideal para llevar a cabo procesos de tratamientos térmicos, recuperación térmica de arena y secar almas de arena. Para esto existe versatilidad de los quemadores gaseosos contribuye significativamente a su amplia adopción en diversos sectores industriales. Además de su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de combustión (completa, incompleta, mixta), los quemadores gaseosos ofrecen flexibilidad en términos de control, permitiendo ajustes manuales y automáticos. Sus ventajas inherentes, como una alta eficiencia en el uso del aire y una reducción significativa de emisiones contaminantes en comparación con combustibles como carbón o petróleo, consolidan su posición como una opción valiosa en la generación de calor mediante la combustión de gases.

Los procesos de mayor consumo en la fundición de acero, utilizan quemadores del tipo atmosféricos, y se describen a continuación:

➤ Hornos de tratamientos térmicos:

El horno contempla una cámara de combustión independiente de la cámara principal de tratamiento de piezas metálicas. En esta cámara, se generan gases de combustión diluidos en aire con el fin de proporcionar una temperatura controlada en la cámara de tratamiento, ver Figura 4.

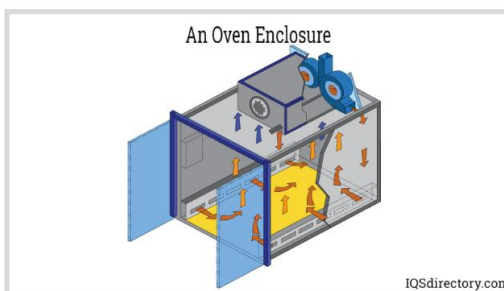


Figura 4. Horno tratamientos térmicos
Fuente: IQSDirectory.com

➤ Secado de almas:

El horno de secado de almas es un proceso continuo que opera mediante el empleo de un sistema de transporte motorizado, específicamente un transportador, diseñado para exponer las piezas de arena a la acción de secado de la pintura a un ritmo predefinido, ver Figura 5.

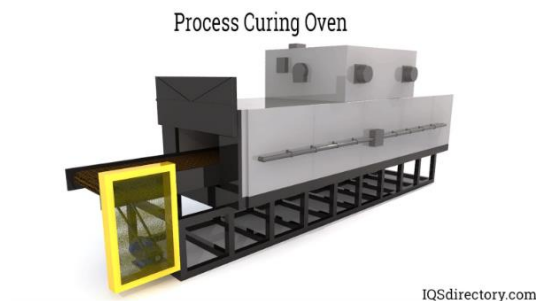


Figura 5. Horno secado de almas
Fuente: IQSDirectory.com

➤ Recuperador térmico de arena

Este equipo, conocido como lecho fluidizado burbujeante, se utiliza para secar arena con un contenido de humedad que generalmente oscila entre el 8% y el 10%. El proceso de secado se lleva a cabo mediante una corriente de productos de combustión caliente, ver Figura 6.

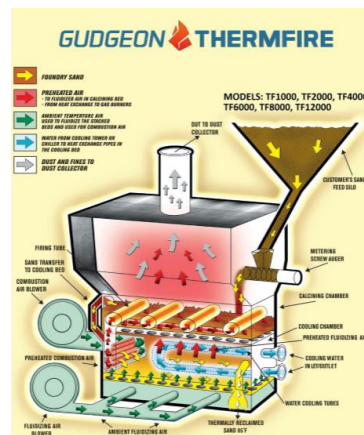


Figura 6. Recuperador térmico de arena
Fuente: Gudgeonthermfire.ca

El consumo promedio anual típico de suministros de energías son los indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Suministro básico típico anual fundición de acero

Suministros	Cantidad total	Unidades
Gas natural	2.236.132	m3
Electricidad	15.072.426	kWh
Diésel	93.350	litros

Fuente: Elaboración propia

➤ Emisiones de carbono:

Con el objetivo de cumplir con los requisitos de cuantificación del carbono establecidos por la fundición de acero, nos propusimos medir los alcances 1 y 2, siguiendo las directrices del estándar GHG Protocol y utilizando DEFRA 2020 como la base de datos para los factores de emisión. Los resultados de esta medición revelaron un total de 10,539 toneladas de CO₂eq anuales, como se detalla en la Tabla 2. Estas emisiones se distribuyen en un 45% para el alcance 1 y un 55% para el alcance 2. Estos porcentajes se presentan visualmente en la Figura 7.

Tabla 2. Emisiones típicas de Fundición de Acero

Emisiones	CO ₂ [kg/co2eq]	CH ₄ [kg/co2eq]	NO ₂ [kg/co2eq]	TOTAL CO ₂ EQ [kg/co2eq]
Alcance 1	4.748.858,025	6.083,255	5.665,512	4.760.606,793
Gas natural	4.514.482,313	6.059,918	2.392,661	4.522.934,893
Electricidad	0,000	0,000	0,000	0,000
Diésel	234.375,712	23,338	3.272,851	237.671,901
Alcance 2	5.778.768,128	0,000	0,000	5.778.768,128
Gas natural	0,000	0,000	0,000	0,000
Electricidad	5.778.768,128	0,000	0,000	5.778.768,128
Diésel	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	10.527.626,154	6.083,255	5.665,512	10.539.374,922

Fuente: Elaboración propia

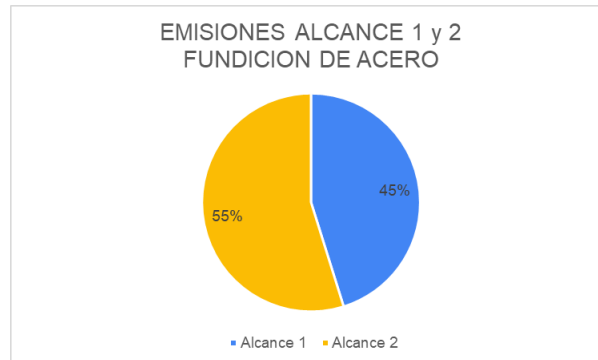


Figura 7. Emisiones de carbono alcance 1 y 2
Fuente: Elaboración propia datos fundición de Acero

- Disposición para invertir en tecnologías que reduzcan las emisiones de carbono:

La empresa está más centrada en los costos productivos actuales por tonelada que en la inversión para reducir emisiones, considerando que medidas como compra de IREC, llevan al cumplimiento de la reducción de emisiones en termino de consumo eléctrico a nivel corporativo. Además, carecen de conocimiento sobre los costos de abastecimiento de combustibles sustentables alternativos y su disponibilidad, lo que limita su disposición para realizar inversiones en esta área.

- Preparación para adoptar alternativas más limpias, como el hidrógeno puro:

No se ha abordado este tema en la estrategia. La empresa no ha evaluado ni considerado alternativas más limpias, como el hidrógeno puro, lo que indica una falta de exploración o interés en adoptar nuevas tecnologías más sostenibles.

- **Empresa suministro gas natural en la Región Metropolitana**

- Impacto de la ley de gases sustentables en el suministro de energía y medidas específicas para cumplir:

Actualmente, se está llevando a cabo la inyección de biometano en las redes existentes; sin embargo, los clientes carecen de información relevante sobre los factores de emisión asociados a esta combinación con gas sostenible. A pesar de las acciones tomadas en concordancia con las regulaciones establecidas, persiste la falta de divulgación hacia los consumidores acerca de la huella de carbono del suministro. Esto incluye la proyección de potenciales beneficios fiscales que la legislación contempla, así como la garantía de la soberanía energética, lo que podría contribuir a estabilizar los precios en consonancia con las fluctuaciones del Brent y el tipo de cambio del dólar. Esta carencia limita la transparencia y la comunicación en relación a la reducción de costos y emisiones asociadas al uso de estas mezclas en el suministro energético

- Estrategias de empresa de gas natural para asegurar un suministro sostenible de energía:

La empresa de suministro de gas natural tiene un enfoque en la diversificación de fuentes de energía, como el biometano y el hidrógeno, para enfrentar desafíos de descarbonización. Sin embargo, ven limitaciones en el uso del hidrógeno debido a su limitada red y costos. Destacan la importancia de mantener la competitividad, la inversión y la seguridad energética en la evolución hacia soluciones más sostenibles.

➤ Certificación de reducción de huella ambiental:

La empresa de gas, no ha considerado implementar algún tipo de certificación que permita a sus clientes demostrar la reducción de huella de carbono al usar su gas natural en la región metropolitana. Tampoco han presentado un modelo similar a los certificados IREC del mercado eléctrico.

➤ Datos técnicos relevantes para la evaluación de combustibles

En la década de 1930, la preocupación sobre la adaptabilidad de distintos gases surgió a nivel mundial con la creciente sustitución del gas natural por otros derivados del carbón y petróleo. Los quemadores modernos son altamente sensibles a la composición del gas, lo que ha llevado a diseñarlos para funcionar con un tipo específico. La evaluación de la intercambiabilidad de combustibles se realiza a través del índice de Wobbe (IW), que relaciona el poder calorífico superior con la densidad relativa del combustible. Este índice es esencial para comparar la energía de diferentes combustibles, asumiendo que pueden ser intercambiados sin ajustes en el equipo de combustión si tienen índices de Wobbe similares.

El estudio se centró en determinar la viabilidad de intercambiar distintos combustibles y mezclas, asegurando que cumplan con los requisitos energéticos del gas natural y las normativas chilenas. El Índice de Wobbe y el Poder Calorífico Superior (PCS) son cruciales en los procesos de combustión, siendo el primero esencial para minimizar el impacto de fluctuaciones en el suministro de gas, contribuyendo así a optimizar la eficiencia de los sistemas de combustión existentes.

En la Tabla 3 se presentan resumen de los parámetros de interés para las distintas opciones de combustibles consultadas.

Tabla 3. Parámetros de interés para las distintas opciones de combustibles consultadas

Combustibles	Índice Wobbe sup (MJ/Nm3)	PCS [MJ/m3]	Referencias
Gas natural	51,73	40,2	Carvalho et al (2023). Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial
Biogás	23,7	22,68	Emerson. (2023). Application Note: Biomethane Analysis Using Gas Chromatographs.
Biometano (97,2% CH4)	48,3	36,6	Emerson. (2023). Application Note: Biomethane Analysis Using Gas Chromatographs.
Hidrógeno (100%)	45,9	12,1	Elorduy, A. P. (2023). Índice Wobbe - Variación en la mezcla de Hidrógeno- Gas Natural Energy Analysis.
Amoniaco	18,4	14,6	Fuster Justiniano, J. et al. (Eds.). (2022). Industria del Amoniaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización.
Blend gas natural - hidrógeno (6% H2/94%CH4)	49,5	-	Elorduy, A. P. (2023). ¿Hasta qué % de blending de hidrógeno es admisible en los quemadores industriales de gas natural? Energy Analysis.
Blend gas natural - hidrógeno (25% H2/75%CH4)	47,2	-	Elorduy, A. P. (2023). ¿Hasta qué % de blending de hidrógeno es admisible en los quemadores industriales de gas natural? Energy Analysis.
Blend gas natural - Biometano (69,8%)	46,37	-	Carvalho et al (2023). Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial

Fuente: Elaboración propia

Es fundamental asegurar el cumplimiento de los límites técnicos, establecidos entre 47,3 y 52,2 [MJ/m³] según las normas ISO 6976 y NCh 2264, detallados en la Tabla 4. Mantener estos parámetros dentro de los límites permitidos garantiza la compatibilidad con los sistemas de combustión existentes, eliminando la necesidad de realizar inversiones adicionales.

Tabla 4. Límites y norma de calidad de gas natural

Descripción	Índice Wobbe (MJ/m³)	PCS (MJ/m³)	Referencia
Especificaciones de Calidad Gas natural	47,3 - 52,2	37,04 - 42,7	International Organization for Standardization. (2016). ISO 6976.
Límite blend Chile	47,3 - 52,2	37,05 - 42,7	Instituto Nacional de Normalización (Chile). (2014). NCh 2264:2014 Gas natural – Especificaciones.

Fuente: Elaboración propia

El gas natural consumido en Chile, según norma EN437:2003, corresponde al Grupo H de la Segunda Familia de gas natural (45,7 MJ/m³ - 54,7 MJ/m³) un rango de índice de Wobbe acotado entre 47,3 MJ/m³ y 52,2 MJ/m³.

Fuera del marco normativo, en la industria, es común permitir una desviación máxima del +/- 5% en el Índice de Wobbe al sustituir combustibles.

Considerando los índices de Wobbe y la normativa chilena 2264/2014, se descartó evaluar numéricamente el biogás y el amoníaco, ya que no son de la misma familia de gases e incompatibles con las instalaciones existentes.

Para conseguir los datos de energía y volúmenes de cada combustible, se utilizó el método de cálculo de mezcla propuesto por Elorduy, A. P. (2023) para obtener datos de los blends de hidrógeno y biometano que no aparecen en la Tabla 4, basándonos en las fórmulas presentadas por dicho autor y utilizando como referencia los

resultados de Carvalho et al. (2023). Se estableció un blend con un contenido de biometano del 96% de CH₄, y se realizaron los cálculos correspondientes para determinar los índices de Wobbe y los poderes caloríficos en diferentes proporciones de mezcla, utilizando las siguientes fórmulas:

- Densidad:

$$\rho_{mezcla} = \rho_{C1} * \rho_{Gas\ natural}$$

- Poder calorífico:

$$PCI_{mezcla} = \%_{C1} * PCI_{C1} + \%_{Gas\ Natural} * PCI_{Gas\ Natural}$$

- Poder Superior:

$$PCS_{mezcla} = \%_{C1} * PCS_{C1} + \%_{Gas\ Natural} * PCS_{Gas\ Natural}$$

- Índice de Woobe inferior/ Superior:

$$IW_{inferior\ mezcla} = \frac{PCI_{mezcla}}{\sqrt{\frac{\rho_{mezcla}}{\rho_{aire}}}}$$

$$IW_{superior\ mezcla} = \frac{PCS_{mezcla}}{\sqrt{\frac{\rho_{mezcla}}{\rho_{aire}}}}$$

Los datos establecidos en las Tabla 5 y Tabla 6 , en condiciones estándar de 15°C y 1 atm, fueron utilizados como referencia para obtener la información faltante de energía y volúmenes:

Tabla 5. Datos de referencia Hidrógeno, Gas Natural y Biometano

Datos Referencia	Hidrogeno (H2)	Gas Natural (GN)	Biometano (96%CH4)
Densidad [kg/m3]	0,084	0,74	0,76
PCI [MJ/m3]	10,2	36,3	34,4
PCS [MJ/m3]	12,1	40,2	38,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Composición gas y parámetros de combustión de gas natural y biometano

	Russian Group H	G20 (Methane)	Biomethane 97%	Biomethane 96%	Biomethane 90%	Biomethane 85%
CH ₄ ^a	96.96	100.00	97.00	96.00	90.00	85.00
N ₂ ^a	0.86	0.00	0.58	0.78	3.00	8.00
CO ₂ ^a	0.18	0.00	2.26	3.01	6.00	6.00
C ₂ H ₆ ^a	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₃ H ₈ ^a	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-C ₄ H ₁₀ ^a	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-C ₅ H ₁₂ ^a	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-C ₆ H ₁₄ ^a	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
O ₂ ^a	0.00	0.00	0.16	0.21	0.50	1.00
H ₂ ^a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
Total ^a	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HHV ^b	40.2	39.8	38.6	38.2	35.9	33.8
LHV ^b	36.3	35.8	34.8	34.4	32.3	33.8
ρ ^c	0.74	0.72	0.75	0.76	0.81	0.84
WI ^d	53.2	53.5	50.7	49.9	45.4	41.9

^a: mol %; ^b: MJ/Nm³; ^c: kg/Nm³ (density); ^d: MJ/Nm³ (WI based on HHV).

Fuente: Carvalho et al (2023). Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial

Para el cálculo de huella de carbono, se utilizó el método según estándar GHG Protocol y a DEFRA 2020 como base de datos de los factores de emisión.

- Fórmula de factor de emisión de carbono equivalente en mezcla de combustibles:

$$Fe_{mezcla} = X\%_{C1} * Fe_{C1} + X\%_{Gas\ Natural} * Fe_{Gas\ Natural}$$

Los factores de emisión establecidos se presentan en la Tabla 7, son utilizados para el cálculo de emisiones de carbono:

Tabla 7. Datos de referencia Hidrógeno, Gas Natural y biometano

Factores de emisión [kgCO ₂ eq/MJ]	
Gas Natural	0,056
Biometano	0,03
H ₂ V	0

Fuente: Elaboración propia

2.1 Resultados

➤ Resultados de índice de Wobbe y poder calorífico; Mezcla de gases Biometano/Gas natural:

Los resultados de la Tabla 8 demuestran que las mezclas de gas natural con Biometano al 96% de CH₄, en proporciones del 76% de biometano y 24% de gas natural, cumplen con los estándares técnicos del suministro de gas natural actual. Estas mezclas se encuentran dentro del límite permitido, con una variación del índice de Wobbe (IW) del 5%, tomando como base un IW del gas natural de 51,73 [MJ/m³].

Tabla 8. Resultados de mezcla de Biometano96/Gas Natural(GN)

%Biometano (96%CH ₄)	%GN	Densidad [kg/m ³]	PCI [MJ/Sm ³]	PCS [MJ/Sm ³]	WI_Inf [MJ/Sm ³]	WI_Sup [MJ/Sm ³]	Dif%PCI	Dif%PCS	DIF%WI_Sup
0	100	0,740	36,30	40,20	46,71	51,73	0,0%	0,0%	0,0%
5	95	0,741	36,21	40,10	46,56	51,57	0,3%	0,2%	0,3%
6	94	0,741	36,19	40,08	46,53	51,54	0,3%	0,3%	0,4%
10	90	0,742	36,11	40,00	46,41	51,41	0,5%	0,5%	0,6%
15	85	0,743	36,02	39,90	46,25	51,24	0,8%	0,8%	1,0%
20	80	0,744	35,92	39,80	46,10	51,08	1,1%	1,0%	1,3%
25	75	0,745	35,83	39,70	45,95	50,92	1,3%	1,3%	1,6%
30	70	0,746	35,73	39,60	45,79	50,75	1,6%	1,5%	1,9%
33	67	0,747	35,67	39,54	45,70	50,66	1,8%	1,7%	2,1%
35	65	0,747	35,64	39,50	45,64	50,59	1,9%	1,8%	2,2%
40	60	0,748	35,54	39,40	45,49	50,43	2,1%	2,0%	2,6%
45	55	0,749	35,45	39,30	45,34	50,27	2,4%	2,3%	2,9%
50	50	0,750	35,35	39,20	45,19	50,11	2,7%	2,6%	3,2%
55	45	0,751	35,26	39,10	45,04	49,95	3,0%	2,8%	3,6%
60	40	0,752	35,16	39,00	44,88	49,79	3,2%	3,1%	3,9%
65	35	0,753	35,07	38,90	44,73	49,63	3,5%	3,3%	4,2%
70	30	0,754	34,97	38,80	44,58	49,47	3,8%	3,6%	4,6%
75	25	0,755	34,88	38,70	44,43	49,30	4,1%	3,9%	4,9%
76	24	0,755	34,86	38,68	44,40	49,27	4,1%	3,9%	5,0%
80	20	0,756	34,78	38,60	44,28	49,14	4,4%	4,1%	5,3%
85	15	0,757	34,69	38,50	44,13	48,99	4,7%	4,4%	5,6%
90	10	0,758	34,59	38,40	43,98	48,83	4,9%	4,7%	5,9%
95	5	0,759	34,50	38,30	43,83	48,67	5,2%	5,0%	6,3%
100	0	0,760	34,40	38,20	43,68	48,51	5,5%	5,2%	6,6%

Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 revela una relación lineal e inversamente proporcional entre la cantidad de biometano y el índice de Wobbe. A 100% de biometano, se obtiene un valor de 48,51 [MJ/m³], inferior a los 51,73 [MJ/m³] del gas natural. Por lo tanto, el biometano al 96% de CH₄ es compatible como reemplazo al gas natural, ya que cumple con los requisitos de la Nch2264/14.

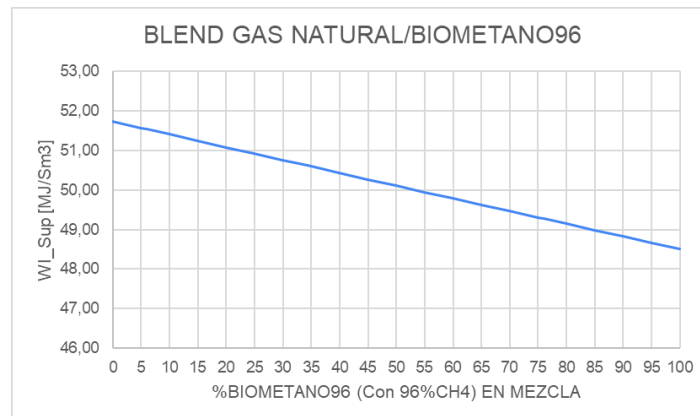


Figura 8. Resultado índice de Wobbe inferior; mezcla gas natural y Biometano96
Fuente: Elaboración propia

➤ **Resultados de índice de Wobbe y poder calorífico; Mezcla de gases de H2V/Gas Natural:**

Los resultados de la Tabla 9 indican que se puede inyectar hasta un 18,5% de hidrógeno en la mezcla con gas natural sin que ello afecte negativamente el proceso de combustión. Estas proporciones cumplen con los estándares técnicos del suministro de gas natural actual y se mantienen dentro de los límites aceptables, con una variación del índice de Wobbe del 5%

Tabla 9. Resultados de mezcla de Hidrógeno/Gas Natural(GN)

%H2	%GN	Densidad Mezcla [kg/m3]	PCI [MJ/Sm3]	PCS [MJ/Sm3]	Wl_Inf [MJ/Sm3]	Wl_Sup [MJ/Sm3]	Dif%PCI	Dif%PCS	DIF%Wl_Sup
0	100	0,740	36,30	40,20	46,71	51,73	0,0%	0,0%	0,0%
5	95	0,707	35,00	38,80	46,07	51,07	3,7%	3,6%	1,3%
6	94	0,701	34,73	38,51	45,94	50,94	4,5%	4,4%	1,6%
10	90	0,674	33,69	37,39	45,41	50,40	7,7%	7,5%	2,6%
15	85	0,642	32,39	35,99	44,76	49,73	12,1%	11,7%	4,0%
17	83	0,628	31,86	35,42	44,49	49,46	13,9%	13,5%	4,6%
18,5	81,5	0,619	31,47	35,00	44,29	49,26	15,3%	14,9%	5,0%
20	80	0,609	31,08	34,58	44,10	49,06	16,8%	16,3%	5,4%
25	75	0,576	29,78	33,18	43,43	48,39	21,9%	21,2%	6,9%
30	70	0,543	28,47	31,77	42,76	47,72	27,5%	26,5%	8,4%
35	65	0,510	27,17	30,37	42,09	47,05	33,6%	32,4%	9,9%
40	60	0,478	25,86	28,96	41,42	46,39	40,4%	38,8%	11,5%
45	55	0,445	24,56	27,56	40,76	45,74	47,8%	45,9%	13,1%
50	50	0,412	23,25	26,15	40,10	45,10	56,1%	53,7%	14,7%
55	45	0,379	21,95	24,75	39,45	44,48	65,4%	62,5%	16,3%
60	40	0,346	20,64	23,34	38,82	43,90	75,9%	72,2%	17,8%
65	35	0,314	19,34	21,94	38,22	43,36	87,7%	83,3%	19,3%
70	30	0,281	18,03	20,53	37,67	42,89	101,3%	95,8%	20,6%
75	25	0,248	16,73	19,13	37,18	42,51	117,0%	110,2%	21,7%
80	20	0,215	15,42	17,72	36,80	42,29	135,4%	126,9%	22,3%
85	15	0,182	14,12	16,32	36,59	42,29	157,2%	146,4%	22,3%
90	10	0,150	12,81	14,91	36,66	42,67	183,4%	169,6%	21,2%
95	5	0,117	11,51	13,51	37,27	43,74	215,5%	197,7%	18,3%
100	0	0,084	10,20	12,10	38,96	46,22	255,9%	232,2%	11,9%

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, como lo muestra la Figura 9, una mezcla de 40% de hidrógeno tiene un índice de Wobbe equivalente al 100% de hidrógeno, y está por debajo del límite inferior establecido en la Nch2264/14. Esto podría afectar a los procesos que requieren un índice de Wobbe específico.

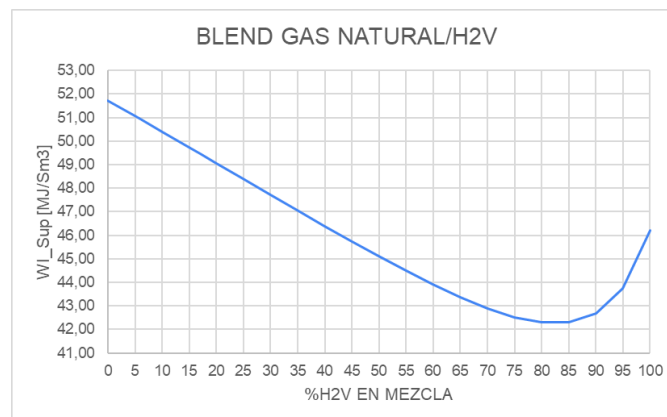


Figura 9. Resultado índice de Wobbe inferior; mezcla Hidrógeno y Gas Natural (GN)

Fuente: Elaboración propia

En el ámbito ambiental, se procede a calcular las emisiones de carbono, con los datos y antecedentes ya presentados.

➤ **Resultados de volúmenes, energía y emisiones de carbono; Mezcla de gases Biometano/Gas natural:**

El punto de mezcla resaltado en amarillo en la Tabla 10, que indica la proporción aceptable entre Biometano y metano, resulta en una disminución de 1586 [Ton/CO₂eq]. En términos porcentuales, esto equivale a una reducción del 35,1% en las emisiones de carbono.

Tabla 10. Resultados Energía y emisiones de mezcla de gases Biometano 96/gas Natural

%BIOMETANO96	%GN	WL_Sup [MJ/Sm ³]	Densidad [kg/m ³]	Volumen equivalente Biometano96 [m ³]	Volumen equivalente GN[m ³]	Volumen mezcla [m ³]	Energía equivalente Hidrogeno [MJ]	Energía equivalente GN[MJ]	Energía blend [MJ]	Blend Emisión [kg Co ₂ eq]	DIF % Emisiones
0%	100%	51,73	0,3904	0	2.236.132	2.236.132	0	81.171.594	81.171.594	4.522.935	0,0%
5%	95%	51,57	0,3888	112.100	2.129.900	2.242.000	3.856.239	77.315.355	81.171.594	4.418.546	-2,3%
6%	94%	51,54	0,3885	134.591	2.108.586	2.243.177	4.629.917	76.541.677	81.171.594	4.397.668	-2,8%
10%	90%	51,41	0,3872	224.790	2.023.108	2.247.898	7.732.769	73.438.825	81.171.594	4.314.156	-4,6%
15%	85%	51,24	0,3857	338.074	1.915.753	2.253.827	11.629.749	69.541.845	81.171.594	4.209.767	-6,9%
20%	80%	51,08	0,3841	451.958	1.807.831	2.259.788	15.547.343	65.624.251	81.171.594	4.105.377	-9,2%
25%	75%	50,92	0,3825	566.445	1.699.336	2.265.781	19.485.714	61.685.890	81.171.594	4.000.988	-11,5%
30%	70%	50,75	0,3809	681.542	1.590.264	2.271.805	23.445.028	57.726.566	81.171.594	3.896.599	-13,8%
33%	67%	50,66	0,3800	750.894	1.524.541	2.275.435	25.830.739	55.340.856	81.171.594	3.833.965	-15,2%
35%	65%	50,59	0,3793	797.252	1.480.610	2.277.861	27.425.452	53.746.142	81.171.594	3.792.209	-16,2%
40%	60%	50,43	0,3777	913.580	1.370.370	2.283.950	31.427.156	49.744.438	81.171.594	3.687.820	-18,5%
45%	55%	50,27	0,3762	1.030.532	1.259.539	2.290.072	35.450.311	45.721.283	81.171.594	3.583.431	-20,8%
50%	50%	50,11	0,3746	1.148.113	1.148.113	2.296.226	39.495.090	41.676.504	81.171.594	3.479.041	-23,1%
55%	45%	49,95	0,3730	1.266.328	1.036.086	2.302.414	43.561.667	37.609.927	81.171.594	3.374.652	-25,4%
60%	40%	49,79	0,3715	1.385.181	923.454	2.308.635	47.650.219	33.521.375	81.171.594	3.270.263	-27,7%
65%	35%	49,63	0,3699	1.504.678	810.211	2.314.889	51.760.925	29.410.669	81.171.594	3.165.873	-30,0%
70%	30%	49,47	0,3683	1.624.825	696.353	2.321.178	55.893.966	25.277.628	81.171.594	3.061.484	-32,3%
75%	25%	49,30	0,3668	1.745.626	581.875	2.327.501	60.049.523	21.122.071	81.171.594	2.957.095	-34,6%
76%	24%	49,27	0,3664	1.769.865	558.905	2.328.770	60.883.353	20.288.241	81.171.594	2.936.217	-35,1%
80%	20%	49,14	0,3652	1.867.087	466.772	2.333.858	64.227.782	16.943.812	81.171.594	2.852.705	-36,9%
85%	15%	48,99	0,3636	1.989.213	351.038	2.340.251	68.428.929	12.742.665	81.171.594	2.748.316	-39,2%
90%	10%	48,83	0,3621	2.112.010	234.668	2.346.678	72.653.153	8.518.441	81.171.594	2.643.927	-41,5%
95%	5%	48,67	0,3605	2.235.484	117.657	2.353.141	76.900.643	4.270.951	81.171.594	2.539.537	-43,9%
100%	0%	48,51	0,3590	2.359.639	0	2.359.639	81.171.594	0	81.171.594	2.435.148	-46,2%

Fuente: Elaboración propia

La Figura 10 revela una relación lineal e inversamente proporcional entre la cantidad de biometano y las emisiones de carbono equivalente. Al alcanzar un 100% de biometano, se logra un valor de 2435 [Ton/CO₂eq], representando una disminución significativa del 46,2% en las emisiones de carbono.

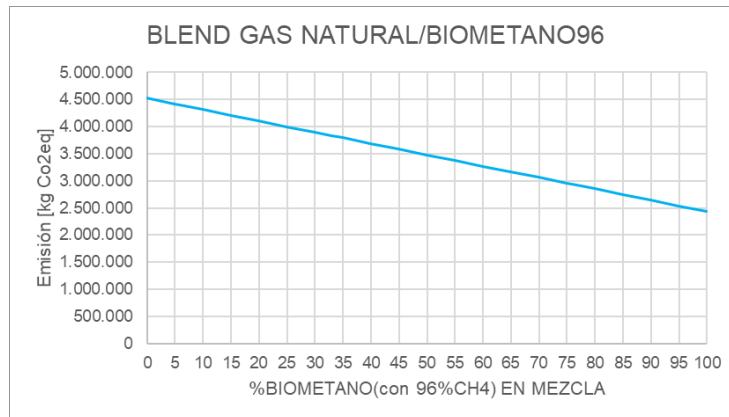


Figura 10. Emisiones de carbono a distinta proporción de mezcla de biometano96
Fuente: Elaboración propia

➤ **Resultados de volúmenes, energía y emisiones de carbono; Mezcla de gases Hidrógeno Verde (H₂V)/Gas Natural:**

El punto de mezcla resaltado en amarillo en la Tabla 11, que indica la proporción aceptable entre hidrogeno y metano, resulta en una disminución de 271 [Ton/CO₂eq]. En términos porcentuales, esto equivale a una reducción del 6% en las emisiones de carbono

Tabla 11. Resultados Energía y emisiones de mezcla de gases H2V/gas Natural

%H2V	%GN	Wl_Sup [MJ/Sm3]	Densidad [kg/m3]	Volumen equivalente Hidrogeno[m3]	Volumen equivalente GN[m3]	Volumen mezcla [m3]	Energía equivalente Hidrogeno [MJ]	Energía equivalente GNMJ	Energía blend [MJ]	Blend Emisión [kg Co2eq]	DIF % Emisiones
0%	100%	51.73	0.3837	0	2.236.132	2.236.132	0	81.171.594	81.171.594	4.522.935	0,0%
5%	95%	51.07	0.379	115.976	2.203.544	2.319.520	1.182.955	79.988.639	81.171.594	4.457.020	-1,5%
6%	94%	50.94	0.378	140.217	2.196.732	2.336.949	1.430.213	79.741.381	81.171.594	4.443.242	-1,8%
10%	90%	50.40	0.374	240.937	2.168.431	2.409.368	2.457.555	78.714.039	81.171.594	4.385.998	-3,0%
15%	85%	49.73	0.369	375.968	2.130.488	2.506.457	3.834.878	77.336.716	81.171.594	4.309.253	-4,7%
17%	83%	49.46	0.367	433.078	2.114.441	2.547.519	4.417.398	76.754.196	81.171.594	4.276.795	-5,4%
18,5%	81,5%	49,26	0,365	477,154	2.102,056	2.579,210	4.866,968	76.304,626	81.171.594	4.251.744	-6,0%
20%	80%	49.06	0.364	522.340	2.089.359	2.611.699	5.327.865	75.843.729	81.171.594	4.226.063	-6,6%
25%	75%	48.39	0.359	681.542	2.044.625	2.726.166	6.951.723	74.219.871	81.171.594	4.135.580	-8,6%
30%	70%	47.72	0.354	855.338	1.995.789	2.851.127	8.724.450	72.447.145	81.171.594	4.036.803	-10,7%
35%	65%	47.05	0.349	1.045.833	1.942.262	2.988.095	10.667.498	70.504.096	81.171.594	3.928.535	-13,1%
40%	60%	46.39	0.344	1.255.554	1.883.332	3.138.886	12.806.655	68.364.939	81.171.594	3.809.340	-15,8%
45%	55%	45.74	0.339	1.487.567	1.818.138	3.305.705	15.173.187	65.998.407	81.171.594	3.677.475	-18,7%
50%	50%	45.10	0.334	1.745.626	1.745.626	3.491.251	17.805.382	63.366.212	81.171.594	3.530.807	-21,9%
55%	45%	44.48	0.330	2.034.376	1.664.489	3.698.865	20.750.633	60.420.961	81.171.594	3.366.696	-25,6%
60%	40%	43.90	0.325	2.359.639	1.573.093	3.932.732	24.068.322	57.103.273	81.171.594	3.181.832	-29,7%
65%	35%	43.36	0.321	2.728.810	1.469.359	4.198.169	27.833.859	53.337.735	81.171.594	2.972.014	-34,3%
70%	30%	42.89	0.318	3.151.421	1.350.609	4.502.030	32.144.492	49.027.103	81.171.594	2.731.823	-39,6%
75%	25%	42.51	0.315	3.639.982	1.213.327	4.853.309	37.127.814	44.043.780	81.171.594	2.454.149	-45,7%
80%	20%	42.29	0.313	4.211.237	1.052.809	5.264.046	42.954.618	38.216.976	81.171.594	2.129.475	-52,9%
85%	15%	42.29	0.313	4.888.123	862.610	5.750.733	49.858.854	31.312.740	81.171.594	1.744.767	-61,4%
90%	10%	42.67	0.316	5.702.922	633.658	6.336.580	58.169.808	23.001.787	81.171.594	1.281.675	-71,7%
95%	5%	43.74	0.324	6.702.565	352.767	7.055.332	68.366.167	12.805.427	81.171.594	713.527	-84,2%
100%	0%	46.22	0.342	7.957.999	0	7.957.999	81.171.594	0	81.171.594	0	-100,0%

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en la Figura 11 se revela que la relación entre el nivel de inyección de hidrogeno y las emisiones de carbono no sigue una proporción directa en el caso de las mezclas de hidrógeno. Estos resultados de mezcla con hidrógeno se alinean con o presentado por Elorduy, A. P. (2023) y contradicen lo mencionado por Szkarowski el 2020, quien afirmaba una proporcionalidad directa entre la mezcla de hidrógeno en gas natural y las emisiones de carbono.

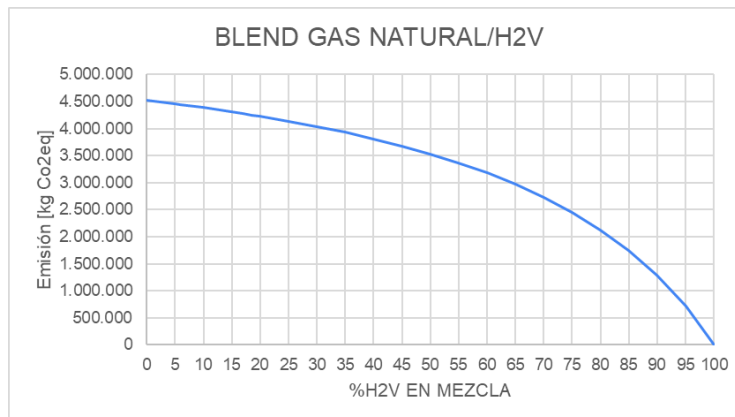


Figura 11. Emisiones de carbono a distinta proporción de mezcla de hidrógeno verde

Fuente: Elaboración propia

Según la normativa chilena actual, se establece como condición no superar el 6% de mezcla (Empresa Metrogas, 2023). Esta información se ha utilizado para construir las siguientes tablas, que resumen los antecedentes, resultados y parámetros recolectados con el fin de realizar comparativos técnicos (Tabla 12), de impacto ambiental (Tabla 13) y económicos (Tabla 14):

Tabla 12. Comparativo Técnico

Combustibles	Índice Wobbe [MJ/Nm3]	PCS [MJ/m3]	Compatibilidad infraestructura existente
Gas natural	51,73	40,2	SI
Biometano (100% CH4)	48,3	36,6	SI
Hidrógeno (100%)	45,9	12,1	NO, debido a invisibilidad llama y seguridad
Blend gas natural - hidrógeno (6% H2/94%CH4)	50,94	38,51	SI
Blend gas natural - Biometano(6% biometano/94%CH4)	51,54	40,08	SI

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Comparativo impacto ambiental

Evaluación Ambiental	Gas natural	Biometano96	Hidrógeno Verde	Blend gas natural - Hidrógeno [6% H2]	Blend gas natural – BIOMETANO96 [6% BIOM96]
Volumen equivalente (m3)	2.236.132	2.359.639	7.957.999	2.336.949	2.243.177
Energía equivalente (MJ)	81.171.594	81.171.594	81.171.594	81.171.594	81.171.594
Total emisiones (tCO2/año)	4.523	2.435	0	4.443	4.398
Total reducción emisiones (tCO2/año)	0	2.088	4.523	-80	125
%Reducción total de emisiones (tCO2/año)	0%	46,2%	100%	1,8%	2,8%
Contaminantes del proceso de combustión	CO2, NOx, SOx, PM2.5, PM10	CO2, NOx, SOx, PM2.5, PM10	No produce	CO2, NOx, SOx, PM2.5, PM10	CO2, NOx, SOx, PM2.5, PM10
Impacto en el calentamiento global en relación a Gas natural	Igual	Bajo	Nulo	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se detalla una comparación económica. Si tomamos en cuenta un consumo mensual de gas natural de alrededor de 1,899,000 MW/mes, equivalente a una instalación de 12 MW, y consideramos como referencia el costo de conversión de la infraestructura de un horno en la industria cerámica (15 MW / \$908,800 MUSD) que se traduce en \$60,5 MUSD por MW de gas natural (Vásquez, R. et al, 2021).

Tabla 14. Comparativo económico

Evaluación Económica	Gas natural	Biometano	Hidrógeno	Blend gas natural - hidrógeno (6% H2)	Blend gas natural – BIOMETAN O96 (6% BIOM96)
Costo suministro (MMUSD)	1,32	1,08	4,68	1,53	1,46
Disponibilidad/Confiabilidad	SI	NO	NO	NO	SI
Diferencia % comparativa con respecto a Gas natural	0%	-19%	353%	15,2%	10,4%
Inversión recambio tecnológico (MMUSD)	0	0	373	0	0
Viable económicamente	SI	SI	NO	NO	NO

Fuente: Elaboración propia

Para implementar recambio tecnológico para utilizar hidrógeno verde, resultaría en una inversión aproximada de \$373 MMUSD para la fundición. Estas cifras no se alinean con la estrategia económica del negocio.

En base a lo anterior, con la información recolectada y calculada, se elabora un comparativo general con respecto al gas natural, hidrógeno, biometano y blend, ver Tabla 15.

Tabla 15. Ventajas y desventajas generales de combustibles estudiados

Combustibles	Aspecto Técnico	Aspecto Ambiental (Reducción de CO2)	Aspecto Económico
Biometano	Tecnología madura, inyección directa a la red de gas.	Contribuye significativamente a reducir emisiones de CO2eq.	Reducción de dependencia de combustibles fósiles. Pero el costo suministro aún no se proyecta debido a la falta de políticas públicas que impulsen esta tecnología.
	Versatilidad para diferentes usos energéticos.	Reducción de emisiones locales en zonas saturadas.	Futuros beneficios fiscales y tributarios por ser biocombustible.
Gas Natural	Infraestructura consolidada y ampliamente utilizada y permitiría mezcla de gases sustentables.	Emisiones de CO2 menores en comparación con fósiles.	Relativamente bajo costo de infraestructura.
	Diversidad de usos en la industria y hogares.	Contribuye indirectamente a la reducción de CO2.	Costos conocidos y variables, dependientes de oferta, fluctuaciones del Brent, IPC y tipo de cambio dólar.
Hidrógeno	Posibilidad de blending o uso puro, con modificaciones infraestructura existente (tecnología en desarrollo)	La reducción de CO2 según el blending no es significativa. Cero emisiones utilizando 100% H2V.	Blend, costo suministro aún no se conoce. H2V al 100%, Altos costos iniciales en cambios tecnológicos completos.

Fuente: Elaboración propia

2.2 Análisis e Interpretación de Información

El estudio se adhiere a criterios técnicos, tanto nacionales como internacionales, y a las normativas vigentes en Chile, priorizando la reducción de emisiones, así como la eficiencia en costos operativos e inversiones. Siguiendo estos lineamientos, la investigación se centró en analizar de manera especializada el potencial uso del biometano e hidrógeno, evaluando tanto su aplicación individual como sus posibles mezclas en los procesos de combustión de la fundición de acero, excluyendo el empleo de biogás y amoníaco por no pertenecer a la familia de gases H, donde se ubica el gas natural.

El biometano, obtenido a partir del tratamiento de residuos orgánicos, surge como una alternativa renovable al gas natural. Con un límite de mezcla del 76%, se encuentra al límite del índice de Wobbe de la familia de gases H, lo que impide su sustitución total del gas natural. Comparte propiedades y beneficios similares, mostrando reducciones notables en emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas. Esta característica contribuye de manera significativa a la descarbonización del sector y a la mitigación del cambio climático.

Respecto a la integración del hidrógeno verde plantea desafíos técnicos, particularmente la limitación del índice Wobbe. Esta restricción técnica, que afecta la mezcla de hidrógeno con gas natural, puede dificultar la operación segura de equipos de combustión y la compatibilidad de las mezclas en las redes de distribución. En contraste, el biometano muestra ventajas al presentar similitudes con el gas natural, evitando los desafíos técnicos planteados por el blending de hidrógeno.

En cuanto al impacto ambiental, se resalta que el blending de hidrógeno con gas natural evidencia una efectividad limitada en la reducción de emisiones de CO₂,

especialmente a medida que se incrementa la proporción de hidrógeno en la mezcla. Por el contrario, el biometano emerge como una opción altamente prometedora al lograr una reducción significativa del 36,1% en emisiones de carbono al utilizar biometano al 76%, en comparación con el gas natural. Esto se logra manteniendo las variaciones del índice de Wobbe dentro de los límites establecidos por la industria. Además, la mezcla con hidrógeno verde al 18,5% muestra una reducción del 6% en las emisiones, aunque de manera más moderada en comparación con el biometano.

En termino de costos, debido a la falta de conocimiento sobre costos de combustibles alternativos y confiabilidad de suministro, se realiza una estimación en base a datos conseguidos en la literatura consulta, evidenciando que el uso exclusivo de hidrógeno al 100% no sería viable económicamente y el blend de hidrogeno con gas natural, tendría costos operativos altos. En contraposición, la opción de blend de biometano se destaca como una alternativa prometedora sobre el hidrógeno, ya que cumple con los requisitos para la reutilización de las instalaciones de procesos con combustión existentes.

La empresa de fundición de acero muestra una baja disposición para invertir en tecnologías de reducción de emisiones. La empresa de Gas, parece estar tomando medidas para cumplir con la futura ley de gases sustentables mediante la inyección de biometano, pero no proporciona información a los clientes sobre sus emisiones. Tampoco han considerado implementar certificaciones para demostrar la reducción de huella de carbono en el consumo de gas. Han evaluado distintas fuentes de energía, pero al intentar cumplir con el requisito establecido por la ley de aumentar la presencia de hidrógeno verde en las redes de gas, se encuentran con mayores limitaciones técnicas, regulatorias y económicas en la implementación del hidrógeno en comparación con el uso de biometano.

Estos datos revelan una brecha en la disposición y acción hacia la sostenibilidad entre ambas entidades. La falta de información y la baja disposición para invertir son obstáculos significativos para la transición hacia tecnologías más sostenibles en ambas organizaciones.

La evaluación integral de las opciones disponibles y la consideración cuidadosa de los costos y beneficios son cruciales en el contexto específico de cada proceso y mercado para tomar decisiones informadas sobre las tecnologías energéticas. Este análisis proporciona un marco para la toma de decisiones a nivel gubernamental y empresarial, siendo esencial para la transición hacia una matriz energética más sostenible en Chile.

Este análisis proporciona una perspectiva integral de las implicaciones y posibilidades de diferentes fuentes de energía renovable, lo que puede servir como base para decisiones informadas en el contexto de la transición energética en Chile.

3 CONCLUSIONES GENERALES

El análisis realizado destaca la complejidad y los desafíos que enfrenta Chile en su camino hacia una matriz energética más sostenible. La transición energética demanda una visión integral que considere diversas alternativas, entre ellas el hidrógeno verde y el biometano, para lograr una reducción efectiva de emisiones y promover la circularidad económica.

➤ **Desafíos de la Transición Energética y Alternativas a los Combustibles Fósiles**
Chile enfrenta desafíos significativos en su camino hacia una matriz energética más sostenible. La actual dependencia de combustibles fósiles genera graves preocupaciones por su impacto climático. Aunque el hidrógeno verde es atractivo, su adopción se ve obstaculizada por desafíos técnicos, incertidumbres en su viabilidad a largo plazo y la necesidad de una fuerte inversión para ser económicamente viable. Además, el biometano aún carece de una política pública que promueva su desarrollo en el mercado, a pesar de su potencial para abordar la reducción de gases de efecto invernadero.

➤ **Evaluación Integral para la Toma de Decisiones**
Se sugiere evaluar con detenimiento aspectos técnicos, económicos y ambientales al considerar opciones energéticas. En el caso del hidrógeno, la falta de datos específicos de costos en su implementación para procesos específicos representa un desafío significativo en la evaluación económica. Esta falta de información dificulta la determinación precisa de su viabilidad en el mercado actual de gases renovables.

La incertidumbre inicial en el mercado de gases renovables y la reticencia de las empresas a comprometerse con el hidrógeno debido a la falta de madurez del mercado son factores comprensibles. Sin embargo, este enfoque cauteloso podría

conllevar a perder oportunidades cruciales en términos de reducción de emisiones y sostenibilidad a largo plazo.

En contraste, el biometano emerge como una opción atractiva desde una perspectiva inicial. Su desarrollo no requiere inversiones considerables en infraestructura y su producción a partir de residuos orgánicos ofrece un impacto neutral en las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta alternativa prometedora no solo reduce los costos iniciales, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental.

➤ **Sopesando Costos y Beneficios en la elección de Tecnologías**

La falta de datos específicos sobre costos en la implementación del hidrógeno para procesos de combustión en el mercado inicial representa un desafío para la evaluación económica. Sin embargo, la esperada madurez del mercado y la evolución tecnológica podrían resolver estas limitaciones a medida que se avance en esta transición energética.

➤ **PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS**

Como extensión de este análisis sobre las alternativas energéticas no eléctricas en Chile, se plantean diversas líneas de desarrollo para investigaciones futuras. Estas áreas exploratorias abarcan tanto aspectos complementarios a esta investigación como nuevos horizontes que podrían enriquecer y expandir el conocimiento sobre la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. A continuación, se presentan propuestas para trabajos futuros:

- Optimización de procesos de combustión

Explorar en profundidad el impacto y la eficiencia de los procesos de combustión al integrar diferentes proporciones de hidrógeno en el gas natural. Este análisis podría

abordar cómo varían las emisiones de CO₂, el rendimiento energético y los ajustes requeridos en los quemadores industriales al aumentar la proporción de hidrógeno.

- Viabilidad económica en contexto Nacional

Realizar estudios detallados sobre la viabilidad económica del hidrógeno y el biometano en aplicaciones específicas dentro del contexto industrial chileno. Estos estudios podrían involucrar análisis de costos operativos, inversiones iniciales, impacto en los procesos productivos y la competitividad frente a los combustibles fósiles en diferentes sectores industriales.

- Investigación de tecnologías emergentes

Explorar tecnologías emergentes y su aplicación en la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno y biometano. Se pueden investigar innovaciones en celdas de combustible, métodos de producción más eficientes y formas avanzadas de almacenamiento que puedan mejorar la viabilidad y eficacia de estas fuentes energéticas.

- Análisis de políticas y marco regulatorio

Evaluar el impacto de las políticas públicas y el marco regulatorio en el desarrollo y adopción de tecnologías de hidrógeno y biometano en Chile. Esto incluiría un análisis de los incentivos gubernamentales, regulaciones y posibles barreras que podrían afectar la implementación de estas tecnologías.

- Estudios comparativos a nivel internacional

Realizar estudios comparativos con otros países que han avanzado en la integración de hidrógeno y biometano en sus matrices energéticas. Estos análisis podrían ofrecer perspectivas sobre lecciones aprendidas, mejores prácticas y posibles estrategias de implementación adaptadas al contexto chileno.

- Impacto ambiental y evaluación del ciclo de vida

Realizar evaluaciones más detalladas sobre el impacto ambiental total y la evaluación del ciclo de vida del hidrógeno y el biometano, considerando no solo las emisiones directas, sino también los efectos en la cadena de suministro y producción.

Estas áreas de investigación representan una continuidad lógica y relevante a partir de los hallazgos y las limitaciones identificadas en este análisis, ofreciendo oportunidades para profundizar en el conocimiento y avanzar hacia una transición energética más sólida y sostenible en Chile.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

Alexander, S., Anatolii, K., & Vitalii, T. (2022). Interchangeability and standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen. *Architecture and Engineering*, 7(1), 33-45.

Thiel, G. P., & Stark, A. K. (2021). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule*, 5(3), 531-550.

Staskevich, N. L., Severinets, G. N. and Vidgorchik, D. Ya. (1990). *Handbook on gas supply and use*. Leningrad: Nedra, 762 p.

Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., & Rooney, D. W. (2021). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-36.

Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K. K. A., & Okafor, E. C. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(1), 109-133.

Global McKinsey&Company (2020). *Chilean hydrogen pathway-Final Report*. Recuperado www.energia.gob.cl/sites/default/files/estudio_base_para_la_elaboracion_de_la_estrategia_nacional_para_el_desarrollo_de_hidrogeno_verde_en_chile.pdf

E&M Combustion (2021). *Sistema de combustión de hidrógeno para la descarbonización de la industria*. Recuperado de www.emcombustion.es/wp-content/pdfs/es/EM&C_quemadores_hidrogeno.pdf

ARCA SPA (2022). *Listado de proveedores de quemadores de hidrógeno para uso comercial e industrial*. Recuperado de <https://www.cogeneracioneficiente.cl/wp-content/uploads/2022/03/Listado-quemadores-duales-VF.pdf>

European Commission (2020). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels: European Commission, 23 p.

AIE (2021), *Hierro y acero*, AIE, París. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>

Reportacero. (2022, Junio 7). Emite industria siderúrgica 8 % de CO2. Recuperado de <https://reportacero.com/emite-industria-siderurgica-8-de-co2/>

Ortiz, R., & Fernandez, V. (2022). Business perception of obstacles to innovate: Evidence from Chile with pseudo-panel data analysis. *Research in International Business and Finance*, 59, 101563.

CAT net zero target evaluations. (2022). Obtenido de Climate Action Tracker: <https://climateactiontracker.org/global/cat-net-zero-target-evaluations/>

Elorduy, A. P. (17 de Septiembre de 2023). ¿Hasta qué % de blending de hidrógeno es admisible en los quemadores industriales de gas natural? Obtenido de Energy analysis: https://energyanalysis.substack.com/p/impacto-blending-hidrogeno-quemador-industrial?utm_source=post-email-title&publication_id=1607763&post_id=135991356&utm_campaign=email-post-title&isFreemail=true&r=2rnbs3

Gubinelli, G. (2021). Energía estratégica. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/en-la-transicion-el-gobierno-de-chile-presenta-un-proyecto-de-ley-para-robustecer-la-estrategia-de-hidrogeno-verde/>

Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible. (2023). Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals>.

Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible. (2023). Obtenido de United Nations: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals>

Emerson. (2023, 21 de junio). Application Note: Biomethane Analysis Using Gas Chromatographs. Recuperado de <https://www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/gas-analysis/about-natural-gas-chromatographs>

Elorduy, A. P. (17 de Septiembre de 2023). ¿Hasta qué % de blending de hidrógeno es admisible en los quemadores industriales de gas natural? Obtenido de Energy analysis: <https://energyanalysis.substack.com/>

Elorduy, A. P. (23 de Abril de 2023). Índice Wobbe – Variación en la Mezcla Hidrógeno-Gas Natural, Obtenido de Energy analysis: <https://energyanalysis.substack.com/>

Carvalho, F. S. D., Reis, L. C. B. D. S., Lacava, P. T., Araújo, F. H. M. D., & Carvalho Jr, J. A. D. (2023). Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial Equipment. *Energies*, 16(2), 839.

OECD (2023), *World Energy Outlook 2023*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/827374a6-en>.

World Steel Association (2022). *World Steel in Figures 2022*. Recuperado de <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>

Vásquez Torres, R., Tello Guerra, P., Fuster Justiniano, J., Farías Hermosilla, R., Espinoza Cáceres, E., & Machuca Lazo, N. (2021). Inyección de hidrógeno en redes de gas natural. Santiago de Chile.

Empresa Metrogas. (2023). *El gas Natural en la transición Energética y el rol del hidrógeno* [Presentación de PowerPoint]. Seminario industrial.