

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE**



**“Investigación Experimental de la Combustión
de la Mezcla de Gas Licuado de Petróleo con
Hidrógeno en un Quemador Industrial”**

LUKAS FABIÁN RAMÍREZ SCHIAFFINO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: ING. RAFAEL MENA Y.**

MARZO – 2025

*Dirigido a mi madre Claudia por su amor y apoyo incondicional,
A mi hermano Alonso por ser mi fuente de inspiración y alegría,
A mi padre Washington y abuela María Teresa por su incondicional respaldo,
A mi mascota Oso por acompañarme largas noches de estudio,
Y especialmente, a mi abuelo Manuel, por cautivarme con el mundo
del conocimiento y darme un ejemplo de resiliencia y responsabilidad.*

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la viabilidad técnica y operativa de integrar hidrógeno en la combustión de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en un quemador industrial montado en un horno isotérmico, con el objetivo de mitigar los impactos ambientales asociados al uso intensivo de combustibles fósiles. Para ello, se implementa un sistema experimental que integra el suministro de GLP, hidrógeno y aire, realizando pruebas con diversas concentraciones de hidrógeno y analizando tanto las emisiones como los balances energéticos del proceso. Los resultados revelaron que, al aumentar la fracción de hidrógeno, se observa una reducción progresiva en las emisiones de CO₂, esperada por la disminución de carbono en la mezcla, y una presencia de hidrógeno no quemado para la potencia mayor evaluada desde una concentración volumétrica del 20%. En el análisis energético se encontró que, para una potencia de 33,70 kW, la eficiencia térmica se estabiliza y alcanza su valor máximo de aproximadamente 90% a una concentración del 15% de hidrógeno; mientras que, a 42,47 kW, pese a registrar mayores pérdidas de calor en los gases de escape y la presencia de hidrógeno libre, la eficiencia térmica mejora progresivamente hasta alcanzar un óptimo cercano al 80% a 30% de hidrógeno.

Palabras Clave: Hidrógeno, Combustión, Quemador Industrial, GLP, Mezclas de combustibles.

ABSTRACT

The present study evaluates the technical and operational feasibility of integrating hydrogen into the combustion of Liquefied Petroleum Gas (LPG) in an industrial burner mounted on an isothermal furnace, aiming to mitigate the environmental impacts associated with the intensive use of fossil fuels. To this end, an experimental system is implemented, integrating the supply of LPG, hydrogen, and air, conducting tests with various hydrogen concentrations, and analyzing both emissions and the energy balances of the process. The results revealed that increasing the hydrogen fraction leads to a progressive reduction in CO₂ emissions, as expected due to the decreased carbon content in the mixture, and an occurrence of unburned hydrogen at the highest evaluated power level from a volumetric concentration of 20%. The energy analysis found that, for a power output of 33.70 kW, thermal efficiency stabilizes and reaches its maximum value of approximately 90% at a hydrogen concentration of 15%. Meanwhile, at 42.47 kW, despite higher heat losses in the exhaust gases and the presence of free hydrogen, thermal efficiency progressively improves, reaching an optimum of approximately 80% at 30% hydrogen concentration.

Keywords: Hydrogen, Combustion, Industrial burner, LPG, Fuel blends.

GLOSARIO

GLP	:	Gas Licuado Petróleo.
CAGR	:	Compound Annual Growth Rate.
PDH	:	Propane Dehydrogenation.
EERR	:	Energías Renovables.
PEM	:	Proton Exchange Membrane.
AEM	:	Anion Exchange Membrane.
SOEC	:	Solid Oxide Electrolysis Cells.
HHV	:	High Heating Value.
SG	:	Specific Gravity.
LEL	:	Lower Explosive Limit.
P&ID	:	Piping and Instrumentation Diagram.
CHP	:	Combined Heat and Power.
DAQ	:	Data Acquisition.
BTG	:	Designación interna para modelos de quemadores industriales, por ejemplo, BTG15, BTG20, BTG28.
PM2.5	:	Partículas en suspensión con un diámetro inferior a 2.5 micrómetros.
PM10	:	Partículas en suspensión con un diámetro inferior a 10 micrómetros.

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
GLOSARIO	v
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
1 Introducción.....	14
1.1 Contexto y Motivación	14
1.2 Estructura del Documento	15
1.3 Objetivos	16
2 Los Combustibles Fósiles y su Impacto a Nivel Mundial	17
2.1 Estado del Gas Natural Licuado	19
2.2 Propiedades y Características Gas Licuado de Petróleo.....	21
2.2.1 Densidad y Poder Calorífico del GLP.....	21
2.2.2 Temperatura de Autoignición y Número de Octano	21
2.3 Influencia de los Gases Productos en la Transferencia de Calor por Radiación	
22	
2.3.1 Comportamiento Radiativo del CO ₂	23
2.3.2 Comportamiento Radiativo del H ₂ O	24
2.3.3 Influencia de las Concentraciones de CO ₂ y H ₂ O en la Radiación de la	
Llama 25	
3 Hidrógeno como Combustible	26
3.1 Relevancia del Hidrógeno como Fuente de Energía Alternativa	27

3.1.1	Abundancia y Limpieza del Hidrógeno	27
3.1.2	Densidad Energética del Hidrógeno	27
3.1.3	Incidencia del Hidrógeno en el Almacenamiento de Energía.....	30
3.1.4	El Hidrógeno como Vector Energético Multisectorial.....	32
3.2	Producción de Hidrógeno	35
3.2.1	División de Agua para la Producción de Hidrógeno.....	37
3.2.2	Producción de Hidrógeno a partir de Biomasa	39
3.3	Mezclas de Hidrógeno con Gas Licuado Petróleo	40
3.3.1	Desafíos y Oportunidades en las Mezclas de Hidrógeno con Combustibles Convencionales.....	40
3.3.2	Estabilidad de la Combustión en Mezclas H ₂ -GLP	42
3.3.3	Eficiencia Térmica de Sistemas de Combustión H ₂ -GLP	42
3.3.4	Reducción de Emisiones Contaminantes	43
3.3.5	Brecha de Conocimiento	44
4	Regulación Medioambiental del Gas Licuado Petróleo e Hidrógeno en Chile ...	45
4.1	Composición y Emisiones de los Gases de Combustión.....	45
4.2	Regulación del Gas Licuado Petróleo	48
4.2.1	Seguridad y Operación.....	49
4.2.2	Calidad del GLP	49
4.2.3	Emisiones Máximas Permitidas	49
4.3	Regulación del Hidrógeno.....	50
4.3.1	Seguridad y Operación.....	50
4.3.2	Calidad del Hidrogeno	50
4.3.3	Emisiones Máximas Permitidas	50

5	Diseño y Procedimiento Experimental	51
5.1	Horno Isotérmico	51
5.2	Quemador Baltur BTG 15	53
5.3	Implementación de Controladores para Regulación de Mezcla Combustible 54	
5.4	Adquisición de Mediciones de la Combustión	57
5.4.1	Adquisición de Medición de Temperaturas	57
5.4.2	Adquisición de Emisiones de Combustión	61
5.4.3	Dispositivos de Medición Complementarios	64
5.5	Protocolo de Puesta en Marcha Horno y Toma de Mediciones	66
5.5.1	Verificación y Puesta en Marcha Inicial del Horno	66
5.5.2	Puesta en Marcha Equipos de Medición	67
5.6	Mediciones para Línea Base de GLP	68
5.7	Mediciones Mezcla de GLP e Hidrógeno	69
5.8	Balances Químicos	70
5.9	Balance Energético	73
6	Presentación y Análisis de Resultados	75
6.1	Caracterización del Quemador	75
6.1.1	Verificación de Emisiones para Puntos de Operación Óptimos	77
6.1.2	Balances Energéticos para Puntos de Operación Óptimos	78
6.2	Mezcla Combustible GLP e Hidrógeno	80
6.2.1	Estimación de Flujos Volumétricos de Combustible	81
6.3	Resultados Emisiones de Combustión	83
6.4	Resultados Balances Energéticos	88

6.5	Análisis Temperatura del Manto del Horno Isotérmico	93
CONCLUSIONES		96
Recomendaciones.....		99
BIBLIOGRAFÍA		100
ANEXOS		105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Red mundial de Comercio de GLP en 2017 (EPCM Holdings, 2022).	20
Ilustración 2. Diagrama de flujo del proceso para la unidad Power-to-H2-to-CHP. ...	32
Ilustración 3. Tecnologías de Producción de Hidrógeno Renovable (Song, 2005). ...	35
Ilustración 4. Los Colores del Hidrógeno: Inputs, Process, Outputs and Waste.	37
Ilustración 5. Esquema General de Diseño Experimental.....	51
Ilustración 6. Horno Isotérmico (UTFSM, Viña del Mar).	52
Ilustración 7. Vista frontal, lateral y Sistema de Control Electrónico de Quemador Baltur BTG 15.....	53
Ilustración 8. Bastidor - Panel de Regulación Hidrógeno.....	55
Ilustración 9. Controladores de Flujo Volumétricos. (a) DPC57 y (b) DPC17.	56
Ilustración 10. Conexión Bypass Flujos GLP - H2.....	56
Ilustración 11. Adquisidor de Datos (OMEGA OMB-DAQ56).	57
Ilustración 12. Visualización de Temperaturas en Tiempo Real en DaqView.	58
Ilustración 13. Puntos de Medición Sistema de Enfriamiento (T1-T2-T3-T4-T5).	59
Ilustración 14. Puntos de Medición Manto del Horno (T6-T7-T8-T9-T10-T11).	60
Ilustración 15. Puntos de Medición (T12-T13-T14).	61
Ilustración 16. Testo 350.....	62
Ilustración 17. Sonda Testo 350 Instalada en el Ducto de Emisiones.	63
Ilustración 18. Visualización de Emisiones en Tiempo Real en Software Testo easyEmission.....	64
Ilustración 19. GPI: Electronic Digital Meter	64
Ilustración 20. Gallus G4	65
Ilustración 21. Termómetro Industrial Mestek.....	65
Ilustración 22. Medidor de Gas Combustible Mestek.....	66
Ilustración 23. Detector de Gas Hidrógeno BH90A	66
Ilustración 24. Configuración Curva de Combustión Lamtec Serie BT300.	69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Dependencia de los Combustibles Fósiles en la Unión Europea 1990-2022 (Union, 2024).	18
Gráfico 2. Emisividad CO ₂ - Hottel.	23
Gráfico 3. Emisividad Vapor de Agua - Hottel.	24
Gráfico 4. Zona de Trabajo Quemador Baltur: BTG 15ME, BTG 20ME y BTG 28ME.	54
Gráfico 5. Emisiones Puntos Óptimos para Cargas Mínimas. (a) 200, (b) 250, (c) 300 y (d) 400.	77
Gráfico 6. Balance Energético Puntos Óptimos para Cargas Mínimas. (a) 200, (b) 250, (c) 300 y (d) 400 ($Q_i = Q_{comb}; Q_{abs}; Q_{exh}$).	79
Gráfico 7. Potencia de Combustión Aportada por GLP (Q_{glp}) y H ₂ (Q_{h2}) en la Mezcla Combustible. (a) 33,70 kW y (b) 42,47kW.	82
Gráfico 8. Emisiones de Combustión para Distintas Concentraciones de Hidrógeno para Potencia 33,70 kW. (a) 0%, (b) 7%, (c) 15%, (d) 20%, (e) 25% y (f) 30%.	85
Gráfico 9. Emisiones de Combustión para Distintas Concentraciones de Hidrógeno para Potencia 42,47 kW. (a) 0%, (b) 7%, (c) 15%, (d) 20%, (e) 25% y (f) 30%.	86
Gráfico 10. Concentraciones de Vapor de Agua para Distintos Porcentajes de Hidrógeno. (a) 33,70 kW y (b) 42,47kW.	88
Gráfico 11. Eficiencia Térmica para Distintas Concentraciones de Hidrógeno. (a) 33,70 kW y (b) 42,47kW.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Propiedades del GLP (Tukiman, Osman, Fawzi, Mustaffa, & Hanizam, 2018).	22
Tabla 2. Principales Propiedades: Hidrógeno en Estado Gaseoso, GLP y la Gasolina convencional.	29
Tabla 3. Características Técnicas Baltur BTG 15: Caudal Mínimo (Q_{min}), Caudal Máximo (Q_{max}), Presión (P), Emisiones NO _x (NO _x) y Peso (W).	54
Tabla 4. Dispositivos de Medición Complementarios.	64
Tabla 5. Puntos de Operación Óptimos - Nomenclatura BT 300 (No posee unidades).	76
Tabla 6. Puntos de Operación Óptimos - Potencia Combustible.	78
Tabla 7. Posiciones Servomotor de Aire en Mezclas - Nomenclatura BT 300 (No posee unidades).	81
Tabla 8. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 33,70 kW (reducida).	82
Tabla 9. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 42,47 kW (reducida).	82
Tabla 10. Moles Producto, λ y RAC para Potencia 33,70 kW.	83
Tabla 11. Moles Producto, λ y RAC para Potencia 42,47 kW.	83
Tabla 12. Temperatura Referencial de Llama, Potencia, Potencia Absorbida y Potencia de Gases de Escape para Potencia 33,70 kW.	89
Tabla 13. Temperatura Referencial de Llama, Potencia Absorbida y Potencia de Gases de Escape para Potencia 42,47 kW.	89
Tabla 14. Temperatura y Potencia Térmica en kW de los Gases de Escape Diferenciada por Composición Molecular para Potencia 33,70 kW.	91
Tabla 15. Temperatura y Potencia Térmica en kW de los Gases de Escape Diferenciada por Composición Molecular para Potencia 42,47 kW.	91
Tabla 16. Temperaturas Manto Horno Isotérmico para Potencia 33,70 kW.	94
Tabla 17. Temperaturas Manto Horno Isotérmico para Potencia 42,47 kW.	94
Tabla 18. Propiedades Termo-físicas de los Fluidos Experimentales.	105
Tabla 19. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 33,70 kW.	106

Tabla 20. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 42,47 kW.....	107
---	-----

1 Introducción

El uso intensivo de combustibles fósiles constituye la principal fuente de energía a nivel mundial; sin embargo, su utilización genera múltiples impactos negativos, especialmente en el ámbito ambiental y en la salud pública. En este contexto, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) se emplea en diversas aplicaciones industriales y de transporte, aprovechándose de ventajas como su facilidad de almacenamiento y su alto poder calorífico. No obstante, al tratarse de un recurso no renovable, su combustión contribuye a la emisión de contaminantes y al cambio climático. Por otra parte, el hidrógeno verde se presenta como una fuente de energía limpia y renovable, ya que su combustión produce únicamente vapor de agua, eliminando prácticamente las emisiones nocivas.

La presente investigación se enmarca en un proyecto destinado a evaluar la viabilidad técnica y operativa de la integración del hidrógeno en sistemas de combustión industrial. Se determina el comportamiento de mezclas GLP-H₂ en un quemador industrial instalado en un horno isotérmico, aportando datos experimentales que facilitan la optimización de los procesos de combustión y la reducción de la huella ambiental en la industria. El estudio se desarrolla en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María y constituye una contribución tanto para la academia como para la industria, al proponer soluciones innovadoras frente a los desafíos actuales en materia de sostenibilidad y eficiencia energética.

1.1 Contexto y Motivación

Durante décadas, la dependencia de los combustibles fósiles ha permitido el desarrollo industrial y económico, aunque a costa de generar consecuencias ambientales y sanitarias. La combustión de estos combustibles incrementa la emisión de gases contaminantes, afecta la calidad del aire y repercute negativamente en la salud de la

población. Ante esta situación, se requiere reducir el impacto ambiental mediante la incorporación de fuentes de energía renovable.

El GLP se ha consolidado como un combustible ampliamente utilizado en el ámbito industrial y en el transporte, debido a sus características operativas y a la infraestructura existente para su distribución. Sin embargo, su origen fósil implica que su combustión sigue contribuyendo a la contaminación y al calentamiento global. En contraste, el hidrógeno verde destaca por su origen renovable y por la ausencia de emisiones contaminantes en su combustión, ya que únicamente se genera vapor de agua. La combinación de GLP y hidrógeno se plantea como una estrategia intermedia que aprovecha la infraestructura actual y facilita una transición gradual hacia sistemas energéticos más sostenibles.

La evaluación experimental de las mezclas GLP-H₂ en condiciones controladas permite determinar las condiciones óptimas de combustión, mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes, lo que resulta fundamental para la implementación de tecnologías que promuevan un desarrollo responsable y respetuoso con el medio ambiente.

1.2 Estructura del Documento

La memoria se organiza de forma que cada sección contribuye a comprender integralmente el estudio. En una primera parte se expone el contexto y la motivación del trabajo, se presentan los fundamentos teóricos relacionados con el uso de combustibles fósiles y el potencial del hidrógeno, y se justifican los beneficios de integrar estas dos fuentes energéticas en sistemas de combustión industrial. Posteriormente, se describe la metodología experimental aplicada, en la que se detalla el diseño del sistema, las condiciones de operación y las técnicas de medición empleadas para obtener datos relevantes sobre el comportamiento de las mezclas GLP-H₂.

Los aspectos teóricos y experimentales se complementan de manera que la revisión del estado del arte y los conceptos fundamentales proporcionen el sustento para el diseño experimental, mientras que el análisis de los resultados posibilita extraer conclusiones acerca de la viabilidad y el desempeño de la tecnología propuesta. Finalmente, se sintetizan los hallazgos y se plantean recomendaciones y perspectivas para futuras investigaciones, estableciendo una conexión directa entre el estudio realizado y los avances necesarios para la transición hacia un sistema energético más sostenible.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es investigar experimentalmente la combustión de la mezcla GLP-H₂ en un quemador industrial montado en horno isotérmico.

Los objetivos específicos son:

1. Realizar un estudio del estado del arte respecto de los procesos de combustión de GLP-H₂.
2. Implementar un quemador industrial en horno isotérmico con sistemas de suministro de GLP, H₂ y aire.
3. Desarrollar pruebas experimentales con distintas concentraciones de H₂ en el GLP, regulando el suministro de aire.
4. Analizar los resultados obtenidos en base a las emisiones y el balance de energía en el horno isotérmico.

2 Los Combustibles Fósiles y su Impacto a Nivel Mundial

Durante décadas, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía a nivel mundial, desempeñando un papel crucial en el desarrollo económico y en la vida cotidiana. Desde su primera utilización masiva durante la revolución industrial, estos recursos energéticos, como el carbón, el petróleo y posteriormente el gas natural, han impulsado avances tecnológicos y transformaciones sociales significativas, consolidándose como el eje central de los sistemas energéticos modernos. Sin embargo, su uso intensivo genera múltiples impactos negativos, especialmente en el ámbito ambiental y de la salud pública. A nivel global, se estima que los combustibles fósiles son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, principales causantes del calentamiento global y del cambio climático.

El consumo de combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, no solo incrementa la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, sino que también contribuye significativamente a la contaminación del aire circundante. Este problema afecta gravemente la salud de las poblaciones, al estar vinculado con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, lo que incrementa la mortalidad y genera costos económicos y sociales elevados.

El consumo de combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, no solo incrementa la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, sino que también contribuye significativamente a la contaminación del aire circundante, ya que, durante su combustión liberan principalmente partículas finas (PM2.5 y PM10), óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO₂). Estas sustancias reaccionan en la atmósfera para formar ozono troposférico y smog, reduciendo la calidad del aire. Este problema afecta gravemente la salud de las poblaciones, al estar vinculado con enfermedades respiratorias/cardiovasculares, lo que incrementa la mortalidad generando así, costos económicos y sociales elevados.

Además, los combustibles fósiles son recursos energéticos NO renovables, lo cual implica que su disponibilidad es limitada. Se estima que, al ritmo actual de consumo, las reservas probadas de petróleo y gas natural podrían agotarse considerablemente para el año 2050, quedando solo un 14% de las reservas de petróleo y un 18% de las de gas (Martins, Felgueiras, Smitkova, & Caetano, 2019). Este escenario plantea desafíos significativos para la seguridad energética global y resalta la necesidad urgente de transitar hacia sistemas energéticos más sostenibles.

La dependencia de los combustibles fósiles también expone a las economías a la volatilidad de los mercados energéticos, lo que puede desencadenar crisis económicas y políticas. En este contexto, la transición hacia energías renovables y la mejora de la eficiencia energética se presentan no solo como una necesidad ambiental, sino también como una estrategia esencial para garantizar un desarrollo sostenible a largo plazo.

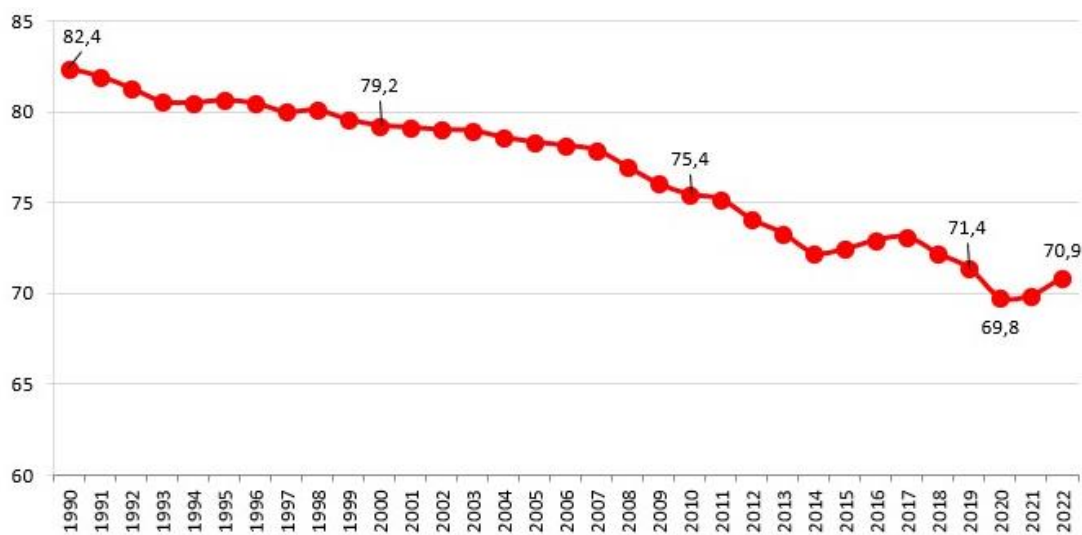


Gráfico 1. Dependencia de los Combustibles Fósiles en la Unión Europea 1990-2022 (Union, 2024).

Del Gráfico 1 se puede ver que, en el año 2022, los combustibles fósiles representan el 70,9 % de la energía bruta disponible en la Unión Europea, reflejando una marcada dependencia de estas fuentes energéticas. No obstante, desde 1990, se observa una tendencia descendente en su participación, reduciéndose en 11,5 puntos porcentuales,

desde el 82,4 % hasta el nivel actual. Este decrecimiento está asociado principalmente al avance en la adopción de energías renovables en el conjunto de la región. Sin embargo, durante los últimos tres años, esta trayectoria descendente ha sido interrumpida por eventos extraordinarios. En 2020, la pandemia de COVID-19 ocasionó una disminución temporal de la demanda energética, reduciendo la proporción de combustibles fósiles al 69,8 %. Posteriormente, con el levantamiento de las restricciones y el repunte de la actividad económica, la dependencia de estas fuentes volvió a incrementarse, alcanzando el 70,9 % en 2022. A esto se suma un contexto internacional adverso, caracterizado por el aumento de los precios de las materias primas energéticas, exacerbado por la invasión rusa de Ucrania, que influyó significativamente en la dinámica energética de la región.

2.1 Estado del Gas Natural Licuado

El Gas Licuado de Petróleo, desde ahora GLP, se consolida como una fuente de energía valiosa utilizada a nivel mundial en diversas aplicaciones industriales y de transporte. Este compuesto, formado principalmente por mezclas de propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), se obtiene a partir del procesamiento de gas natural y la refinación del petróleo crudo. Gracias a sus propiedades, el GLP se almacena en estado líquido a temperatura ambiente bajo una presión relativamente baja (~ 4.5 bar), lo que permite una reducción de su volumen en un factor aproximado de 250 veces.

El GLP es no tóxico, incoloro y prácticamente inodoro, aunque se le añade un olor distintivo para facilitar su detección. Su uso se expande debido a sus bajas emisiones de carbono y azufre en comparación con otros combustibles, lo que lo convierte en una opción más respetuosa con el medio ambiente.

En 2020, el propano ocupa el puesto 80 entre los productos más comercializados a nivel mundial, con un valor total de 27,4 mil millones de dólares. No obstante, las exportaciones de GLP disminuyen en un 13% respecto al año anterior, representando el 0,16% del comercio mundial. Los principales exportadores de GLP durante este año

son Estados Unidos, Qatar, Emiratos Árabes Unidos, Canadá y Arabia Saudita, mientras que los mayores importadores son China, Japón, India, México y Corea del Sur.

La industria petroquímica lidera el crecimiento de la demanda de este combustible fósil, proyectándose que el mercado global aumente a 212 mil millones de dólares en 2028, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 7,3%. Este crecimiento se impulsa por la adopción del GLP como combustible en sectores industriales y comerciales, así como por su uso en el sector automotriz.

En Asia, su demanda experimenta un incremento significativo, siendo un mercado importador neto. China e India se destacan como los principales consumidores, los cuales lo utilizan tanto en aplicaciones petroquímicas como en uso doméstico e industrial. El consumo total de GLP en China asciende a aproximadamente 1,7 millones de barriles por día, de los cuales 0,7 millones son importados (EPCM Holdings, 2022).

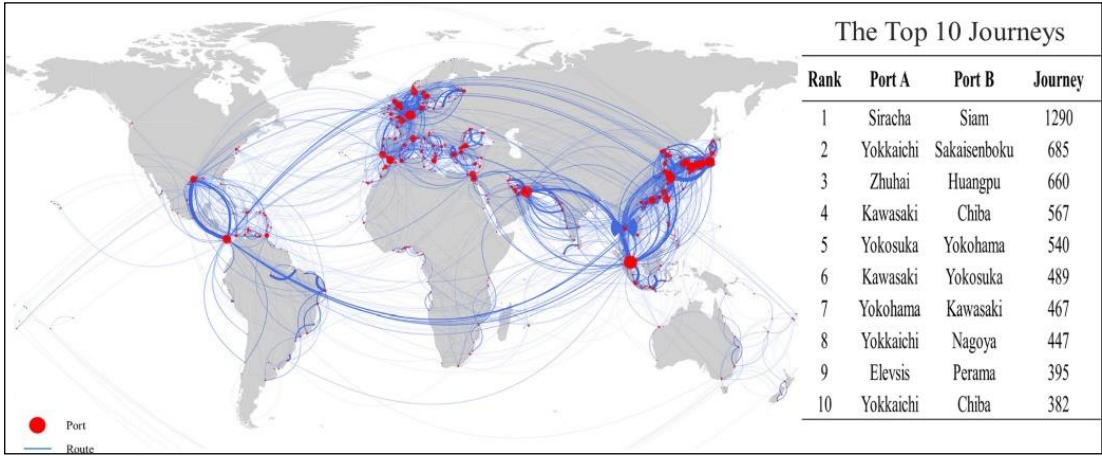


Ilustración 1. Red mundial de Comercio de GLP en 2017 (EPCM Holdings, 2022).

El desarrollo de tecnologías como la deshidrogenación de propano (PDH) facilita la producción de propileno a partir del GLP, lo que impulsa aún más su demanda. El propileno se emplea como insumo esencial en la producción de plásticos y otros

productos químicos, lo que ha motivado un aumento en la construcción de plantas de PDH, especialmente en Asia (Peng , Cheng , & Lu, 2020).

2.2 Propiedades y Características Gas Licuado de Petróleo

Como se menciona anteriormente, el GLP es una mezcla de hidrocarburos livianos, principalmente propano y butano, cuyas proporciones pueden ajustarse según el requerimiento energético de cada región. De acuerdo con el estudio de Tukiman et al. (2018), la composición típica del GLP utilizado es de un 60% de butano y un 40% de propano.

2.2.1 Densidad y Poder Calorífico del GLP

El GLP en fase líquida presenta una densidad de aproximadamente 509 kg/m³, lo que es inferior a la de la gasolina (765 kg/m³). Su poder calorífico es de 46.34 MJ/kg, ligeramente superior al de la gasolina (44.04 MJ/kg), lo que contribuye a una mayor liberación de energía por unidad de masa de combustible (Tukiman, Osman, Fawzi, Mustaffa, & Hanizam, 2018).

2.2.2 Temperatura de Autoignición y Número de Octano

El GLP tiene una temperatura de autoignición de 510 °C, comparado con los 275 °C de la gasolina. Esto sugiere que el GLP es menos propenso a la autoignición, lo que lo convierte en un combustible más seguro en condiciones de altas temperaturas. (Tukiman, Osman, Fawzi, Mustaffa, & Hanizam, 2018).

La información mencionada, de manera resumida, se puede ver en la Tabla 1. Principales Propiedades del GLP ..

Tabla 1. Principales Propiedades del GLP (Tukiman, Osman, Fawzi, Mustaffa, & Hanizam, 2018).

Características	GLP
Composición Química	C_4H_{10} (Butano)60% – C_3H_8 (Propano)40%
Densidad Líquida (kg/m^3)	509
Poder Calorífico (MJ/kg)	46.34
Punto de Ebullición ($^{\circ}C$)	-42
Punto de Autoencendido ($^{\circ}C$)	510
Temperatura de Llama ($^{\circ}C$)	1980
Velocidad de Llama (m/s)	0.4
Relación Estequiométrica Aire/Combustible (kg/kg)	15.8
Número de Octano	111

2.3 Influencia de los Gases Productos en la Transferencia de Calor por Radiación

En los procesos de combustión, los gases como el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua (H_2O), desempeñan un papel fundamental en la transferencia de calor por radiación. Estos gases tienen la capacidad de absorber y emitir energía en longitudes de onda específicas del espectro infrarrojo, lo que los convierte en actores principales en la emisión térmica de las llamas. La influencia de su concentración y sus propiedades espectrales es determinante para entender su contribución al balance energético.

La emisión de estos gases está condicionada por factores como la concentración, la temperatura y la presión parcial. En particular, el incremento de temperatura amplifica de manera significativa su emisión, mientras que las altas concentraciones pueden llevar a efectos de saturación, donde el incremento adicional de radiación se torna marginal.

2.3.1 Comportamiento Radiativo del CO_2

El CO_2 es un gas con bandas de absorción prominentes centradas en $4.3\ \mu\text{m}$ y $15\ \mu\text{m}$, las cuales son responsables de su elevada capacidad de emitir radiación en llamas de alta temperatura. Estas bandas espectrales se caracterizan por su intensidad en combustiones que generan temperaturas superiores a $1500\ \text{K}$. A concentraciones bajas, las bandas son más definidas y su contribución al flujo radiativo aumenta de forma proporcional a la cantidad de dióxido de carbono presente.

A altas concentraciones, el comportamiento tiende a saturarse debido al solapamiento de las bandas espectrales, lo que limita su emisión incremental. En aplicaciones prácticas, se observa que el CO_2 contribuye entre un 30% y un 40% de la radiación total emitida por una llama en condiciones normales de combustión (Hottel & Egbert, 1941). Este porcentaje puede variar dependiendo de la configuración de la llama y el tipo de combustible utilizado.

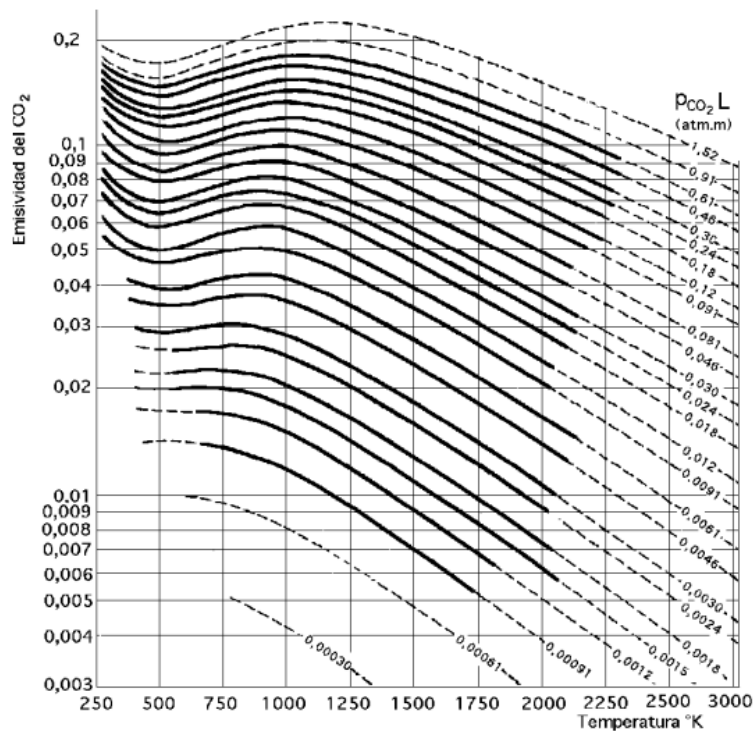


Gráfico 2. Emisividad CO_2 - Hottel.

2.3.2 Comportamiento Radiativo del H₂O

El H₂O presenta un espectro de emisión más amplio y complejo debido a su estructura molecular, la cual le permite interactuar con un rango más diverso de longitudes de onda. Sus principales bandas espectrales se encuentran alrededor de 2.7 μm, 6.3 μm y 20 μm, y su contribución a la radiación de la llama se incrementa significativamente en combustiones de combustibles ricos en hidrógeno.

En sistemas de combustión a alta temperatura, el vapor de agua se distribuye de manera uniforme en las zonas periféricas de la llama, amplificando la emisión radiativa total. Su interacción con el CO₂ genera efectos de ensanchamiento espectral que mejoran la transferencia de calor. Estudios experimentales reportan que el vapor de agua puede representar hasta el 60% de la radiación total en llamas con alto contenido de hidrógeno (Hottel & Egbert, 1941).

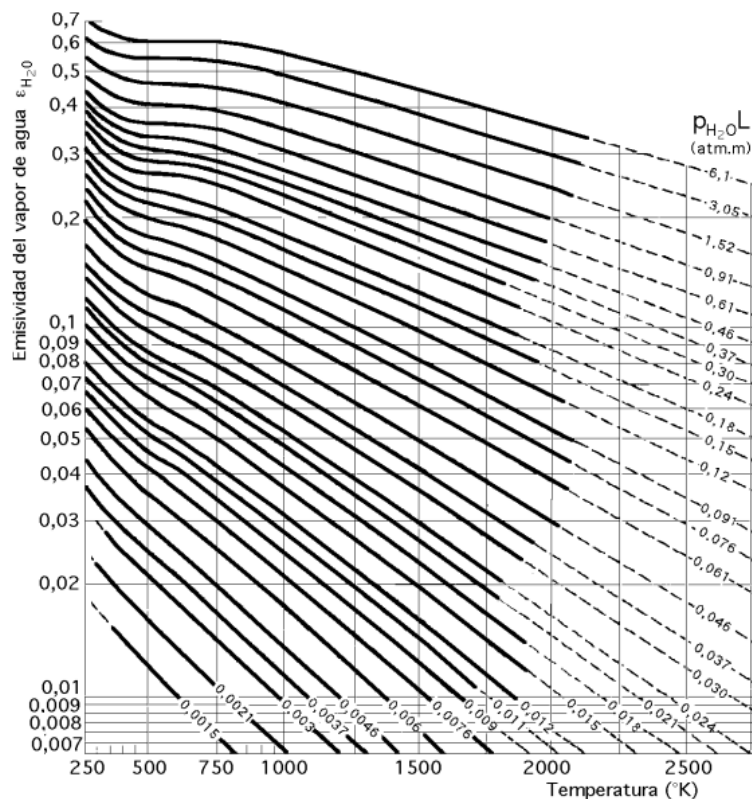


Gráfico 3. Emisividad Vapor de Agua - Hottel.

2.3.3 Influencia de las Concentraciones de CO₂ y H₂O en la Radiación de la Llama

La emisividad de los gases producto de la combustión se representa adecuadamente mediante la suma de las emisividades individuales de cada gas, descontando la superposición entre ellos:

$$\varepsilon_{gases} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon \quad (2.3.1)$$

Donde ε_{CO_2} y ε_{H_2O} representan las emisividades del dióxido de carbono y del vapor de agua, respectivamente, cuyos valores pueden obtenerse en el **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.**. Por otro lado, $\Delta\varepsilon$ responde a la superposición previamente mencionada, la cual se puede calcular mediante la correlación propuesta por Leckner para la emisividad total, la cual no se detalla en el presente documento.

Por otro lado, la variación de la radiación emitida por la llama está estrechamente ligada a las concentraciones de los gases mencionado en los últimos subcapítulos. En combustiones completas, donde se maximizan las proporciones de estos gases, la emisión radiativa alcanza su máximo potencial debido a la combinación de efectos individuales y de interacción espectral. Por el contrario, en combustiones incompletas, la generación insuficiente de gases reduce significativamente la transferencia de calor por radiación. Las llamas con gradientes térmicos pronunciados, características de combustibles hidrocarbonados, presentan picos de emisión en zonas específicas, lo que sugiere una correlación directa entre la distribución de temperatura y la intensidad. Además, el uso de combustibles con alto contenido de carbono genera mayores concentraciones de CO₂ amplificando la radiación total.

En aspectos generales, es consistente plantear que la emisión de radiación de CO₂ y H₂O aumenta con su concentración, pero con diferencias significativas en su

comportamiento. En el caso del CO_2 , el incremento de concentración intensifica inicialmente su emisión, hasta alcanzar un punto de saturación donde el aumento adicional tiene un impacto marginal debido al solapamiento de sus bandas espectrales. Por el contrario, si su concentración disminuye, la emisión se reduce proporcionalmente. Para el H_2O , el aumento de su concentración amplifica la radiación térmica gracias a su amplio espectro y su interacción con el CO_2 , mientras que una disminución de H_2O reduce considerablemente su radiación.

3 Hidrógeno como Combustible

El hidrógeno, uno de los elementos más abundantes en el universo, destaca por su notable densidad energética en términos de masa. Para contextualizar, el calor liberado por cada unidad de masa de hidrógeno es aproximadamente tres veces superior al generado por la gasolina convencional. Asimismo, constituye una fuente de energía limpia y renovable, ya que su combustión genera únicamente vapor de agua. Por esta razón, la energía del hidrógeno se considera una solución viable para satisfacer las futuras necesidades energéticas, especialmente en vista de los problemas actuales de contaminación ambiental derivados del uso de combustibles fósiles.

En 2022, la demanda mundial de hidrógeno alcanzó aproximadamente 95 millones de toneladas, con un aumento del 3% respecto al año anterior. Las proyecciones actuales estiman que esta demanda se incrementará significativamente, llegando a 136 millones de toneladas para 2040 y cerca de 520 millones de toneladas en 2070 (Fernández R. , 2024). No obstante, en la actualidad, más del 90 % del hidrógeno producido a nivel mundial proviene del reformado de combustibles fósiles, un proceso químico que consiste en extraer hidrógeno a partir de hidrocarburos, como el gas natural, mediante una reacción con vapor de agua a altas temperaturas. Este método, aunque eficiente desde el punto de vista técnico, genera cerca de 900 millones de toneladas de dióxido de carbono cada año (Renewable Energy Magazine, 2024). Este método tradicional contrasta con los esfuerzos emergentes de producción de hidrógeno "de bajas

emisiones", que actualmente representan solo el 0,6% de la producción total, y que se consideran fundamentales para sectores difíciles de descarbonizar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia (Fondo Monetario Internacional, 2024)). Sin embargo, se proyecta una reducción de costos significativa en la producción de hidrógeno verde (3.2), del 40 % al 80 % hacia 2030, impulsada por subsidios públicos e innovación tecnológica (IRENA, 2020). Asimismo, planes como el Pacto Verde Europeo contemplan la instalación de 40 GW de capacidad de producción de hidrógeno verde para 2040, con el objetivo de aumentar su competitividad y reducir su huella de carbono (Buttler & Spliethoff, 2018).

3.1 Relevancia del Hidrógeno como Fuente de Energía Alternativa

Este capítulo examina las principales cualidades que posicionan al hidrógeno como una fuente de energía alternativa clave. Se analiza su abundancia y capacidad para generar energía limpia, su elevada densidad energética como combustible eficiente, su relevancia en el almacenamiento, transporte energético y su papel como vector multisectorial en distintos ámbitos económicos.

3.1.1 Abundancia y Limpieza del Hidrógeno

Como se menciona en el inicio del capítulo, el hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo. Cuando se produce a partir de fuentes con bajas emisiones de carbono o en combinación con técnicas de captura de carbono, se convierte en un combustible limpio que, al ser utilizado en pilas de combustible, solo emite vapor de agua.

3.1.2 Densidad Energética del Hidrógeno

El hidrógeno es reconocido por su elevada densidad energética específica, alcanzando aproximadamente 120 MJ/kg, lo que representa un valor casi tres veces superior al de

los combustibles fósiles convencionales como la gasolina, cuyo contenido energético es de alrededor de 44 MJ/kg (Europe, 2023). Esta característica intrínseca convierte al hidrógeno en un candidato altamente atractivo para aplicaciones donde el peso juega un papel crucial, como en el transporte pesado y la aviación, sectores que requieren maximizar la eficiencia energética mientras minimizan el peso de combustible transportado.

Sin embargo, es importante distinguir entre la densidad energética gravimétrica y la densidad energética volumétrica. Si bien el hidrógeno tiene una notable ventaja en términos de energía por unidad de masa, presenta un reto significativo en términos de energía por unidad de volumen. A temperatura y presión estándar (0 °C y 1 bar), la densidad del hidrógeno es extremadamente baja, aproximadamente 0,089 kg/m³, lo que resulta en una densidad energética volumétrica de apenas 8 MJ/L. En comparación, la gasolina tiene una densidad energética volumétrica de aproximadamente 32 MJ/L, lo que significa que el hidrógeno en estado gaseoso contiene solo una cuarta parte de la energía que la gasolina por unidad de volumen (Fundación Renovables, 2021). Esta diferencia implica que, para aplicaciones móviles, es necesario recurrir a técnicas de almacenamiento como la compresión a altas presiones (35-70 MPa) o la licuefacción a temperaturas criogénicas (~20 K) para incrementar la densidad energética volumétrica. No obstante, estos procesos de almacenamiento consumen entre un 11% y un 30% del contenido energético total del hidrógeno, dependiendo del método empleado (Fernández, 2005).

La licuefacción del hidrógeno, aunque más densa energéticamente en términos volumétricos (hasta 71 MJ/L), acarrea desafíos tecnológicos y energéticos. Aproximadamente el 30% de la energía contenida en el hidrógeno se utiliza para mantener su estado líquido, lo que impacta negativamente la eficiencia energética total del sistema (Onorati, y otros, 2022). Además, la volatilidad del hidrógeno líquido y la necesidad de almacenamiento en condiciones criogénicas añaden complejidad tanto en términos de infraestructura como de seguridad.

El uso de materiales de almacenamiento en estado sólido, como los hidruros metálicos, ha mostrado avances prometedores en términos de densidad gravimétrica y volumétrica, alcanzando una capacidad de almacenamiento de hasta el 7,6% en peso. Sin embargo, estos métodos requieren temperaturas operativas elevadas (aproximadamente 600 K) para liberar el hidrógeno almacenado, lo que limita su aplicabilidad en algunas aplicaciones prácticas.

En conclusión, si comparamos el hidrógeno y el GLP con la gasolina convencional, estos presentan ventajas significativas sobre en varios aspectos energéticos y ambientales (Tabla 2). El hidrógeno tiene un poder calorífico gravimétrico (120 MJ/kg) un 159% y 172% mayor, que el que tienen el GLP (46.34 MJ/kg) y la gasolina (44.04 MJ/kg), respectivamente, lo cual lo convierte en un combustible más eficiente por unidad de masa. Sin embargo, su densidad energética volumétrica (8 MJ/L) es un 68% menor que la del GLP (25.3 MJ/L) y un 75% inferior a la gasolina (32 MJ/L), lo que implica mayores costos en almacenamiento para aplicaciones prácticas. En términos de seguridad, el hidrógeno presenta un punto de autoignición un 15% más alto que el GLP y 113% más alto que la gasolina, lo que reduce el riesgo de autoencendido en altas temperaturas. Además, el número de octano del hidrógeno (>120) es un 8% superior al del GLP (111) y un 26% mayor que el de la gasolina (95).

Tabla 2. Principales Propiedades: Hidrógeno en Estado Gaseoso, GLP y la Gasolina convencional.

Características	Hidrógeno	GLP	Gasolina
Composición Química	H_2	C_4H_{10} (Butano) 60% – C_3H_8 (Propano) 40%	C_8H_{18}
Densidad Líquida (kg/m^3)	0.09@ 0°C, 1 bar	509	765
Poder Calorífico (MJ/kg)	120.0	46.34	44.04
Poder Calorífico (MJ/l)	8	25.3	32.0
Punto de Ebullición (°C)	-252.9@ 1bar	-42	30 – 210
Punto de Autoencendido (°C)	585	510	275
Temperatura de Llama (°C)	2107	1980	1720
Velocidad de Llama (m/s)	1.85	0.4	0.35
Relación Estequiométrica Aire/Combustible (kg/kg)	34.3	15.8	14.7

3.1.3 Incidencia del Hidrógeno en el Almacenamiento de Energía

Más adelante se abordarán los métodos de producción de esta fuente energética. No obstante, es posible adelantar que este gas puede obtenerse a través de diversos procesos, destacando la electrólisis del agua alimentada por excedentes de generación eléctrica. Este método ha adquirido relevancia, en particular, por su integración con fuentes renovables, ya que permite convertir electricidad que, de otro modo, sería desaprovechada, como sucede con el excedente de energía eólica o solar no utilizado en tiempo real. La producción de este gas a partir de energías renovables no solo contribuye a mitigar la intermitencia inherente a estas fuentes, sino que también ofrece una solución de largo plazo para el almacenamiento de energía a gran escala, permitiendo su uso durante periodos de baja generación eléctrica.

El proceso de almacenamiento puede realizarse de manera física o química. Las tecnologías de almacenamiento físico incluyen su compresión a alta presión en estado gaseoso, licuefacción criogénica a bajas temperaturas, o incluso el confinamiento en cavernas subterráneas, como salares o acuíferos. Estas opciones ofrecen una capacidad considerable para almacenar grandes volúmenes de energía, haciéndolas comparables, en términos de utilidad, con otras tecnologías de almacenamiento como las baterías de flujo o el almacenamiento por bombeo (Preuster, Alekseev, & Wasserscheid, 2017).

Además, se consideran aplicaciones importantes como medio para reducir la congestión en las redes eléctricas, al ser capaz de absorber el excedente de energía durante los momentos pico y liberarla cuando la demanda lo requiere. La capacidad de actuar como una reserva energética para la estabilización de redes con alta penetración de energías renovables lo convierte en un componente crítico para los sistemas eléctricos modernos. Este tipo de almacenamiento, debido a su naturaleza química, permite que la energía almacenada se utilice no solo para la generación de electricidad

mediante celdas de combustible, sino también como combustible en aplicaciones industriales o para su conversión en otros derivados como el amoníaco o el metano sintético.

Por otro lado, recientemente, se han investigado también las mezclas de hidrógeno con amoníaco como alternativa para el almacenamiento y transporte de energía. Si bien el amoníaco puede reducir la reactividad de las mezclas debido a su menor velocidad de llama y límites de inflamabilidad más estrechos, su combinación con hidrógeno puede ofrecer características de combustión similares a las de los combustibles fósiles. Sin embargo, el uso del amoníaco presenta el desafío de la producción significativa de NOx, lo que exige el desarrollo de estrategias para controlar estas emisiones (Carpuso, Stefanizzi, Torresi, & Camporeale, 2022).

En cuanto a la eficiencia energética del ciclo completo de almacenamiento, es importante destacar que la conversión de electricidad a gas (Power-to-Hydrogen) y su reconversión a electricidad mediante celdas de combustible implica pérdidas energéticas significativas. Según estudios recientes, la eficiencia del ciclo puede variar entre un 30 % y un 50 %, dependiendo de la tecnología utilizada, con pérdidas adicionales derivadas de los procesos de compresión, licuefacción y transporte (Skordoulas, Koytsoumpa, & Karellas, 2022). No obstante, su capacidad para almacenar energía durante largos períodos y en grandes cantidades le otorga una ventaja frente a otras soluciones de almacenamiento que presentan limitaciones en cuanto a la capacidad y duración.

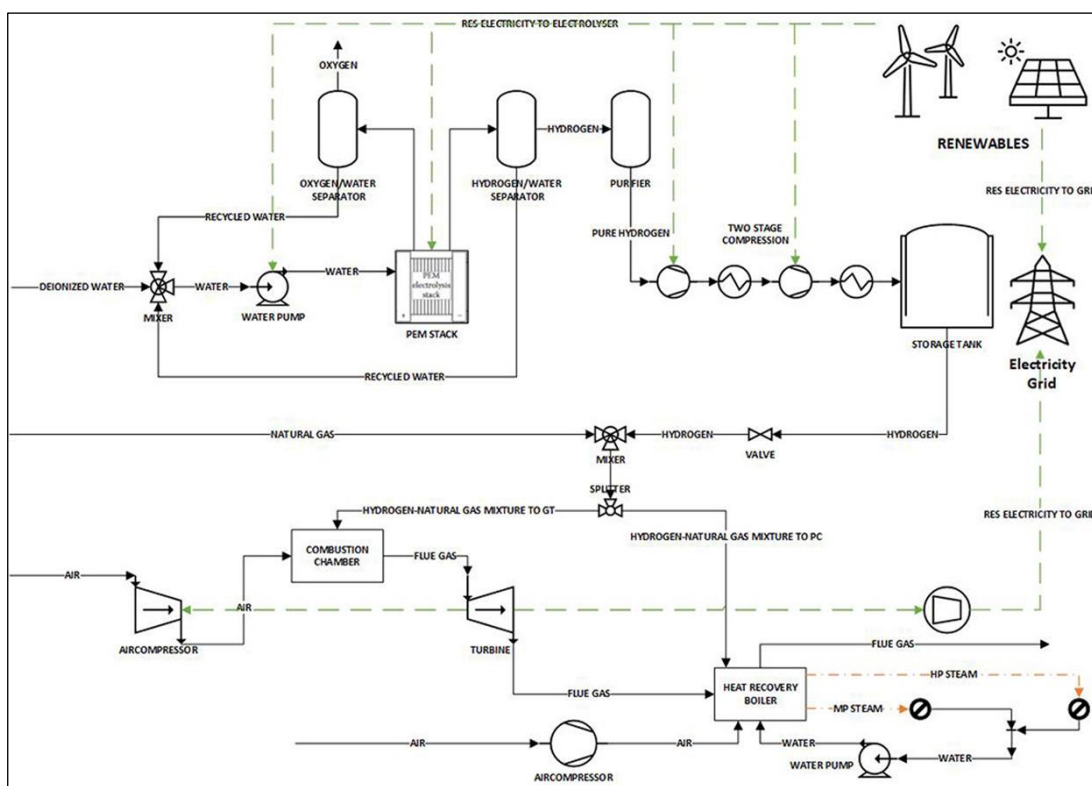


Ilustración 2. Diagrama de flujo del proceso para la unidad Power-to-H2-to-CHP.

Finalmente, es necesario resaltar que el almacenamiento no está exento de desafíos tecnológicos y económicos. El coste de producción de hidrógeno verde (producido por electrólisis alimentada con energías renovables) es actualmente más alto en comparación con otras formas de almacenamiento y con el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles (hidrógeno gris o azul). A pesar de ello, se espera que la disminución en los costos de producción de electricidad renovable y los avances tecnológicos en la producción, transporte y almacenamiento, contribuyan a la competitividad del hidrógeno verde en el mediano plazo.

3.1.4 El Hidrógeno como Vector Energético Multisectorial

Las proyecciones mencionadas de crecimiento en la demanda de hidrógeno (3) están estrechamente relacionadas con su capacidad de ser empleado en una amplia gama de aplicaciones energéticas, abarcando distintos sectores económicos y productivos. Esta

versatilidad se fundamenta en propiedades clave, como su alta densidad energética por unidad de masa, la ausencia de emisiones contaminantes durante su uso y su capacidad de almacenamiento en diversas formas, tales como gas comprimido, líquido o metal hidruros, lo que permite su adaptación a diferentes requerimientos.

3.1.4.1 Aplicaciones del Hidrógeno en la Generación Eléctrica

En el ámbito de la generación de energía eléctrica, el hidrógeno se emplea tanto en celdas de combustible como en sistemas de combustión en turbinas y motores.

Las celdas de combustible convierten el hidrógeno directamente en electricidad mediante un proceso electroquímico, con agua como único subproducto, logrando una eficiencia energética de hasta el 60%, cifra significativamente superior a la de las tecnologías de generación eléctrica basadas en combustibles fósiles (Lamy, 2016). Este método, además de ser eficiente, elimina completamente las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno (NOx), cuando el hidrógeno utilizado se produce a partir de fuentes renovables.

Por otro lado, el hidrógeno también se emplea en sistemas de combustión, como en turbinas de gas. En este contexto, puede utilizarse puro o mezclado con combustibles convencionales para reducir las emisiones de carbono. Por ejemplo, en mezclas con hidrógeno de hasta un 30% en volumen, es posible mantener un índice de equivalencia constante sin alterar significativamente la relación aire-combustible ni comprometer los límites operativos de temperatura. A porcentajes mayores al 30%, se recomienda disminuir el índice de equivalencia para controlar la temperatura mediante dilución, garantizando la estabilidad del sistema y minimizando el impacto térmico (Carpuso, Stefanizzi, Torresi, & Camporeale, 2022).

3.1.4.2 Hidrógeno en la Movilidad

En el sector del transporte, el hidrógeno se emplea en vehículos propulsados por celdas de combustible, ofreciendo una alternativa viable a los combustibles fósiles tradicionales. A diferencia de los vehículos de combustión interna, los vehículos de

hidrógeno no emiten contaminantes atmosféricos, siendo una opción viable para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte.

Los vehículos de hidrógeno presentan ventajas significativas en términos de densidad energética y tiempos de recarga. Por ejemplo, los camiones impulsados por hidrógeno tienen rangos de hasta 800 km y tiempos de recarga de aproximadamente 10 minutos, en contraste con los tiempos de carga de varias horas requeridos por los vehículos eléctricos de batería, dependiendo del sistema de carga empleado (Pratt, Luzi, & Freeburg, 2017).

En aplicaciones comerciales, estas características posicionan al hidrógeno como una solución estratégica para el transporte de largo recorrido, especialmente en camiones y autobuses. Además, a diferencia de los vehículos eléctricos con baterías de iones de litio, los vehículos de hidrógeno no enfrentan limitaciones significativas asociadas con el agotamiento de materias primas, como el litio, ni generan impactos ambientales críticos relacionados con la minería de estos recursos.

3.1.4.3 Implementación del Hidrógeno en Procesos Industriales

La industria es otro sector donde el hidrógeno puede desempeñar un papel esencial, especialmente en procesos que requieren altas temperaturas, indispensables para reacciones químicas de alta energía, o atmósferas reductoras, entornos que favorecen la eliminación de oxígeno de compuestos mediante agentes químicos o atmósferas reductoras. Un ejemplo prominente es su uso en la producción de amoníaco (NH_3) mediante el proceso Haber-Bosch, que es clave para la producción de fertilizantes. Además, el hidrógeno es empleado en la refinación de combustibles fósiles y en la producción de metanol, siendo esencial en la síntesis de una amplia gama de productos químicos. La implementación de hidrógeno verde (3.2) en estas aplicaciones industriales puede reducir significativamente la huella de carbono de estos procesos.

3.1.4.4 Hidrógeno en el Sector Residencial

En el sector residencial, este comburente tiene el potencial de ser utilizado tanto para calefacción como para refrigeración. Un ejemplo es su uso en sistemas combinados de

calor y energía (CHP), donde una celda de combustible proporciona electricidad y el calor residual se aprovecha para calefacción o calentamiento de agua (Aki, y otros, 2016). Este tipo de sistemas puede mejorar significativamente la eficiencia energética de los hogares y reducir las emisiones de CO₂ en áreas urbanas. Adicionalmente, el hidrógeno puede ser almacenado para su uso nocturno o durante periodos de baja generación renovable, optimizando la autosuficiencia energética en viviendas con paneles solares.

3.2 Producción de Hidrógeno

La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras para la generación de energía limpia. Existen múltiples tecnologías para la producción de hidrógeno, muchas de las cuales aprovechan recursos naturales abundantes, como el agua, mediante diferentes procesos de división de agua (water splitting), así como métodos biológicos y termoquímicos. Estas tecnologías, resumidas en la Ilustración 3, incluyen la electrólisis, fotólisis, termólisis y procesos basados en biomasa, y son fundamentales en la transición hacia un sistema energético más sostenible.

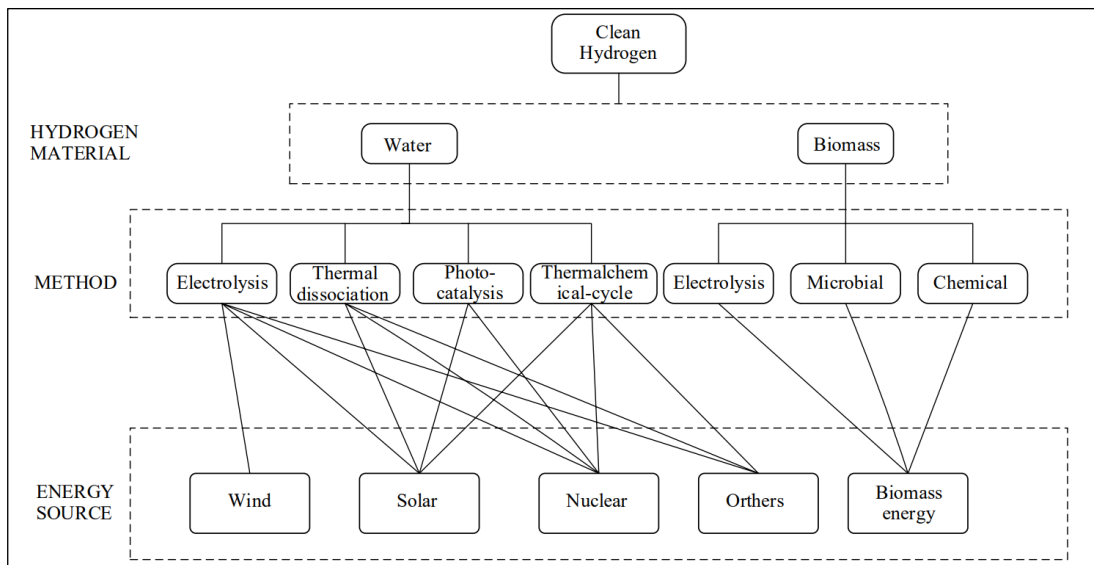


Ilustración 3. Tecnologías de Producción de Hidrógeno Renovable (Song, 2005).

Entre las variantes de este combustible, el hidrógeno verde se destaca por su producción mediante electrólisis del agua usando electricidad proveniente de fuentes renovables, como la solar o la eólica, lo que permite obtener un combustible sin emisiones de carbono. Esto lo diferencia de otras formas de hidrógeno, como el hidrógeno gris, que se genera a partir de combustibles fósiles, especialmente mediante el reformado de gas natural con vapor, un proceso que emite grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2).

Por su parte, el hidrógeno azul sigue un método de producción similar al hidrógeno gris, pero incluye la captura y almacenamiento de carbono (CCS) para reducir las emisiones de CO_2 asociadas. Sin embargo, aún depende de fuentes de energía no renovables. El hidrógeno marrón, por otro lado, se obtiene a partir de la gasificación del carbón, lo que implica una considerable huella de carbono debido a la combustión de este recurso sin mecanismos de mitigación de emisiones.

De esta manera, mientras que el hidrógeno gris, azul y marrón están ligados a procesos que generan emisiones de gases de efecto invernadero, el hidrógeno verde representa la opción más sostenible desde un punto de vista ambiental, aunque su producción enfrenta retos en términos de costos y eficiencia energética (Ilustración 4).

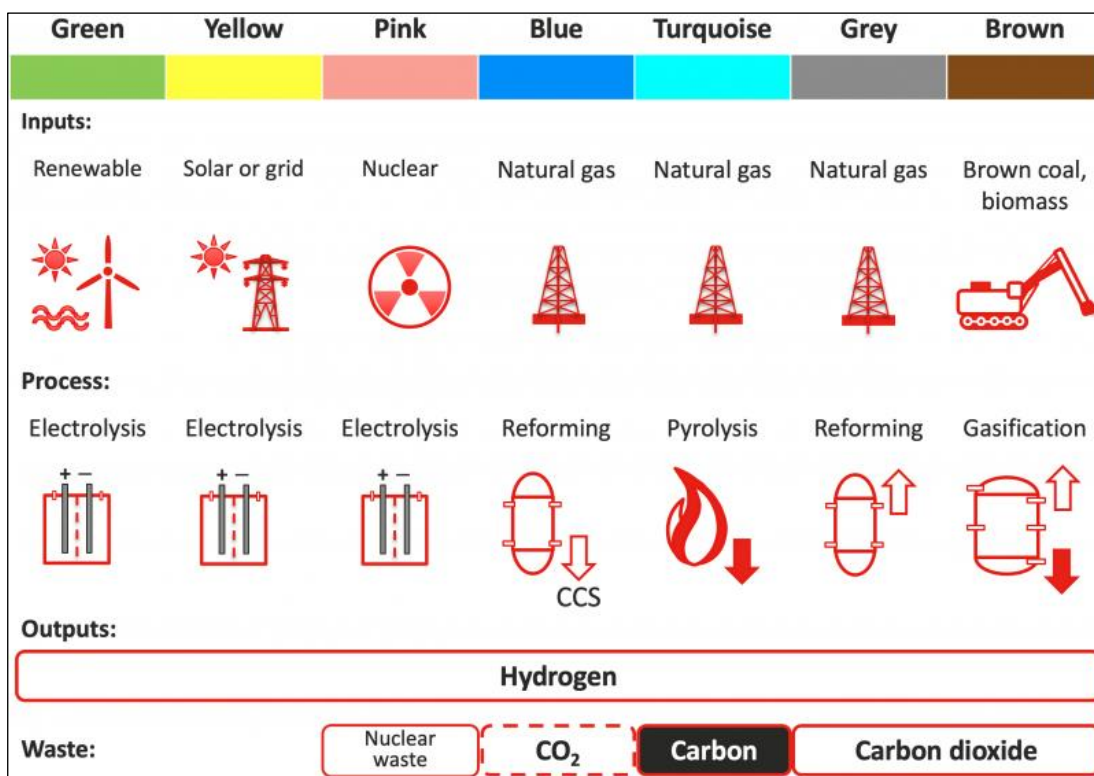


Ilustración 4. Los Colores del Hidrógeno: Inputs, Process, Outputs and Waste.

3.2.1 División de Agua para la Producción de Hidrógeno

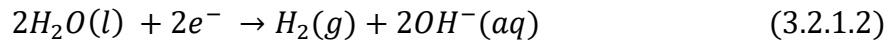
3.2.1.1 Electrólisis

La electrólisis es una de las técnicas más investigadas para la producción de hidrógeno a partir de agua, debido a su simplicidad y su capacidad para generar hidrógeno de alta pureza cuando se emplea energía eléctrica proveniente de fuentes renovables como la energía solar o eólica. La reacción global que describe este proceso es:

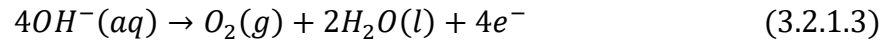


En este proceso, el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica a través de dos electrodos sumergidos en una solución acuosa. La reacción de reducción ocurre en el cátodo, mientras que la oxidación se lleva a cabo en el ánodo:

- Cátodo (reducción):



- Ánodo (oxidación):



Las tecnologías más comunes de electrólisis incluyen la electrólisis alcalina, los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM), los de membrana de intercambio aniónico (AEM) y las celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC). Cada una de estas tecnologías presenta diferentes ventajas en términos de eficiencia y costos operativos. Los electrolizadores SOEC, por ejemplo, destacan por su alta eficiencia al operar a temperaturas elevadas (700-1000 °C), lo que favorece la cinética de la reacción y permite un menor consumo energético (Zainal, y otros, 2024).

3.2.1.2 Fotólisis

La fotólisis o división fotoquímica del agua utiliza energía luminosa, generalmente solar, para disociar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se realiza mediante fotocatalizadores que absorben la radiación solar y catalizan la separación del agua. La reacción general es similar a la de la electrólisis, con la diferencia, en que este caso, la energía proviene de la luz:



Los catalizadores empleados, como el ZnS/CdS, han demostrado producir hasta 16.1 mmol de H_2 por gramo de fotocatalizador tras 180 minutos de irradiación (Zainal, y otros, 2024). Sin embargo, la eficiencia de conversión de la energía solar en hidrógeno aún es limitada, lo que ha llevado a una intensa investigación en materiales y configuraciones de reactores para mejorar este proceso.

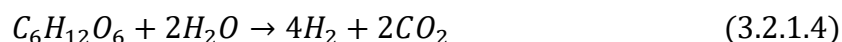
3.2.1.3 Termólisis

La termólisis de agua consiste en la descomposición térmica directa de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno a altas temperaturas, generalmente superiores a 2000 °C. A estas temperaturas, la reacción de disociación del agua es endotérmica.

Este método, aunque conceptualmente simple, enfrenta desafíos técnicos significativos debido a la necesidad de mantener temperaturas extremadamente altas y a la complejidad de separar los productos a dichas condiciones. Una de las alternativas para mejorar la viabilidad de la termólisis es su combinación con procesos termoquímicos, como ciclos de sulfuro de hidrógeno (HyS), que permiten realizar la disociación en etapas y a temperaturas más manejables.

3.2.2 Producción de Hidrógeno a partir de Biomasa

La biomasa constituye otra fuente potencial para la producción de hidrógeno, utilizando tanto rutas biológicas como termoquímicas. Entre las rutas biológicas, la fermentación oscura y la fotofermentación son las más destacadas. La fermentación oscura, por ejemplo, utiliza microorganismos para descomponer compuestos orgánicos bajo condiciones anaeróbicas, produciendo hidrógeno como uno de los subproductos:



El rendimiento de la producción de hidrógeno depende de múltiples factores, como la temperatura, el pH y la presencia de catalizadores biológicos o aditivos. Estudios recientes han demostrado que la adición de nanopartículas de Fe₃O₄ puede incrementar significativamente la producción de hidrógeno, alcanzando volúmenes de hasta 937 mL/L en condiciones óptimas (Zainal, y otros, 2024).

3.3 Mezclas de Hidrógeno con Gas Licuado Petróleo

3.3.1 Desafíos y Oportunidades en las Mezclas de Hidrógeno con Combustibles Convencionales

El estudio de las mezclas de hidrógeno con combustibles convencionales, como el gas natural y otros hidrocarburos, se constituye como un aspecto clave en la transición hacia una economía baja en carbono. La integración del hidrógeno en los sistemas energéticos existentes permite aprovechar la infraestructura de distribución y almacenamiento de combustibles fósiles, la cual ha sido desarrollada y optimizada a lo largo de décadas (Lozano-Martín, Moreau, & Chamorro, 2022) . Esta sinergia facilita una adopción más rápida de tecnologías basadas en hidrógeno, al reducir la necesidad de construir redes completamente nuevas, lo que contribuye a la disminución de los costos iniciales y a una implementación más eficiente.

En paralelo, las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables presentan distintos niveles de madurez tecnológica y eficiencia, lo cual influye en su integración con los combustibles tradicionales. La electrólisis, especialmente con celdas de óxido sólido (SOEC), alcanza eficiencias cercanas al 80%; sin embargo, su implementación depende de la disponibilidad de electricidad renovable a bajo costo (Lozano-Martín, Moreau, & Chamorro, 2022). En contraste, métodos como la fotólisis y la termólisis, aunque prometedores, requieren aún mejoras significativas en eficiencia y una reducción de costos para ser competitivos a gran escala. La biomasa, por su parte, ofrece una opción viable para la producción de hidrógeno en regiones con abundancia de recursos agrícolas y forestales, aunque enfrenta desafíos relacionados con la gestión de residuos y la optimización de la conversión de la materia orgánica. Estos factores condicionan la disponibilidad de hidrógeno a precios competitivos, lo cual resulta determinante para su uso en mezclas con otros combustibles.

Sin embargo, la utilización de estas mezclas de hidrógeno y otros combustibles plantea desafíos técnicos, especialmente en términos de compatibilidad con las infraestructuras

actuales. Por ejemplo, al incorporar hidrógeno en mezclas con gas natural, se requiere asegurar la integridad de las tuberías y equipos, evitando fenómenos como la fragilización del acero (embrittlement), particularmente cuando las concentraciones de hidrógeno son elevadas (Nazir, y otros, 2020). No obstante, mediante un control adecuado de las proporciones de hidrógeno y de las condiciones de operación, es posible mitigar estos efectos, permitiendo el uso de la infraestructura existente con modificaciones mínimas.

El desarrollo de modelos termodinámicos precisos para “blends” de hidrógeno representa otro desafío relevante. Estos modelos resultan esenciales para predecir el comportamiento de las mezclas bajo diferentes escenarios de presión y temperatura, lo cual es fundamental para el diseño y la optimización de procesos de transporte y almacenamiento. Sin embargo, la disponibilidad de datos experimentales precisos sobre las propiedades de estas mezclas, tales como el equilibrio de fases y la densidad, sigue siendo limitada, lo que impone restricciones al desarrollo de modelos exactos. A pesar de estas limitaciones, los avances en la investigación y la mejora continua de estos modelos ofrecen una oportunidad significativa para ampliar el conocimiento en este ámbito y facilitar una integración más eficiente del hidrógeno en sistemas energéticos.

La relevancia del estudio de estas mezclas se manifiesta en su potencial para mejorar la flexibilidad de la red de suministro de energía. La capacidad del hidrógeno para ser incorporado en mezclas con otros combustibles permite una transición gradual hacia un sistema más limpio, utilizando la infraestructura existente mientras se desarrollan nuevas tecnologías y se incrementa la producción de hidrógeno verde. Asimismo, estas mezclas permiten diversificar el suministro energético, incrementando la resiliencia frente a variaciones en la disponibilidad de fuentes renovables. Estos aspectos subrayan la importancia de continuar investigando en esta área, ya que un desarrollo adecuado podría convertirse en un elemento fundamental para la descarbonización de sectores industriales y energéticos.

3.3.2 Estabilidad de la Combustión en Mezclas H₂-GLP

La incorporación de hidrógeno en sistemas de combustión de GLP afecta de manera significativa la estabilidad de la llama y la operatividad de los equipos. En un estudio realizado en la Universidad Técnica Federico Santa María (Valparaíso, Chile), se examina la estabilidad de la combustión de mezclas de H₂-GLP en tres tipos de sistemas: un calentador de gas, un calentador de agua y un quemador de medios porosos. Los resultados indican que la combustión permanece estable hasta un 44% de hidrógeno en el calentador de gas, un 68% en el calentador de agua y un 58% en el quemador de medios porosos (Munoz-Herrera, y otros, 2023)

Por otro lado, en el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Babilonia (Babilonia, Irak) analizan la velocidad de combustión laminar en mezclas de H₂-GLP, encontrando que el efecto de la adición de hidrógeno se hace notable cuando la proporción de H₂ excede el 60% (Sh. Yasiry & A.K. Shahad, 2016). Este aumento en la fracción de hidrógeno incrementa la reactividad de la mezcla, lo que facilita la propagación de la llama y mejora la estabilidad en condiciones controladas, pero también puede generar riesgos de inestabilidad, como retrocesos de llama, cuando se supera el límite seguro de operación de cada dispositivo.

3.3.3 Eficiencia Térmica de Sistemas de Combustión H₂-GLP

La eficiencia térmica de los sistemas de combustión alimentados con mezclas de H₂ y GLP muestra variaciones significativas según el tipo de sistema utilizado y la proporción de hidrógeno presente en la mezcla. En el estudio de Muñoz-Herrera et al. (2023), se reporta que tanto el calentador de gas como el calentador de agua experimentan una disminución de la eficiencia térmica a medida que aumenta la fracción de H₂ en la mezcla, alcanzando una reducción de hasta un 10% y un 5%, respectivamente, para fracciones de H₂ cercanas al 44% y al 68%. Esta disminución se atribuye a la menor densidad energética volumétrica del hidrógeno en comparación con el GLP, lo cual requiere un mayor flujo de combustible para mantener el mismo nivel de potencia térmica.

En contraste, el quemador de medios porosos muestra un comportamiento distinto, con un aumento leve en la eficiencia térmica cuando se emplean mezclas con altos contenidos de hidrógeno, manteniéndose entre un 63% y un 65% de eficiencia para fracciones de H_2 de hasta un 58%. Este comportamiento se asocia a la capacidad del quemador de medios porosos para recircular el calor y aprovechar la alta reactividad del hidrógeno, lo que resulta en una combustión más eficiente y completa.

3.3.4 Reducción de Emisiones Contaminantes

La adición de hidrógeno a las mezclas de GLP tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de contaminantes, particularmente en términos de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx). En el caso del quemador de medios porosos, Muñoz-Herrera et al. (2023) reportan una disminución del 30% en las emisiones de CO al aumentar la fracción de hidrógeno en la mezcla. Esto se debe a la mejora en la oxidación del carbono facilitada por la mayor concentración de radicales libres (O, H y OH) generados durante la combustión del hidrógeno, lo que favorece una combustión más completa.

Sin embargo, en el calentador de agua, los niveles de CO se incrementan cuando la fracción de H_2 supera el 39%, alcanzando hasta un 50% más de emisiones de CO en comparación con la combustión de GLP puro. Este aumento en las emisiones de CO está asociado a la menor temperatura de los gases de combustión y a la reducción del tiempo de residencia, lo cual limita la oxidación completa del carbono presente en el combustible. A pesar de este incremento en CO, las emisiones de NOx tienden a reducirse con la adición de H_2 , debido a la menor temperatura de la llama y la menor participación del mecanismo térmico de formación de NOx.

Por otro lado, Yasiry y Shahad (2016) encuentran que la velocidad de combustión laminar y la temperatura adiabática de la llama aumentan significativamente al incorporar hasta un 80% de hidrógeno en la mezcla. Este incremento de la temperatura puede generar mayores emisiones de NOx si no se controlan adecuadamente las

condiciones de operación, lo cual destaca la importancia de ajustar los parámetros de combustión para mantener niveles de emisión adecuados.

3.3.5 Brecha de Conocimiento

Como se menciona, la exploración de mezclas GLP-H₂ en sistemas de combustión industrial se presenta como una oportunidad significativa para abordar desafíos energéticos y medioambientales de alto impacto. La necesidad de avanzar hacia tecnologías más sostenibles exige investigaciones que profundicen en el comportamiento de estas mezclas bajo condiciones controladas, especialmente en aplicaciones que puedan aprovechar infraestructuras existentes y minimizar los costos de transición. En este sentido, incorporar el hidrógeno como un componente estratégico en la descarbonización de procesos industriales resulta clave, ya que su integración tiene el potencial de generar beneficios tanto ambientales como económicos en sectores que dependen mayoritariamente de combustibles fósiles.

Aunque se han realizado avances importantes en la evaluación de las propiedades de las mezclas de combustibles convencionales con hidrógeno, persisten interrogantes clave sobre su desempeño en escenarios específicos, como la operación de quemadores en hornos industriales. Estos sistemas representan un área estratégica, ya que su implementación efectiva podría optimizar tanto la eficiencia energética como la reducción de emisiones contaminantes, lo que resulta esencial en un contexto de creciente regulación ambiental.

La carencia de datos experimentales precisos sobre la estabilidad de la combustión, la influencia de diferentes proporciones de hidrógeno en el GLP y el impacto de los sistemas de suministro y control de aire limita el desarrollo de modelos robustos y estrategias prácticas para optimizar su uso. Esto subraya la importancia de generar un conocimiento integral que permita resolver estas limitaciones y ofrecer soluciones adaptadas a los desafíos técnicos específicos de los sistemas industriales. En particular, la regulación del suministro de aire y la evaluación del balance energético son aspectos fundamentales para comprender cómo estas mezclas pueden ser ajustadas a diferentes

configuraciones de operación. Este tipo de análisis no solo facilita la identificación de las proporciones óptimas de hidrógeno en las mezclas, sino que también permite establecer parámetros operativos que favorezcan una combustión estable y eficiente, contribuyendo a reducir la huella ambiental en la industria.

4 Regulación Medioambiental del Gas Licuado Petróleo e Hidrógeno en Chile

4.1 Composición y Emisiones de los Gases de Combustión

Los gases de combustión están compuestos por diversos elementos y compuestos que resultan de la reacción entre el combustible y el oxígeno. Cada uno de estos componentes posee características específicas y efectos ambientales y de salud particulares.

Oxígeno (O_2)

El oxígeno que no reacciona en la combustión se encuentra en los gases de escape. Su presencia permite evaluar el rendimiento del proceso y determinar las pérdidas energéticas a través de la chimenea. La concentración de O_2 en los gases de combustión varía según el tipo de caldera:

- Calderas de gasoil: 2 % – 8 %
- Calderas de gas: 2 % – 9 %

Nitrógeno (N_2)

El nitrógeno representa aproximadamente el 79 % en volumen del aire atmosférico y no participa en el proceso de combustión. Durante la combustión, ingresa a la caldera como un componente inerte, se calienta y es expulsado a través de la chimenea sin sufrir alteraciones químicas.

Dióxido de Carbono (CO_2)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor ácido. Su concentración en la atmósfera se ve alterada por los procesos de combustión, lo que contribuye al efecto invernadero. En condiciones normales, la fotosíntesis permite un equilibrio entre la producción y el consumo de CO₂, sin embargo, las emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles alteran esta estabilidad. La exposición a concentraciones superiores a 5000 ppm representa un riesgo para la salud humana, y niveles por sobre el 15 % en volumen pueden causar pérdida de consciencia. En los gases de combustión, las concentraciones típicas varían según el tipo de caldera:

- Calderas de gasoil: 11 % – 14 %
- Calderas de gas: 5 % – 10 %

Vapor de Agua (H_2O)

El vapor de agua se forma a partir de la combinación del hidrógeno presente en el combustible con el oxígeno. Dependiendo de la temperatura de los gases de combustión, el agua puede permanecer en estado de vapor o condensarse. A temperaturas elevadas, el vapor de agua se encuentra en fase gaseosa, mientras que, a temperaturas más bajas, se presenta en forma de condensado.

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas altamente tóxico, incoloro e inodoro, que se genera cuando la combustión es incompleta. Su inhalación en concentraciones elevadas impide la correcta oxigenación de la sangre, lo que puede resultar fatal. Exposiciones prolongadas a 700 ppm pueden causar la muerte en aproximadamente tres horas. Las concentraciones típicas de CO en los gases de combustión son:

- Calderas de biomasa: 40 ppm – 200 ppm
- Calderas de gasoil: 40 ppm – 150 ppm
- Calderas de gas: 30 ppm – 100 ppm

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Durante la combustión a altas temperaturas, el nitrógeno presente en el aire y en el combustible reacciona con el oxígeno formando monóxido de nitrógeno (NO), el cual, al combinarse con oxígeno adicional, se transforma en dióxido de nitrógeno (NO₂). Este último es un gas altamente tóxico y un precursor de la contaminación atmosférica, ya que contribuye a la formación de ozono troposférico. Los niveles típicos de NO_x en los gases de combustión varían entre 20 ppm y 100 ppm en calderas de gas y gasoil.

Dióxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro con un olor irritante que se genera por la oxidación del azufre presente en algunos combustibles. Este compuesto es precursor de la lluvia ácida, ya que en contacto con la humedad forma ácidos sulfuroso (H₂SO₃) y sulfúrico (H₂SO₄). Su concentración en el aire ambiente no debe superar los 5 ppm, y su presencia en los gases de combustión se controla mediante filtros y depuradores. Los valores típicos son:

- Calderas de gas: 0 ppm
- Calderas de gasoil: 0 ppm – 5 ppm

Hidrocarburos No Quemados (C_xC_y)

Los hidrocarburos son compuestos formados por carbono e hidrógeno que pueden encontrarse en estado gaseoso o líquido. Su emisión ocurre principalmente por una combustión incompleta y contribuye al efecto invernadero. Los hidrocarburos incluyen compuestos como metano (CH₄), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) y benceno (C₆H₆), algunos de los cuales tienen propiedades carcinogénicas. En los gases de combustión, el "hidrocarburo total" es un parámetro clave para evaluar la eficiencia de la combustión. En calderas de gasoil, su concentración típica es inferior a 50 ppm.

Hollín

El hollín es una forma de carbono puro que se genera cuando la combustión no es completa. Su presencia en los gases de combustión se mide mediante la escala de opacidad de Bacharach, donde los límites establecidos son:

- Calderas de gasoil: ≤ 1 en la escala de Bacharach

- Calderas de biomasa: ≤ 2 en la escala de Bacharach

Partículas Sólidas y Material Particulado (MP)

Las partículas sólidas en los gases de combustión son pequeñas partículas en suspensión que pueden provenir de la combustión de combustibles sólidos o del arrastre de cenizas y minerales presentes en los combustibles. Se clasifican en función de su diámetro en tres categorías principales:

- **PM₁**: Diámetro $\leq 1 \mu\text{m}$
- **PM_{2.5}**: Diámetro $\leq 2.5 \mu\text{m}$
- **PM₁₀**: Diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$

Debido a su reducido tamaño, el material particulado puede ingresar al sistema respiratorio humano, causando diversos efectos adversos en la salud. Cuanto menor es el tamaño de la partícula, mayor es su capacidad de penetración en los pulmones y su potencial de daño.

Las fuentes de emisión de material particulado incluyen tanto procesos de combustión (vehículos, calderas y hornos) como fenómenos naturales (erupciones volcánicas y liberación de esporas y polen). Además, la suspensión de polvo debido a la acción del viento y el tránsito de vehículos también contribuye a su dispersión en la atmósfera.

4.2 Regulación del Gas Licuado Petróleo

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) se encuentra regulado en Chile a través de diversas normativas que establecen los requisitos de seguridad, calidad y comercialización. La regulación del GLP abarca su almacenamiento, transporte, distribución y consumo, asegurando el cumplimiento de estándares para minimizar riesgos y garantizar un suministro seguro.

4.2.1 Seguridad y Operación

El Decreto Supremo N°108 establece los requisitos mínimos de seguridad para las instalaciones de almacenamiento, transporte y distribución de GLP. Dichos requisitos incluyen medidas de diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección con el fin de evitar accidentes y fugas de gas.

4.2.2 Calidad del GLP

El Decreto Exento N° 361 declara normas oficiales de la República de Chile para el GLP, estableciendo especificaciones de composición y pureza. Entre las normativas adoptadas se incluyen la NCh72.Of99 (especificaciones del GLP) y la NCh2394.Of99 (ensayo de olor del gas), que garantizan su seguridad en aplicaciones domésticas e industriales.

4.2.3 Emisiones Máximas Permitidas

El GLP, al ser un combustible de origen fósil, genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su combustión. La regulación chilena establece límites de emisión en el contexto de planes de prevención y descontaminación atmosférica, como el Decreto Supremo N°31, que regula la calidad de combustibles en la Región Metropolitana para reducir contaminantes como óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP10 y MP2,5). Según este decreto, los límites máximos permitidos son:

- **Material Particulado Fino (MP2,5):** 20 µg/m³ como promedio anual.
- **Material Particulado Respirable (MP10):** 50 µg/m³ como promedio anual.
- **Dóxido de Azufre (SO₂):** 20 µg/m³ como promedio de 24 horas.
- **Monóxido de Carbono (CO):** 10 mg/m³ como promedio móvil de 8 horas.

4.3 Regulación del Hidrógeno

El hidrógeno como vector energético en Chile se encuentra en proceso de regulación, especialmente en lo que respecta a su producción, almacenamiento, transporte y uso. Actualmente, existen decretos en elaboración para establecer requisitos de seguridad y calidad.

4.3.1 Seguridad y Operación

La regulación del hidrogeno en Chile está en desarrollo, con un decreto en elaboración que establecerá los requisitos mínimos de seguridad para las instalaciones de combustibles gaseosos alternativos. Este marco normativo buscará definir los estándares de diseño, construcción, operación y mantenimiento de instalaciones de hidrogeno, garantizando su uso seguro en diversas aplicaciones industriales y de movilidad.

4.3.2 Calidad del Hidrogeno

Otro decreto en elaboración busca establecer las especificaciones nacionales de calidad para el hidrogeno. Se espera que este incluya parámetros de pureza y concentraciones máximas de impurezas como monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SO_x), alineados con normas internacionales como la ISO 14687.

4.3.3 Emisiones Máximas Permitidas

El hidrogeno, dependiendo de su origen, puede tener distintas huellas de carbono. En el caso del hidrogeno verde, producido mediante electrólisis con energías renovables, emisiones de gases de efecto invernadero son nulas. Sin embargo, para el hidrogeno gris (producido a partir de gas natural), las emisiones pueden ser significativas.

5 Diseño y Procedimiento Experimental

El diseño experimental se encuentra esquematizado en la Ilustración 5, donde se destacan componentes como el horno isotérmico, el quemador industrial, el sistema de suministro de combustible y los instrumentos de medición de la combustión, los cuales se detallan en los capítulos siguientes.

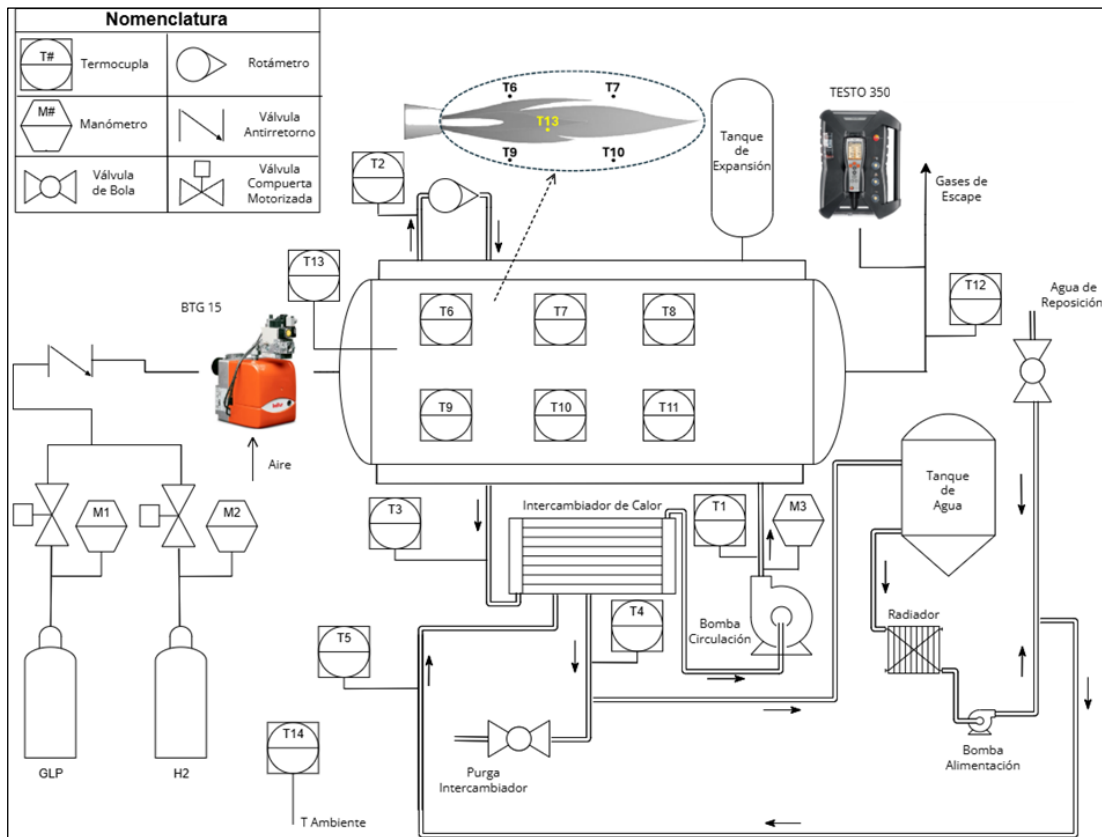


Ilustración 5. Esquema General de Diseño Experimental.

5.1 Horno Isotérmico

El horno isotérmico es un equipo diseñado para mantener una temperatura constante en su interior, gracias a un sistema de refrigeración y aislamiento. Este dispositivo está compuesto principalmente por una cámara de combustión, una cámara refrigerada y un intercambiador de calor (Ilustración 6). La cámara de combustión, de 540 mm de

diámetro y 1350 mm de longitud, está revestida con un material refractario llamado Plastigreen, fabricado por Lota Green, el cual proporciona una barrera térmica. A su vez, está diseñado para ser operado, en condiciones controladas, con una carga térmica menor o igual a 60 kW.



Ilustración 6. Horno Isotérmico (UTFSM, Viña del Mar).

Alrededor de la cámara de combustión se encuentra un circuito de agua de enfriamiento que estabiliza el perfil de temperatura, disipando el calor mediante un intercambiador de calor de dos etapas. Este sistema de enfriamiento se compone de dos circuitos de agua independientes: el primero abastece al intercambiador de calor, realizando un solo paso antes de ser desechado, mientras que el segundo abastece a la cámara refrigerada. Esta última mantiene un nivel de agua constante mediante un tanque de expansión, el cual permite la expansión del agua cuando su temperatura aumenta.

Para asegurar una circulación continua, el agua de la cámara refrigerada es impulsada hacia el intercambiador de calor mediante una bomba rotatoria eléctrica, lo que permite mantener condiciones isotérmicas estables dentro del horno. El diseño del equipo, con

sus materiales y sistemas de enfriamiento específicos, permite una operación segura y controlada (Sáez, Toledo Torres, & Flores-Maradiaga, 2012).

5.2 Quemador Baltur BTG 15

El quemador Baltur BTG 15 (Ilustración 7), homologado conforme a la normativa europea EN676, permite regular el caudal de aire mediante una mampara de mariposa, que se cierra automáticamente cuando el quemador se encuentra inactivo para evitar la pérdida de calor. Su diseño facilita el mantenimiento y la adaptación a distintos tipos de generadores de calor, al incluir una brida corrediza y un grupo pulverizador extraíble. La rampa de gas CE integra válvulas electromagnéticas de funcionamiento y seguridad, un presostato, un regulador de presión y un filtro de gas, lo que contribuye a un funcionamiento controlado y seguro. Además, incorpora un electrodo de ionización para monitorear la presencia de llama y un conector de 7 bornes que facilita la integración con el sistema eléctrico y termostático del horno (Baltur S.p.A, 2024).

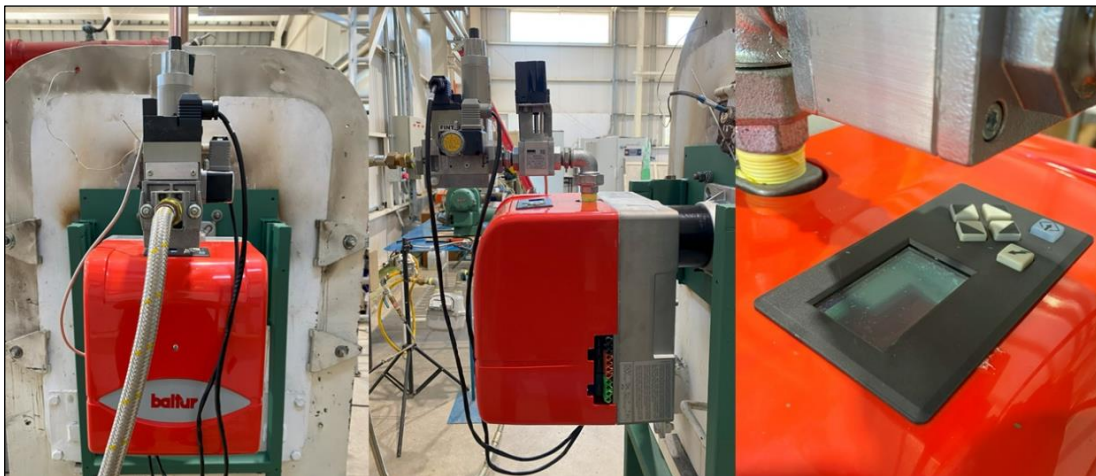


Ilustración 7. Vista frontal, lateral y Sistema de Control Electrónico de Quemador Baltur BTG 15.

Por otro lado, las especificaciones técnicas y el diagrama de potencias de este dispositivo se pueden ver en la Tabla 3 y Gráfico 4, respectivamente.

Tabla 3. Características Técnicas Baltur BTG 15: Caudal Mínimo (Qmin), Caudal Máximo (Qmax), Presión (P), Emisiones NOx (NOx) y Peso (W).

Quemador	$\dot{Q}_{min} \left[\frac{m^3n}{h} \right]$	$\dot{Q}_{max} \left[\frac{m^3n}{h} \right]$	$P[mbar]$	$NOx \left[\frac{mg}{kWh} \right]$	$W[kg]$
Baltur BTG 15	1,90	6,25	30	< 120	17

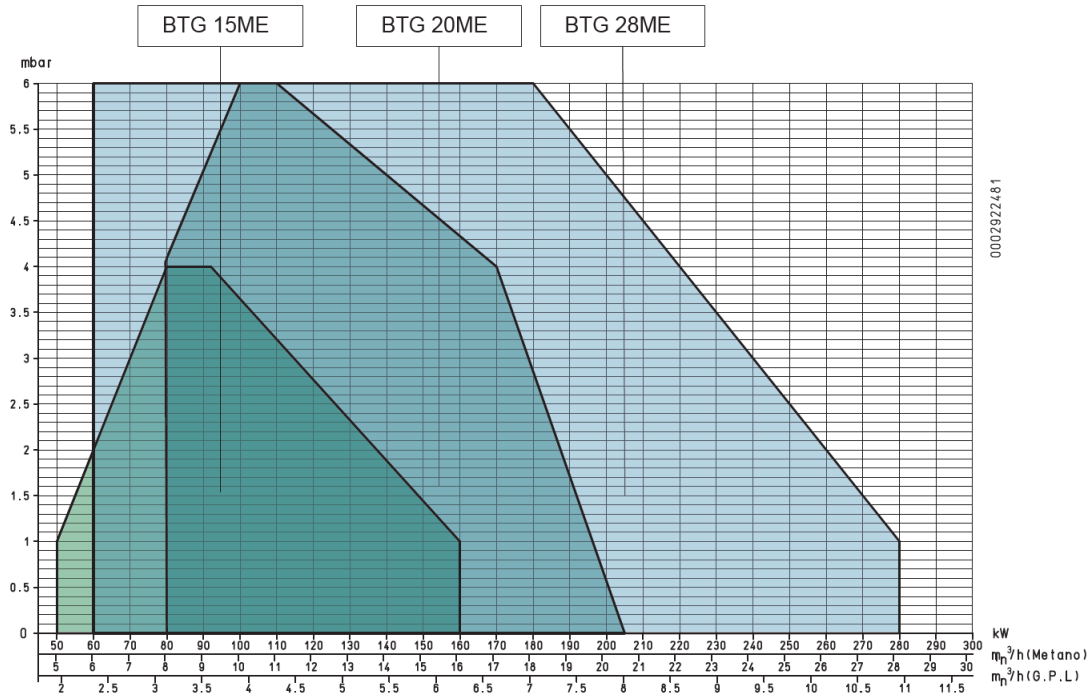


Gráfico 4. Zona de Trabajo Quemador Baltur: BTG 15ME, BTG 20ME y BTG 28ME.

5.3 Implementación de Controladores para Regulación de Mezcla Combustible

Para realizar el estudio de la mezcla de GLP y H_2 , se requiere implementar una instalación adicional que permita controlar los flujos volumétricos de ambos combustibles hacia el quemador.

Por un lado, se mantiene la configuración del montaje existente para la línea de GLP, pero se incorpora un controlador de flujo DPC Intelligent Mass Flow Controller

(DPC57), el cual cuenta con un rango de trabajo de 0 a 250 sL/min (Ilustración 9). Y por otro, se requiere una línea específica para el ingreso de H_2 . Para este propósito, resulta necesario emplear un bastidor que soporte el panel de regulación diseñado para el cilindro de hidrógeno (Ilustración 8). Este sistema, al igual que el del GLP, regula el caudal mediante un controlador de flujo volumétrico flujo DPC Intelligent Mass Flow Controller (DPC17), el cual cuenta con un rango de trabajo de 0 a 20 sL/min (Ilustración 9).



Ilustración 8. Bastidor - Panel de Regulación Hidrógeno.



(a)



(b)

Ilustración 9. Controladores de Flujo Volumétricos. (a) DPC57 y (b) DPC17.

Además, para la convergencia de los flujos, se incorpora un bypass tipo "T", el cual facilita la unión de ambos flujos independientes en uno solo.



Ilustración 10. Conexión Bypass Flujos GLP - H2.

5.4 Adquisición de Mediciones de la Combustión

De acuerdo con la instrumentación esquematizada en la **Error! Reference source not found.**, a continuación, se detallan y especifican los distintos métodos de adquisición de datos.

5.4.1 Adquisición de Medición de Temperaturas

El sistema de adquisición de datos para el registro de temperatura en torno al horno está compuesto por una tarjeta OMEGA OMB-DAQ56, que permite la entrada de hasta 20 señales analógicas (Ilustración 11). Este dispositivo, junto con el software Personal DaqView de OMEGA Engineering Inc. (Ilustración 12) facilita la monitorización en tiempo real de los parámetros y el almacenamiento continuo de los datos durante el ensayo. Los sensores de temperatura registran información en intervalos de 1 segundo, capturando y visualizando los datos a través del software, lo cual permite un control preciso de las variaciones térmicas en tiempo real.



Ilustración 11. Adquisidor de Datos (OMEGA OMB-DAQ56).

Physical Channel	User Label	On	Reading	Range	Units	Single-ended/Differential	Measurement Duration	Scale	Offset
PD1_A01	In manto	On	21,562	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A02	Out manto	On	21,995	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A03	Out manto	On	21,089	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A04	Out inter	On	20,979	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A05	In inter	On	21,932	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A06	T1_manto	On	20,980	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A07	T2_manto	On	21,296	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A08	T3_manto	On	20,856	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A09	T4_manto	On	20,750	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A10	T5_manto	On	21,307	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A11	T6_manto	On	21,032	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A12	gases	On	23,428	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A13	tem llama	On	22,962	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A14	ambiente	On	22,382	Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A15	PD1_A15	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A16	PD1_A16	Off		Type J	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A17	PD1_A17	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A18	PD1_A18	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A19	PD1_A19	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A20	PD1_A20	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A21	PD1_A21	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0
PD1_A22	PD1_A22	Off		Type K	°C	Differential	40 ms	1,0	0,0

Ilustración 12. Visualización de Temperaturas en Tiempo Real en DaqView.

Para asignar la posición de las termocuplas, se procede a dividir el horno en sistemas. En primer lugar, el sistema de enfriamiento cuenta con cinco termocuplas distribuidas estratégicamente. La termocupla T1 se ubica después de la bomba de circulación, en la entrada de agua a la cámara de combustión, mientras que T2 mide la temperatura en la salida de dicha cámara. La termocupla T3 se sitúa tras la estrangulación del agua de salida, cerca de su entrada al intercambiador de calor.

Además, las termocuplas T4 y T5 monitorean la salida y entrada del agua encargada de remover el calor del dispositivo, respectivamente (Ilustración 13).



Ilustración 13. Puntos de Medición Sistema de Enfriamiento (T1-T2-T3-T4-T5).

Por otro lado, para medir la temperatura en las paredes de la cámara de combustión, se utilizan seis termocuplas tipo R de 0.75 mm de diámetro, con recubrimiento de platino–rodio (T6 a T11 en la Ilustración 14).

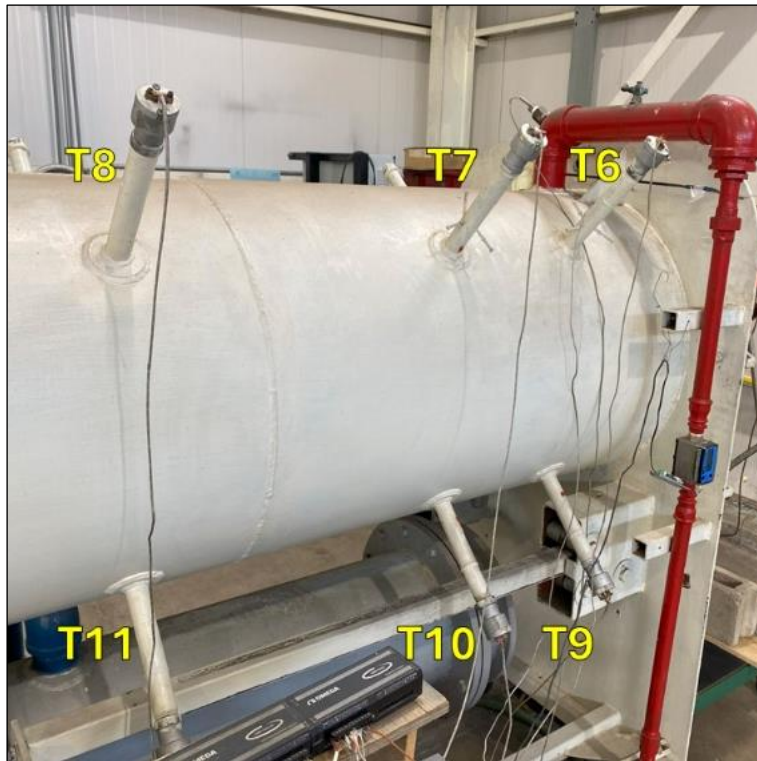


Ilustración 14. Puntos de Medición Manto del Horno (T6-T7-T8-T9-T10-T11).

Finalmente, se mide la temperatura de los gases de combustión con T12, una temperatura referencial de llama a aproximadamente 20 cm de la boquilla con T13 y la temperatura ambiente con T14, como se muestra en la Ilustración 15.



Ilustración 15. Puntos de Medición (T12-T13-T14).

5.4.2 Adquisición de Emisiones de Combustión

Para el estudio de emisiones se utiliza el Testo 350 (Ilustración 16), un analizador portátil de gases de combustión diseñado para aplicaciones que exigen precisión en la medición de emisiones. Este equipo cuenta con dos módulos principales: la Unidad de Control, que facilita la configuración y monitoreo de las mediciones mediante una interfaz gráfica, y la caja analizadora, donde se ubican los sensores de gases (Ilustración 17) y demás sistemas de medición. La conexión entre ambos módulos, mediante cable USB, permite operar el equipo de forma remota.



Ilustración 16. Testo 350.

El analizador de combustión evalúa los gases de escape a través de una sonda que se coloca en el ducto de emisiones, obteniendo una muestra que permite analizar compuestos clave de la combustión, como oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO, NO_2), entre otros, en función de los sensores instalados. Además, cuenta con un sistema de dilución automática lo cual asegura la precisión en ambientes con altas concentraciones de gases.

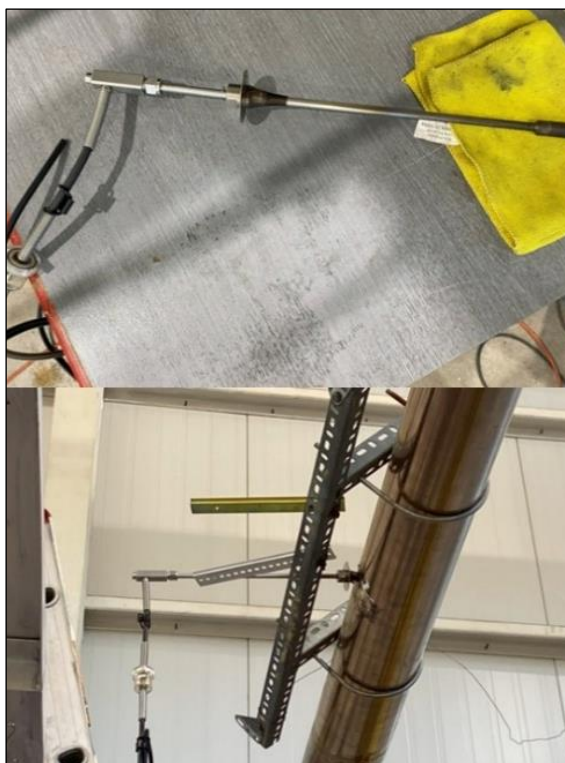


Ilustración 17. Sonda Testo 350 Instalada en el Ducto de Emisiones.

Los datos recolectados son transferidos y almacenados en un computador a través del software Testo easyEmission (Ilustración 18). Este software permite configurar el instrumento desde el computador, organizar datos por ubicación y fecha, y exportar la información a programas como Microsoft Excel para su procesamiento. Asimismo, facilita la visualización de los datos en formatos gráficos y tabulares, además de posibilitar la medición en tiempo real (Testo SE & Co. KGaA, 2024).

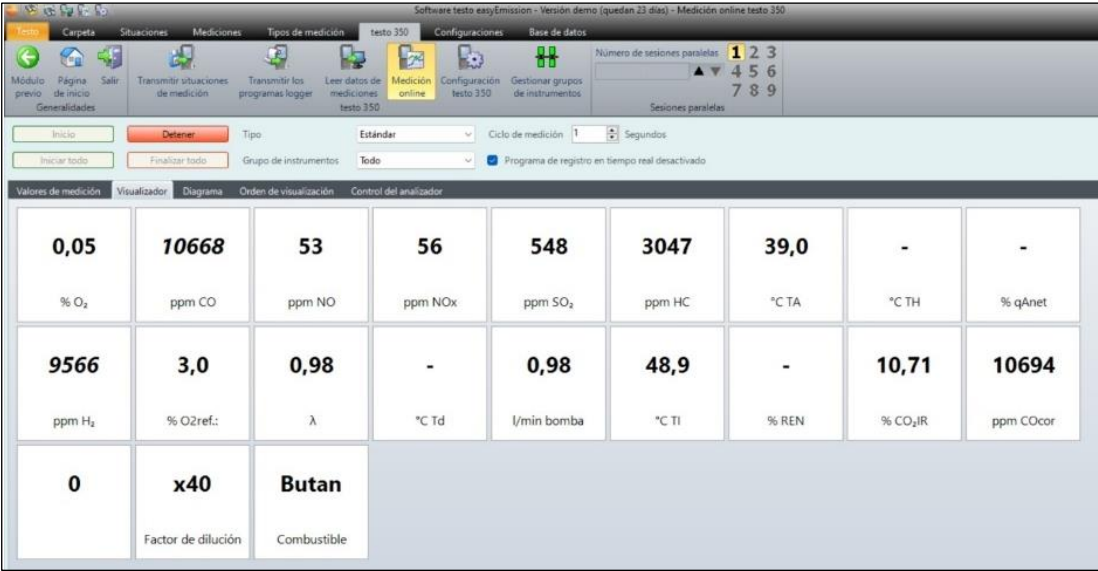


Ilustración 18. Visualización de Emisiones en Tiempo Real en Software Testo easyEmission.

5.4.3 Dispositivos de Medición Complementarios

De manera complementaria, se utilizan los dispositivos de medición especificados en la Tabla 4.

Tabla 4. Dispositivos de Medición Complementarios.

Dispositivo	Especificaciones
	El Electronic Digital Meter de GPI es un medidor de flujo de alta precisión, empleado en el monitoreo del caudal de agua de refrigeración que circula desde la salida del horno hasta el intercambiador de calor (entre T2 y T3). Este equipo mide el flujo de agua en tiempo real, permitiendo controlar el volumen acumulado y el caudal instantáneo en un rango de 1 a 10 GPM (3.8 a 37.9 LPM). Las mediciones son entregadas con una precisión de $\pm 1.5\%$ a través de una pantalla digital, el medidor soporta hasta 1500 PSI y temperaturas entre -10°C y 60°C (GPIimeters, 2024).

Ilustración 19. GPI: Electronic Digital Meter



Ilustración 20. Gallus G4

El Gallus G4 es un medidor de gas con diafragma, utilizado para registrar el consumo de GLP en el proceso de combustión. Su funcionamiento se basa en un sistema de diafragma que mide el flujo de gas al detectar la diferencia de presión entre la entrada y la salida. Este medidor, cuenta con una capacidad de 0.025 a 6 m³/h (BOIERO S.A., 2024).



Ilustración 21. Termómetro Industrial Mestek

El termómetro industrial IR01C mide temperaturas de -50°C a 550°C, con un tiempo de respuesta inferior a 0,5 segundos y una relación de distancia a punto (D) de 12:1. Opera en un rango ambiental de -10°C a 60°C y hasta 100% de humedad relativa (Shenzhen Mestek Electronics Co.,Ltd, 2024) .

 Ilustración 22. Medidor de Gas Combustible Mestek	El medidor de gas combustible CGD-02 de MESTEK está diseñado para detectar fugas de gases combustibles como metano, etano y propano, componentes clave en gas natural y licuado. Este equipo puede monitorear continuamente la concentración de gas, activando una alarma sonora y visual cuando se superan niveles predeterminados (10% LEL para alarma baja y 20% LEL para alarma alta). Posee una alta sensibilidad, un sensor de combustión catalítica y un tiempo de respuesta T90 menor a 60 segundos, con resolución de 1% LEL para gases (Comercial OZ, 2024).
 Ilustración 23. Detector de Gas Hidrógeno BH90A	El detector portátil de monogás SG-BH90A permite la detección continua de gases combustibles, como el hidrógeno, mediante un sensor de difusión natural que ofrece sensibilidad adecuada y repetitividad en la medición. Su carcasa, fabricada en material ABS, proporciona resistencia al agua y al polvo, cumpliendo con el estándar IP65. Además, incorpora una memoria para 1000 registros y sistemas de alarma para batería baja y fallos operativos.

5.5 Protocolo de Puesta en Marcha Horno y Toma de Mediciones

5.5.1 Verificación y Puesta en Marcha Inicial del Horno

1. **Condiciones preliminares:** Se aprueban las condiciones iniciales del ensayo.

2. **Sistema hidráulico:** Se verifica que la red de agua del sistema (horno y bomba de agua) esté completamente llena y el nivel de agua en el tanque de expansión sea el adecuado.
3. **Conexión eléctrica:** Se conectan los circuitos del quemador a la red eléctrica, corroborando su correcta configuración y sentido.
4. **Flexibles de combustible:** Se inspecciona el estado de los flexibles que conectan el combustible al quemador, asegurando su integridad física y operativa. Para verificar la ausencia de fugas, en el caso del GLP se utiliza el medidor de gas combustible CGD-02 (Ilustración 22), y en el caso del Hidrógeno, el detector portátil de monogás SG-BH90A (Ilustración 23), realizando mediciones en las conexiones y áreas críticas del sistema.
5. **Bomba de circulación:** Se energiza la bomba de circulación de agua asociada al horno.
6. **Monitoreo de temperatura:** Se enciende el sistema de medición en tiempo real para verificar las temperaturas (Ilustración 12).
7. **Encendido del quemador:** Se enciende el quemador. Antes de la conexión a la tubería de gas, se purga el aire del conducto para evitar obstrucciones, y se ajusta el regulador del cabezal del quemador para optimizar la mezcla aire-combustible.
8. **Supervisión:** Durante el experimento, se supervisa el nivel de combustible, evitando interrupciones en el suministro.

5.5.2 Puesta en Marcha Equipos de Medición

1. **Condición estacionaria:** Se espera un período de 45 minutos desde el encendido del horno para alcanzar el régimen estacionario.
2. **Calibración de equipos:** Se realiza una medición en blanco con los analizadores de gases para asegurar su correcto funcionamiento.

3. **Conexión de sondas:** Se conecta sonda del Testo 350 (Ilustración 17) al túnel de gases de escape.
4. **Registro inicial:** Se registra la hora de inicio de las mediciones (HH:MM:SS).
5. **Mediciones:** Se activa la medición del perfil de temperatura en el horno mediante el sistema de adquisición de datos, y se inician los registros de emisiones de gases de escape.

5.6 Mediciones para Línea Base de GLP

Para la gestión de la combustión empleando exclusivamente el quemador, se utiliza el controlador modular integrado Lamtec Serie BT300, lo que permite configurar la curva de operación.

Para ello, en primer lugar, se debe ingresar al apartado mostrado en la Ilustración 24. En dicha configuración, se observan las diferentes posiciones de los servomotores de aire y gas en el punto de encendido, las cuales se interpretan de la siguiente manera:

1. Carga en el punto de encendido.
2. Posición del servomotor de gas.
3. Posición del servomotor de aire .

Posteriormente, se ajusta la carga en el punto de interés y se verifican los valores de combustión mediante el dispositivo de medición de emisiones (Ilustración 16). Este procedimiento permite modificar las posiciones de los servomotores de gas y aire hasta alcanzar las condiciones óptimas de combustión.

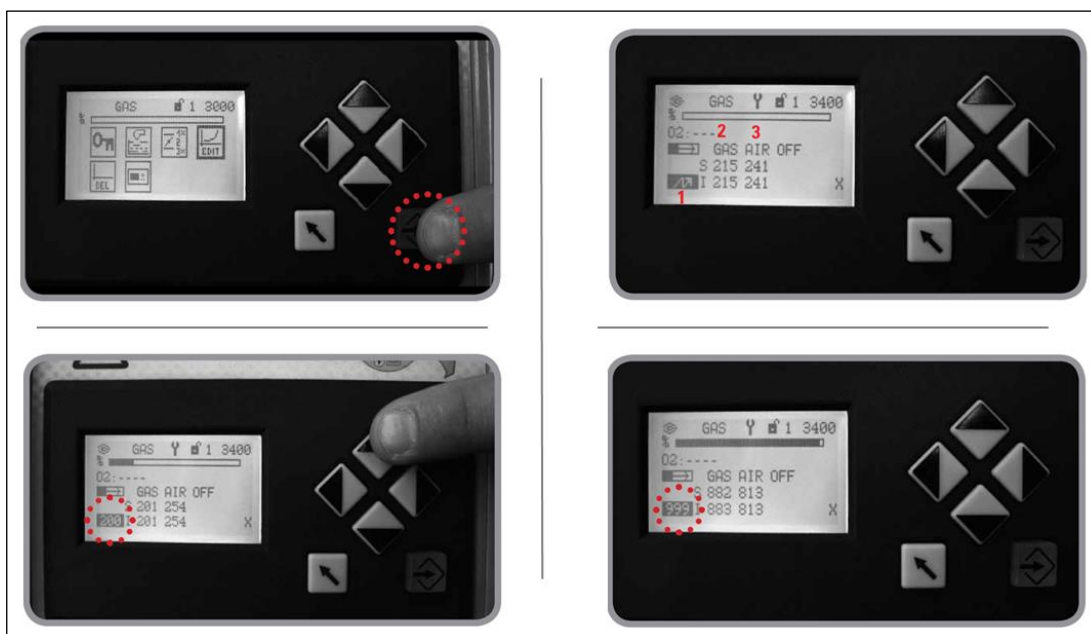


Ilustración 24. Configuración Curva de Combustión Lamtec Serie BT300.

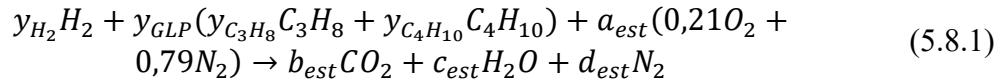
5.7 Mediciones Mezcla de GLP e Hidrógeno

Para realizar las mediciones con mezclas de combustibles, se utiliza el montaje experimental descrito en la Ilustración 5. Inicialmente, utilizando los controladores de flujo correspondientes a cada línea de combustible independiente (Ilustración 9), se establece un flujo exclusivo de GLP. Posteriormente, se incrementa gradualmente el flujo de la línea de hidrógeno mientras se reduce el de GLP, asegurando que el parámetro de potencia suministrada se mantenga constante. Este procedimiento se repite hasta alcanzar todos los puntos de interés definidos para el estudio.

Para cada incremento, se aplica un tiempo de estabilización de 10 minutos, tras el cual se realiza un periodo de medición representativo, registrando los resultados correspondientes a cada proporción de mezcla.

5.8 Balances Químicos

La combustión se define como la reacción química exotérmica que se produce al mezclar combustible con oxígeno a una razón correcta y una temperatura suficiente para iniciar la reacción. Para estudiar dicha reacción se debe realizar un análisis químico, en primer lugar, un balance estequiométrico, que consiste en igualar las cantidades de átomos de cada elemento presentes en los reactivos y productos de una reacción química, es decir, evaluar bajo la premisa de que todo el combustible y oxidante se consume. Este proceso asegura la conservación de la masa y permite determinar las proporciones exactas entre reactivos y productos, estableciendo las cantidades de cada sustancia necesarias para completar la reacción. La ecuación de balance estequiométrica utilizada para el fenómeno químico de combustión, la cual tiene como base 1kmol de combustible, se muestra a continuación.



Donde y_{H_2} y y_{GLP} representan las relaciones volumétricas de la mezcla combustible ($H_2 - GLP$), mientras que $y_{C_3H_8}$ y $y_{C_4H_{10}}$ corresponden a las concentraciones volumétricas de propano y butano, respectivamente, en el Gas Licuado de Petróleo. El término a_{est} corresponde a los kmol de aire estequiométrico requeridos para su oxidación. Por su parte, en los productos de la reacción, b_{est} , c_{est} y d_{est} representan los kmol estequiométricos de los gases CO_2 , H_2O y N_2 , respectivamente, por cada kmol de combustible consumido.

Por otro lado, la relación aire-combustible estequiométrica, expresada en términos de masa, se formula de la siguiente manera:

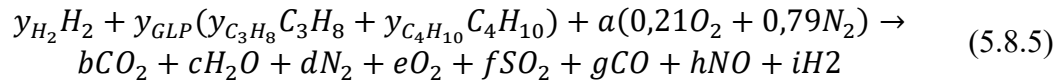
$$RAC_{est} = \frac{a_{est}MM_{air}}{y_{H_2}MM_{H_2} + y_{GLP}(y_{C_3H_8}MM_{C_3H_8} + y_{C_4H_{10}}MM_{C_4H_{10}})} \quad (5.8.2)$$

Considerando el exceso de aire (λ), es posible determinar la relación aire-combustible real mediante la siguiente relación:

$$a = \lambda \cdot a_{est} \quad (5.8.3)$$

$$RAC = \lambda \cdot RAC_{est} \quad (5.8.4)$$

Así, considerando el balance estequiométrico y el exceso de aire (λ), se puede evaluar un balance químico real, que toma en cuenta los distintos productos registrados en el analizador de datos de emisiones, donde se agregan los productos e , f , g , h e i , que corresponden a O_2 , SO_2 , CO , NO y H_2 , respectivamente.



En este caso, se presenta un total de diez incógnitas (a , b , c , d , e , f , g , h , i y λ). Mediante un análisis elemental de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno, se obtienen cuatro ecuaciones. Además, la relación del exceso de aire proporciona una ecuación adicional (ecuación 7.8.3), lo que da un total de cinco ecuaciones. Para resolver el sistema, se requieren cinco ecuaciones adicionales, las cuales se obtienen a partir de las mediciones del equipo Testo 350. Las muestras utilizadas corresponden a oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre e hidrógeno, considerando que las mediciones son tomadas en base seca.

$$\begin{aligned}
y_{O_2} &= \frac{e}{\sum emisiones} \\
y_{CO_2} &= \frac{b}{\sum emisiones} \\
y_{CO} &= \frac{g}{\sum emisiones} \\
y_{NO} &= \frac{h}{\sum emisiones} \\
y_{H_2} &= \frac{i}{\sum emisiones}
\end{aligned} \tag{5.8.6}$$

A partir de esta información empírica, se establecen las relaciones necesarias para la resolución del sistema de ecuaciones. Este análisis permite determinar las relaciones gases de combustión - combustible, correspondientes a cada uno de los gases evaluados.

$$\begin{aligned}
R_{CO_2} &= \frac{b \cdot MM_{CO_2}}{y_{H_2} MM_{H_2} + y_{GLP} (y_{C_3H_8} MM_{C_3H_8} + y_{C_4H_{10}} MM_{C_4H_{10}})} \\
R_{H_2O} &= \frac{c \cdot MM_{H_2O}}{y_{H_2} MM_{H_2} + y_{GLP} (y_{C_3H_8} MM_{C_3H_8} + y_{C_4H_{10}} MM_{C_4H_{10}})} \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\vdots \\
R_{H_2} &= \frac{i \cdot MM_{H_2}}{y_{H_2} MM_{H_2} + y_{GLP} (y_{C_3H_8} MM_{C_3H_8} + y_{C_4H_{10}} MM_{C_4H_{10}})}
\end{aligned} \tag{5.8.7}$$

5.9 Balance Energético

Para los balances de energía posteriores, se considera inicialmente la determinación del flujo másico de GLP. Este parámetro, en el set up primario sin controladores (5.6), se calcula de manera indirecta a partir de la medición del medidor de gas mencionado previamente (Ilustración 20).

$$\dot{m}_{GLP} = \rho_{GLP} \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\Delta t} \quad (5.9.1)$$

En esta expresión, ρ_{GLP} representa la densidad del GLP en condiciones estándar, mientras que V_{final} y $V_{inicial}$ corresponden a las lecturas del medidor de gas al término e inicio de la medición, respectivamente. Y, por su parte, Δt refiere a la duración total del período de medición.

En el caso de la mezcla de combustible, se obtienen directamente de los controladores de flujo respectivos ($\dot{V}_{GLP}$ y $\dot{V}_{H_2}$) (Ilustración 9).

$$\dot{m}_{GLP} = \rho_{GLP} \cdot \dot{V}_{GLP} \quad (5.9.2)$$

$$\dot{m}_{H_2} = \rho_{H_2} \cdot \dot{V}_{H_2} \quad (5.9.3)$$

De forma general, el caudal másico total del combustible puede expresarse como:

$$\dot{m}_{comb} = \dot{m}_{GLP} + \dot{m}_{H_2} \quad (5.9.4)$$

Esta relación también permite estimar el flujo másico de aire que ingresa a la cámara de combustión:

$$\dot{m}_{air} = RAC \cdot \dot{m}_{comb} \quad (5.9.5)$$

El último flujo por considerar corresponde al flujo másico de agua ($\dot{m}_{H_2O}$) que circula por el manto de la cámara de refrigeración del horno, el cual se mide directamente mediante el flujómetro mencionado (Ilustración 19) en los instantes de evaluación.

Por otro lado, el volumen de control considerado para el balance de energía en el análisis corresponde al espacio delimitado por el interior del horno. Dentro de este recinto, se establece el balance de energía general, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{E}_{comb} + \dot{E}_{air} = \dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{exh} \quad (5.9.6)$$

Donde:

- $\dot{E}_{comb}$: Potencia aportada por el combustible.
- $\dot{E}_{air}$: Potencia asociada al aire oxidante que ingresa al sistema.
- $\dot{Q}_{abs}$: Potencia absorbida por el agua utilizada como medio de refrigeración en el manto del horno.
- $\dot{Q}_{exh}$: Potencia transferida por los gases de escape.

Cada término se puede desglosar de la siguiente manera:

$$\dot{E}_{comb} = \dot{m}_{GLP} PCI_{GLP} + \dot{m}_{H_2} PCI_{H_2} \quad (5.9.7)$$

$$\dot{E}_{air} = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_{amb} - T_{ref}) \quad (5.9.8)$$

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_2 - T_1) \quad (5.9.9)$$

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{comb} (R_{CO_2} C_{p_{CO_2}} (T_{12} - T_{amb}) + R_{O_2} C_{p_{O_2}} (T_{12} - T_{amb}) + \dots + R_{H_2} C_{p_{H_2}} (T_{12} - T_{amb})) \quad (5.9.10)$$

En estas expresiones, las temperaturas T_1 y T_2 representan la entrada y salida del agua en la carcasa de refrigeración (Ilustración 13), T_{12} corresponde a la temperatura de los gases de escape (Ilustración 15), y T_{ref} es la temperatura de referencia utilizada en los cálculos, fijada en $0^\circ C$. Por su parte, C_{p_i} denota el calor específico a presión constante, dependiendo del fluido que corresponda.

Finalmente, con el objetivo de establecer una métrica útil para el análisis del rendimiento en las distintas configuraciones, se introduce la eficiencia térmica (η_{ter}). Este indicador considera al horno isotérmico como si funcionara de manera análoga a una caldera, cuyo propósito principal es calentar el agua de servicio.

$$\eta_{ter} = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{E}_{comb} + \dot{E}_{air}} (\%) \quad (5.9.11)$$

6 Presentación y Análisis de Resultados

Los cálculos presentados a continuación se basan en las propiedades termo-físicas especificadas en la Tabla 18 y consideran un régimen estacionario, representativo del estado de estudio. Los gráficos se presentan para un período de medición de 300 segundos, una vez alcanzada dicha condición de estabilidad.

6.1 Caracterización del Quemador

Se realiza una caracterización del quemador utilizando GLP como único combustible, con el objetivo de entender su funcionamiento sin ninguna intervención previa en las

líneas de combustible y determinar los puntos de operación óptimos. El quemador Baltur dispone de distintos niveles de carga para el encendido (200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 999), los cuales permiten configurar la curva de encendido, en cada uno de los cuales se registran las posiciones de los servomotores que controlan las compuertas de aire y gas. Aunque podría evaluarse el punto de operación óptimo para cada carga, según lo indicado en el Gráfico 4, las potencias nominales del quemador oscilan entre 50 kW y 160 kW, superando en su mayoría la capacidad de trabajo del horno isotérmico. Esto se debe a que, a temperaturas elevadas, mantener la uniformidad isotérmica del manto resulta complejo debido al ingreso de caudal de agua de reposición, lo cual introduce una variabilidad significativa en las mediciones.

Por esta razón, el análisis se restringe a las cuatro cargas de menor potencia (200, 250, 300 y 400). Para identificar los puntos de operación óptimos, se selecciona una carga específica y se ajustan las posiciones de los servomotores a través del panel de control del quemador, regulando así los flujos de aire y combustible. Con apoyo del software Testo easyEmission (Ilustración 18), se busca alcanzar una relación aire-combustible adecuada. Como criterio, se procura maximizar el porcentaje de CO_2 y mantener un porcentaje de O_2 cercano al 3 %.

Este procedimiento se aplica de manera individual a cada una de las cargas seleccionadas. Los puntos de operación óptimos obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Puntos de Operación Óptimos - Nomenclatura BT 300 (No posee unidades).

Carga Quemador	GAS	AIR
200	238	34
250	283	70
300	300	87
400	313	105

Una vez identificado el punto de operación óptimo, se considera un tiempo de estabilización de 10 minutos antes de iniciar las mediciones de Temperatura e Emisiones representativas que permitan formular conclusiones.

6.1.1 Verificación de Emisiones para Puntos de Operación Óptimos

Una vez identificados los puntos de operación óptimos (Tabla 5), se realiza mediciones para evaluar el comportamiento de las emisiones en dichas condiciones, las cuales se pueden ver a continuación en el Gráfico 5.

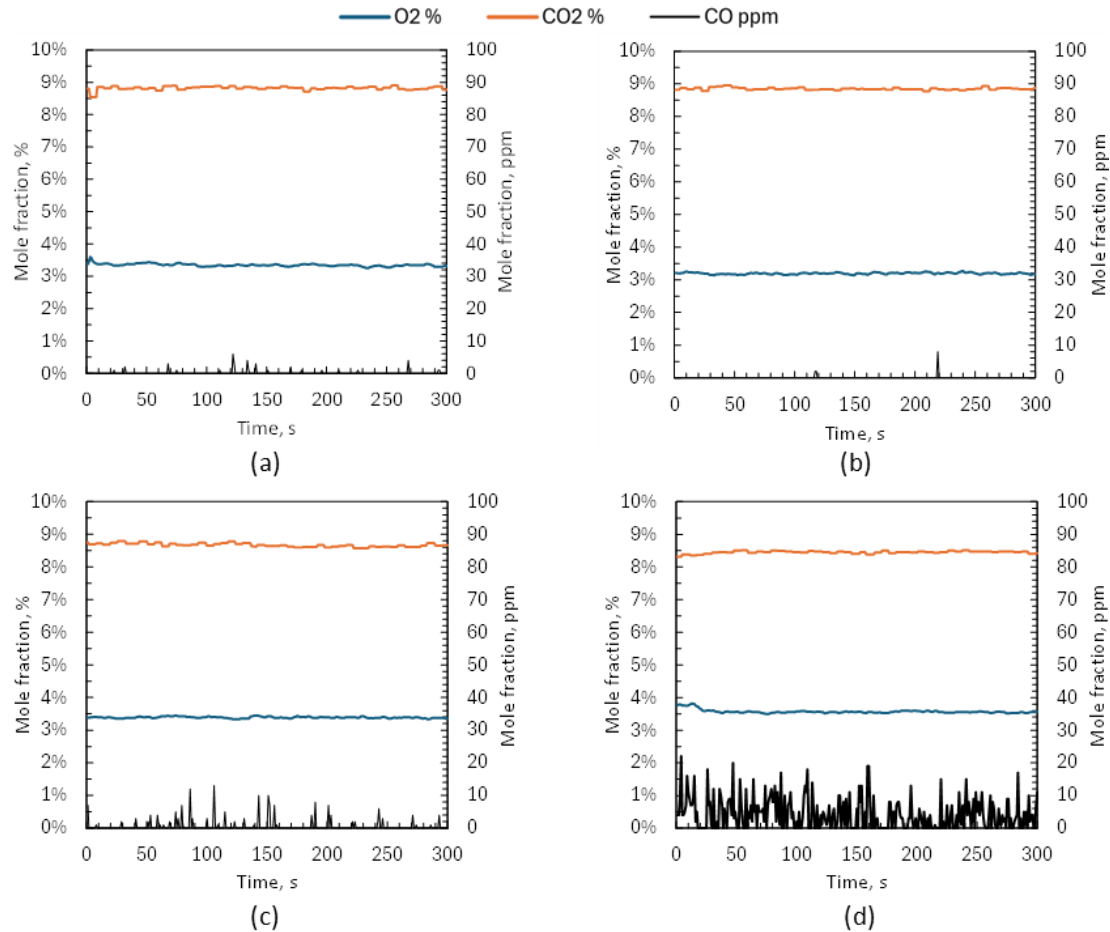


Gráfico 5. Emisiones Puntos Óptimos para Cargas Mínimas. (a) 200, (b) 250, (c) 300 y (d) 400.

El análisis de las emisiones revela que los niveles de CO_2 y O_2 permanecen estables entre las distintas cargas evaluadas, sin variaciones significativas. Sin embargo, en el caso del CO , se observa que las cargas de 200 y 250 mantienen un control estadístico

consistente, con emisiones que no superan las 10 ppm. Por el contrario, dicho control se pierde de forma progresiva a medida que las cargas aumentan.

Desde la perspectiva de una operación óptima, estos resultados indican que las cargas de 200 y 250 presentan un comportamiento válido en términos de emisiones. Por lo que, para determinar cuál de estas cargas resulta más adecuada, es necesario llevar a cabo un análisis energético.

6.1.2 Balances Energéticos para Puntos de Operación Óptimos

En el análisis de las cuatro cargas de menor potencia, inicialmente se presentan los valores de flujos volumétricos de combustible ($\dot{V}_{GLP}$) con su respectiva potencia de entrada ($\dot{E}_{comb}$) obtenidos para las configuraciones previamente establecidas (Tabla 6).

Tabla 6. Puntos de Operación Óptimos - Potencia Combustible.

Carga Quemador	$\dot{V}_{GLP}$ [L/min]	$\dot{E}_{comb}$ [kW]
200	49,60	83,59
250	60,71	102,32
300	63,70	107,35
400	67,00	112,91

Bajo estos regímenes, se utiliza el software EES para resolver las ecuaciones presentadas en el Capítulo 5.9 para cada una de las mediciones realizadas. De este modo, a partir de las ecuaciones (5.9.5), (5.9.6) y (5.9.7), se obtienen los valores de las potencias de salida ($\dot{Q}_{abs}$ y $\dot{Q}_{gas}$) y de la eficiencia térmica (η_{ter}), respectivamente, correspondientes al volumen de control definido. Estos resultados se visualizan en el Gráfico 6.

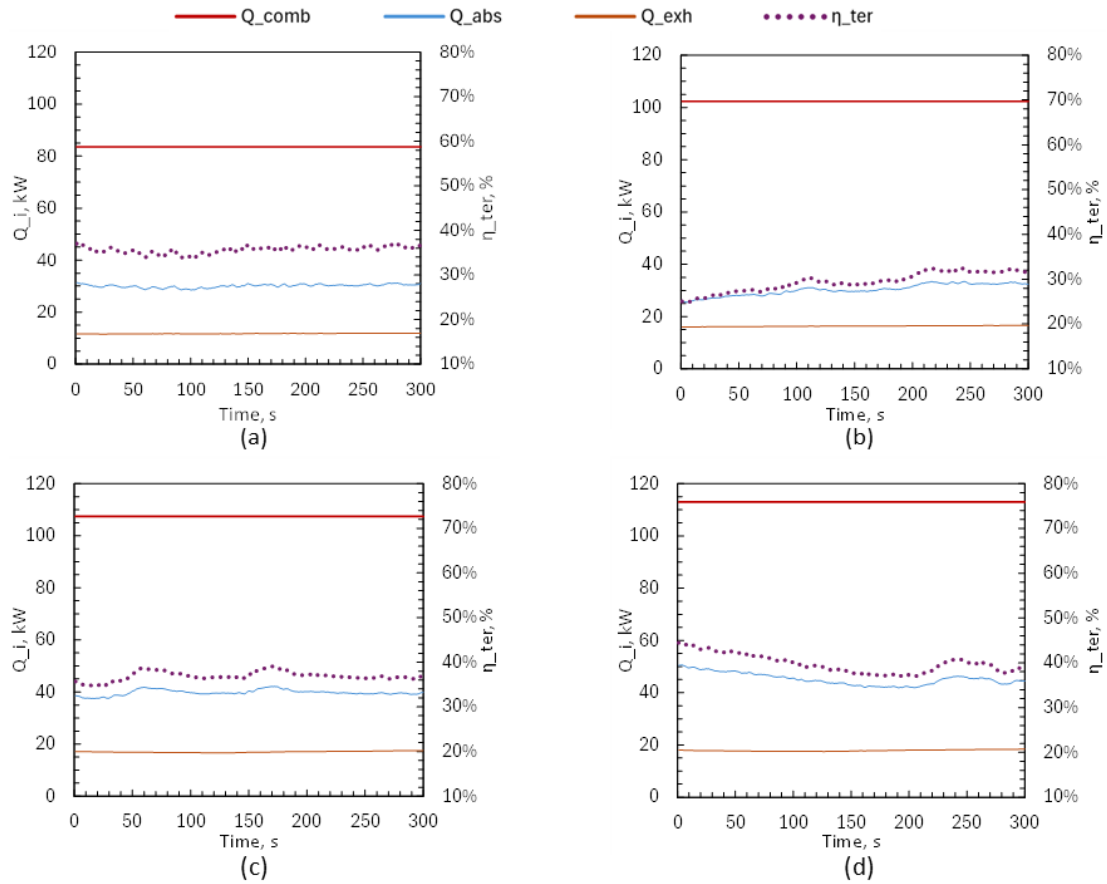


Gráfico 6. Balance Energético Puntos Óptimos para Cargas Mínimas. (a) 200, (b) 250, (c) 300 y (d) 400 ($Q_i = Q_{\text{comb}}; Q_{\text{abs}}; Q_{\text{exh}}$).

El análisis del Gráfico 6 muestra que, para las cargas de 200 y 300, se alcanza una estabilidad sostenida en los valores de eficiencia térmica a lo largo del tiempo. Sin embargo, en las cargas de 250 y 400, esta estabilidad no se presenta. Experimentalmente, se observa que, al incrementar la potencia del combustible suministrada al horno, las temperaturas en el manto de refrigeración comienzan a elevarse. Para mantener el manto en condiciones isotérmicas, se requiere ingresar agua de reposición (Ilustración 5), lo que provoca fluctuaciones en el caudal. Estas variaciones, a su vez, afectan la potencia absorbida por el manto refrigerante y, consecuentemente, la eficiencia térmica.

Con base en ambos análisis, tanto de emisiones como energético, se concluye que el sistema del montaje experimental debe ser operada en potencias iguales o inferiores a la entregada por la carga de 200 (Tabla 6). Esto se debe a que presenta una facilidad mayor en el control de la temperatura del manto, facilitando su estabilización y, por ende, la consistencia en las mediciones.

6.2 Mezcla Combustible GLP e Hidrógeno

Durante el desarrollo de la configuración experimental para el estudio de la mezcla de combustibles, se concluye que el cambio en el suministro de GLP, al pasar de un estanque a un cilindro, junto con la restricción impuesta por los controladores de flujo integrados, permite prescindir del control del suministro de gas a través del controlador integrado en el quemador. Además, la caída de presión asociada al cambio de suministro impide alcanzar el flujo nominal necesario para satisfacer la potencia requerida en la carga de 200 (Tabla 6), lo que obliga a trabajar con potencias inferiores a la carga mínima del quemador. Esto, sin embargo, facilita la operación del horno, ya que, como se detalla en el Capítulo 6.1, este puede operar dentro de un rango de potencia menor a dicha carga mínima. El flujo máximo alcanzable con la nueva configuración es de 25 L/min ; por ello, las potencias escogidas son 33,70 y 42,47 kW, lo que corresponden a un flujo volumétrico de GLP de 20 y 25 L/min , respectivamente.

En concordancia con las nuevas potencias a estudiar, se lleva a cabo una variación del servomotor de la compuerta de aire, de manera similar a lo descrito en el Capítulo 6.1.1. Este ajuste, respaldado por las mediciones en tiempo real del equipo Testo 350, permite optimizar la relación aire-combustible. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7 se encuentran respaldados por las emisiones registradas en los Gráfico 8 y Gráfico 9.

Tabla 7. Posiciones Servomotor de Aire en Mezclas - Nomenclatura BT 300 (No posee unidades).

$\dot{E}_{comb} [kW]$	$\dot{V}_{GLP} [L/min]$	AIR
33,70	20	21
42,47	25	37

Es importante mencionar que, durante las mediciones con incorporación de hidrógeno, la posición de la compuerta de aire se mantiene invariable.

Ahora bien, para el estudio de la mezcla de combustible, se mantienen constantes dos parámetros: la potencia suministrada por el combustible y la temperatura del manto refrigerante del horno. Por un lado, para garantizar que la potencia suministrada por el combustible permanezca constante, se realiza una estimación previa mediante un balance energético, lo que permite determinar los caudales correspondientes para cada tipo de combustible. Y por otro, la temperatura representativa del manto refrigerante va a corresponder a la medición realizada por la Termocupla T2 (Ilustración 13). Con el apoyo del monitoreo en tiempo real proporcionado por el software DaqView (Ilustración 12) y mediante la regulación manual de las válvulas de bola encargadas del control de los caudales de agua de reposición y purga en el intercambiador de calor, se logra mantener esta temperatura constante en 85°C durante las mediciones.

6.2.1 Estimación de Flujos Volumétricos de Combustible

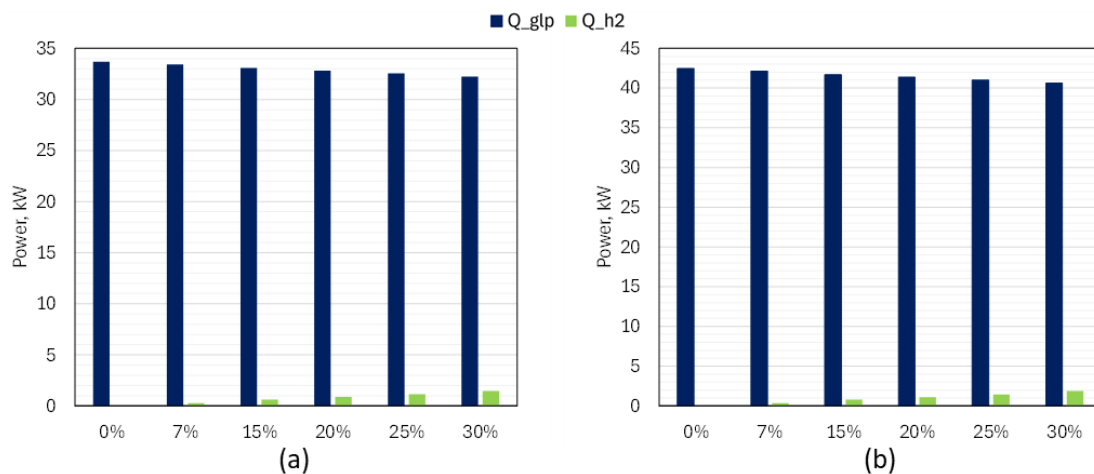
Para estimar los caudales volumétricos necesarios para mantener la potencia de combustible en los puntos de interés, se iguala dicha potencia nominal con la ecuación (5.9.3). Posteriormente, mediante el software EES, se emplea una tabla paramétrica en la que se varía la proporción volumétrica de las dos fuentes de combustible, partiendo del 100% de GLP (línea base) hasta alcanzar un 30% volumétrico de hidrógeno. Los resultados se pueden ver en la Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 8. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 33,70 kW (reducida).

$\% H_2$	$\dot{V}_{GLP}[L/min]$	$\dot{V}_{H_2}[L/min]$
0	20,00	0,00
7	19,84	1,49
15	19,63	3,46
20	19,48	4,87
25	19,31	6,44
30	19,13	8,20

Tabla 9. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 42,47 kW (reducida).

$\% H_2$	$\dot{V}_{GLP}[L/min]$	$\dot{V}_{H_2}[L/min]$
0	25,20	0,00
7	25,00	1,88
15	24,73	4,37
20	24,55	6,14
25	24,34	8,11
30	24,10	10,33



6.3 Resultados Emisiones de Combustión

La combinación del balance químico real (5.8.5), las mediciones empíricas (5.8.6) y las relaciones de aire combustible (5.8.2 y 7.8.4) ha permitido obtener, en promedio durante los periodos de estudio, los siguientes resultados para las distintas potencias de trabajo.

Tabla 10. Moles Producto, λ y RAC para Potencia 33,70 kW.

% H ₂	λ	RAC	a	b	c	d	e	f	g	h	i
0	1,59	24,60	44,60	3,60	4,60	35,23	1,44	2,02	0,00	0,00	0,00
7	1,60	24,88	42,06	3,35	4,35	33,22	1,42	1,89	0,00	0,00	0,00
15	1,60	24,99	38,77	3,06	4,06	30,63	1,32	1,73	0,00	0,00	0,00
20	1,60	25,11	36,77	2,88	3,88	29,05	1,26	1,64	0,00	0,00	0,00
25	1,61	25,29	34,82	2,70	3,70	27,51	1,22	1,54	0,00	0,00	0,00
30	1,62	25,64	33,07	2,52	3,52	26,13	1,24	1,43	0,00	0,00	0,00

Tabla 11. Moles Producto, λ y RAC para Potencia 42,47 kW.

% H ₂	λ	RAC	a	b	c	d	e	f	g	h	i
0	1,51	23,47	42,55	3,60	4,60	33,61	1,14	1,89	0,00	0,00	0,00
7	1,54	23,98	40,55	3,35	4,35	32,03	1,19	1,80	0,00	0,00	0,00
15	1,55	24,14	37,45	3,06	4,06	29,58	1,07	1,70	0,00	0,00	0,00
20	1,55	24,33	35,63	2,88	3,76	28,15	1,04	1,68	0,00	0,00	0,12
25	1,59	24,97	34,38	2,70	3,70	27,16	1,11	1,56	0,00	0,00	0,00
30	1,58	24,99	32,23	2,52	3,38	25,46	1,07	1,49	0,00	0,00	0,14

Se observa que la RAC experimenta un ligero aumento con la adición de hidrógeno, debido a dos factores principales. En primer lugar, el RAC estequiométrico se incrementa como consecuencia de la mayor presencia de hidrógeno y la reducción de GLP en la mezcla de combustible. En segundo lugar, la tendencia al aumento del coeficiente de exceso de aire (λ) en la combustión, la cual se mantiene dentro de un rango cercano a 1.6 en ambas potencias, contribuye adicionalmente a su incremento.

En lo que respecta a los productos de combustión, la concentración de dióxido de carbono disminuye progresivamente conforme aumenta la fracción de hidrógeno en la mezcla. Esto se debe a que el hidrógeno, al ser un combustible libre de carbono, desplaza parcialmente la presencia de hidrocarburos en la mezcla, lo que disminuye la cantidad de CO_2 producido. Por otro lado, el oxígeno residual (O_2) mantiene valores relativamente constantes, lo que indica que el exceso de aire no se ve significativamente afectado por la sustitución parcial del GLP por hidrógeno.

En términos de emisiones contaminantes, se verifica que la formación de monóxido de carbono (CO) es prácticamente nula en ambas potencias, lo que refleja una combustión completa con una adecuada cantidad de oxígeno disponible. Sin embargo, se detecta una ligera presencia de óxidos de nitrógeno (NO) en la potencia de 42,47 kW cuando el contenido de hidrógeno alcanza el 20% y el 30%. Este fenómeno podría atribuirse al incremento en la temperatura referencial de la llama, lo que favorece la reacción entre el nitrógeno del aire y el oxígeno en condiciones de alta temperatura.

Por otro lado, además del análisis molar de gases que posteriormente sustenta el estudio del balance de energía, es posible evaluar directamente el comportamiento esperado mediante las concentraciones moleculares de los gases de escape, específicamente de la presencia del CO_2 y H_2O . El dióxido de carbono es medido directamente, y su variación se presenta en los Gráfico 8 y Gráfico 9, donde también se incluye el comportamiento de otros productos de combustión obtenidos empíricamente. Por otro lado, el vapor de agua presente en los gases de escape del horno se determina a partir de la información molar contenida en las Tabla 10 y Tabla 11, lo que permite calcular su porcentaje volumétrico en base húmeda, el cual se visualiza en el Gráfico 10.

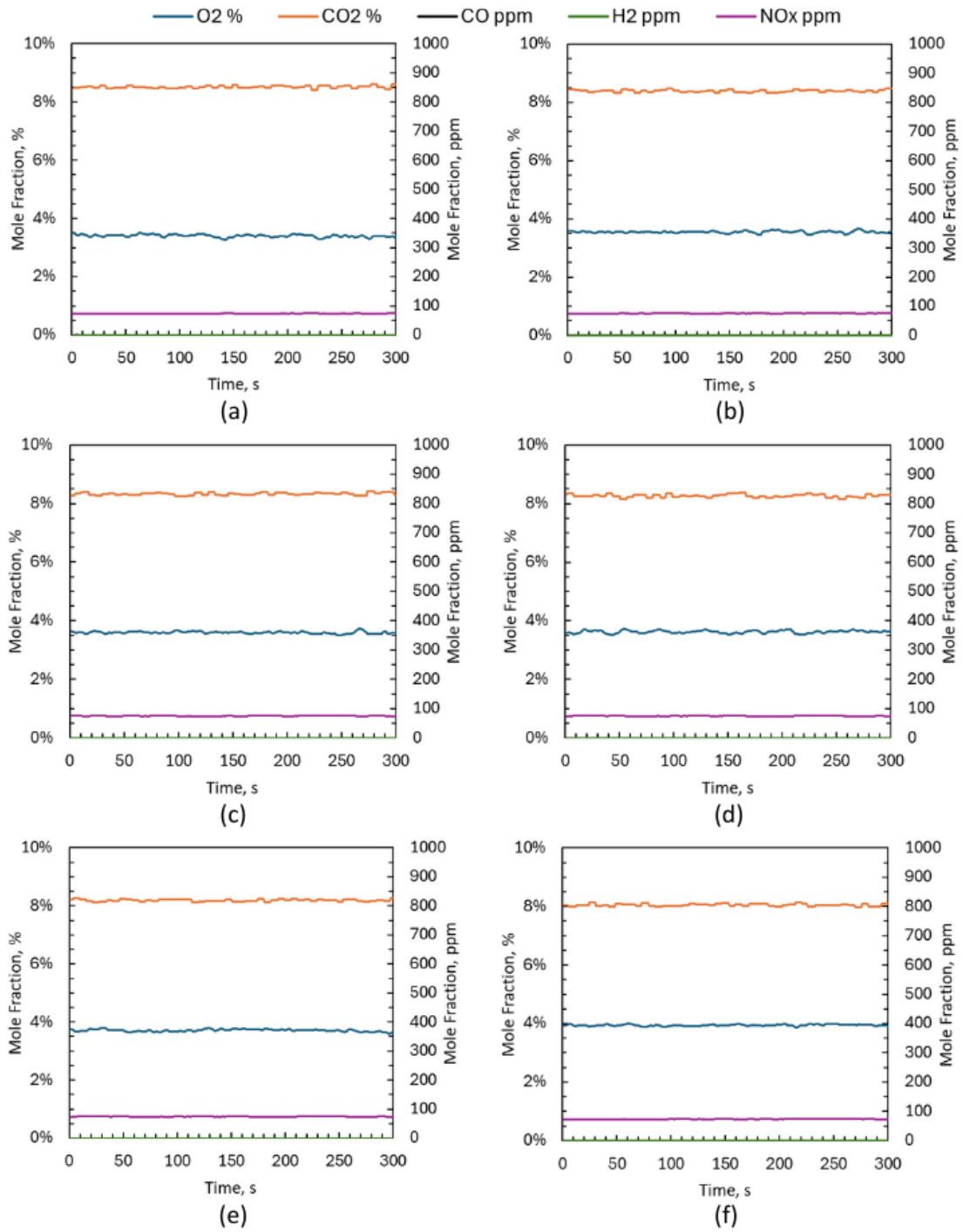


Gráfico 8. Emisiones de Combustión para Distintas Concentraciones de Hidrógeno para Potencia 33,70 kW. (a) 0%, (b) 7%, (c) 15%, (d) 20%, (e) 25% y (f) 30%.

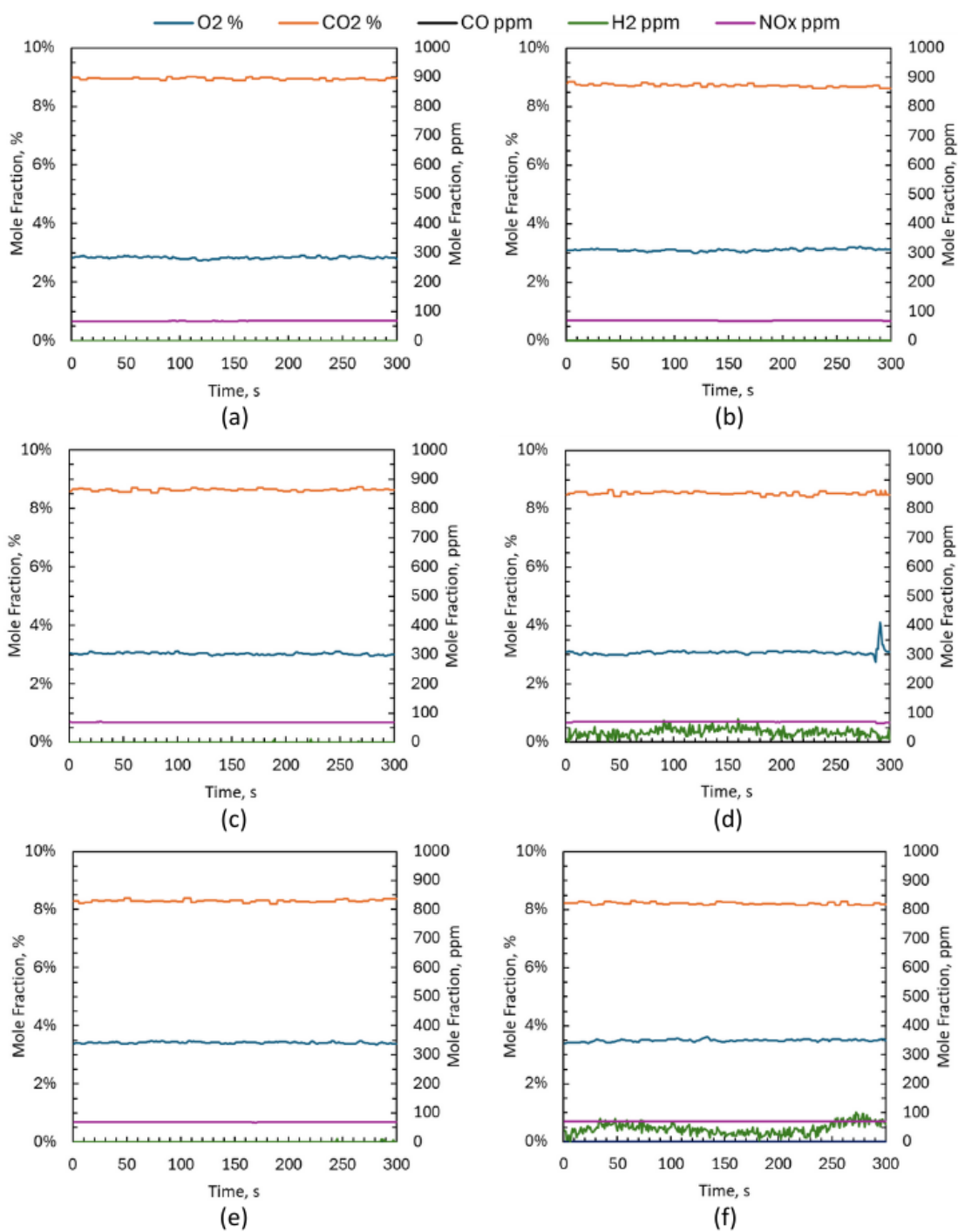


Gráfico 9. Emisiones de Combustión para Distintas Concentraciones de Hidrógeno para Potencia 42,47 kW. (a) 0%, (b) 7%, (c) 15%, (d) 20%, (e) 25% y (f) 30%.

Consistentemente con el análisis anterior, los Gráfico 8 y Gráfico 9 evidencian una disminución de las emisiones de CO_2 a medida que aumenta la concentración de hidrógeno en la mezcla. Esta reducción es más pronunciada en la combustión a 42,47 kW, lo que sugiere una conversión más eficiente del carbono contenido en los hidrocarburos a mayor potencia. En contraste, a 33,70 kW, la disminución de CO_2 es menos marcada. Este comportamiento está asociado a una menor temperatura de combustión en condiciones de menor potencia, lo que ralentiza la oxidación completa del carbono y, en consecuencia, limita la reducción de CO_2 .

Además, un aspecto relevante observado en el Gráfico 9 es la presencia de hidrógeno libre (H_2) en la combustión a 42,47 kW, lo que indica que una fracción del combustible no se está quemando completamente, generando una pérdida energética, ya que el hidrógeno no oxidado no contribuye a la liberación de energía térmica. En cambio, en el Gráfico 8 (33,70 kW), no se detecta la presencia de H_2 libre, lo que sugiere una combustión más completa en esta configuración. Esto podría deberse a que, a menor potencia, la velocidad de reacción se controla de manera más eficiente, permitiendo una mejor oxidación del hidrógeno antes de la expulsión de los gases. Por su parte, las emisiones de NO_x permanecen constantes tanto respecto a la concentración de hidrógeno como a la potencia evaluada, manteniendo un valor promedio de 69 ppm a lo largo de todo el período de estudio.

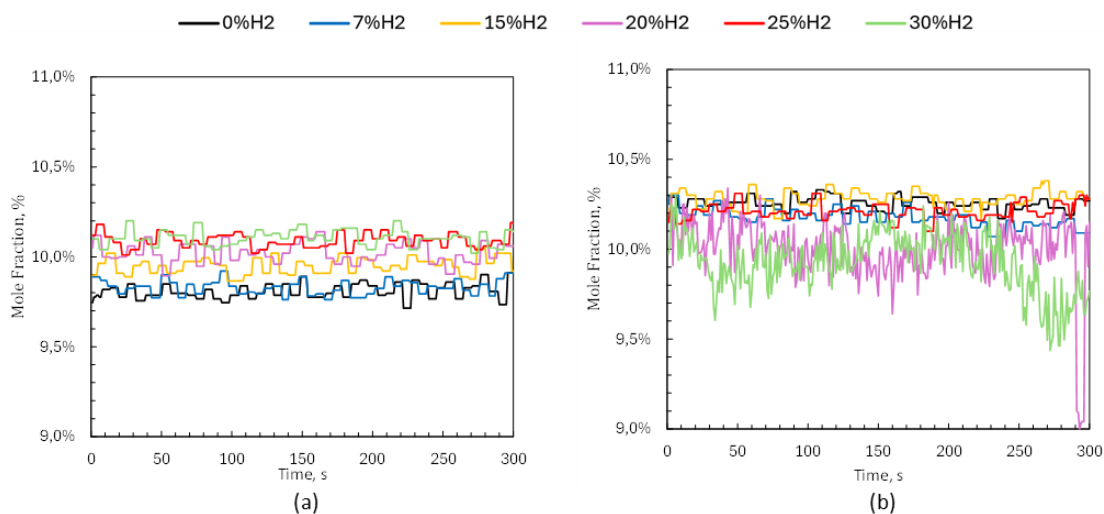


Gráfico 10. Concentraciones de Vapor de Agua para Distintos Porcentajes de Hidrógeno. (a) 33,70 kW y (b) 42,47kW.

Por otro lado, como se observa en el Gráfico 10, la generación de H_2O aumenta con el incremento de la proporción de hidrógeno en la mezcla, en concordancia con la ecuación química de reacción del hidrógeno. Además, a 42,47 kW, la producción de H_2O es mayor en comparación con la combustión a 33,70 kW, lo que sugiere que una mayor potencia favorece una conversión más eficiente del hidrógeno en vapor de agua, optimizando la radiación térmica. No obstante, a 33,70 kW, las emisiones de H_2O exhiben una mayor estabilidad, lo que indica un mejor control estadístico en la combustión y, en consecuencia, una mayor predictibilidad en la conversión del combustible.

6.4 Resultados Balances Energéticos

Para llevar a cabo un análisis energético durante los periodos de medición, es fundamental identificar cada uno de los componentes que intervienen en el balance. Estos incluyen la potencia suministrada por el combustible, restringida a dos valores (33,70 kW y 42,47 kW); la potencia absorbida por el agua de refrigeración de la cámara del horno isotérmico ($\dot{Q}_{abs} - (5.9.9)$); y la potencia transferida por los gases de escape

del horno ($\dot{Q}_{exh} - (5.9.10)$). El comportamiento estacionario de estos valores, por cada concentración de hidrógeno en la mezcla combustible, se ve en la Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 12. Temperatura Referencial de Llama, Potencia, Potencia Absorbida y Potencia de Gases de Escape para Potencia 33,70 kW.

% H ₂	$T_{13} [^{\circ}C]$	$\dot{Q}_{abs} [kW]$	$\dot{Q}_{exh} [kW]$
0	781,69	25,93	5,93
7	781,20	30,30	5,89
15	780,79	30,44	5,85
20	781,52	27,92	5,86
25	780,25	25,79	5,86
30	789,63	26,56	5,90

Tabla 13. Temperatura Referencial de Llama, Potencia Absorbida y Potencia de Gases de Escape para Potencia 42,47 kW.

% H ₂	$T_{13} [^{\circ}C]$	$\dot{Q}_{abs} [kW]$	$\dot{Q}_{exh} [kW]$
0	780,05	27,03	8,28
7	757,80	22,83	8,41
15	764,59	24,93	8,46
20	761,32	31,00	8,48
25	784,04	30,85	8,63
30	780,22	33,98	8,61

Con respecto a la temperatura referencial de llama (T_{13}), que se incluye para estudiar su relación con el desempeño de la combustión. A una potencia de 33,70 kW, se mantiene relativamente estable en torno a los 780°C, con un ligero aumento hasta 789,63°C al alcanzar un 30% de hidrógeno en la mezcla. En contraste, a 42,47 kW, la temperatura muestra una mayor variabilidad y, en ciertos casos, valores inferiores a los registrados a 33,70 kW, especialmente en concentraciones intermedias de hidrógeno (7-20%). Este comportamiento sugiere que la presencia de hidrógeno libre en la

combustión a mayor potencia puede estar asociada a una menor eficiencia en la liberación de calor, lo que afecta la estabilidad térmica del sistema.

Por otro lado, la cantidad de energía absorbida por el agua de refrigeración ($\dot{Q}_{abs}$), para una potencia de 33,70 kW, fluctúa entre 25,79 y 30,44 kW, alcanzando su punto máximo con una concentración de hidrógeno del 15%. En contraste, a 42,47 kW, la energía absorbida es superior, registrando un valor máximo de 33,98 kW cuando la mezcla contiene un 30% de hidrógeno. Este comportamiento muestra que un mayor contenido de hidrógeno favorece la generación de calor, aumentando la transferencia térmica hacia el sistema de refrigeración. En particular, en la condición de mayor potencia, la disipación de calor es más pronunciada, lo que indica que, aunque parte del hidrógeno no reacciona completamente, la cantidad de calor cedida al sistema de enfriamiento es levemente mayor.

En el caso del calor remanente en los gases de escape ($\dot{Q}_{exh}$), en la combustión a 33,70 kW, la potencia térmica contenida en estos gases permanece relativamente estable, con valores entre 5,85 y 5,93 kW, lo que indica pérdidas térmicas constantes. Sin embargo, a 42,47 kW, aumenta significativamente, registrando valores entre 8,28 y 8,61 kW, lo que evidencia una mayor cantidad de energía desaprovechada. Este incremento sugiere que, a medida que se eleva la potencia, una proporción mayor del calor generado no es absorbida por el sistema, lo que incita analizar qué componente de los gases de combustión provoca principalmente este fenómeno. Para ello, se presentan a continuación las Tabla 14 y Tabla 15 donde se muestra, por un lado, la temperatura de los gases a la salida del horno isotérmico y, por otro, la distribución de las potencias asociadas a cada uno de los gases producto al abandonar el sistema.

Tabla 14. Temperatura y Potencia Térmica en kW de los Gases de Escape Diferenciada por Composición Molecular para Potencia 33,70 kW.

% H ₂	$T_{12}[^{\circ}\text{C}]$	$\dot{Q}_{CO_2}$	$\dot{Q}_{H_2O}$	$\dot{Q}_{N_2}$	$\dot{Q}_{O_2}$	$\dot{Q}_{SO_2}$	$\dot{Q}_{CO}$	$\dot{Q}_{NO}$	$\dot{Q}_{H_2}$
0	314,97	0,608	0,644	4,185	0,177	0,321	0,000	0,000	0,000
7	312,09	0,595	0,641	4,155	0,183	0,316	0,000	0,000	0,000
15	310,69	0,586	0,644	4,125	0,184	0,311	0,000	0,000	0,000
20	311,44	0,583	0,651	4,136	0,186	0,311	0,000	0,000	0,000
25	310,56	0,577	0,656	4,136	0,191	0,309	0,000	0,000	0,000
30	314,11	0,571	0,661	4,166	0,204	0,304	0,000	0,000	0,000

Tabla 15. Temperatura y Potencia Térmica en kW de los Gases de Escape Diferenciada por Composición Molecular para Potencia 42,47 kW.

% H ₂	$T_{12}[^{\circ}\text{C}]$	$\dot{Q}_{CO_2}$	$\dot{Q}_{H_2O}$	$\dot{Q}_{N_2}$	$\dot{Q}_{O_2}$	$\dot{Q}_{SO_2}$	$\dot{Q}_{CO}$	$\dot{Q}_{NO}$	$\dot{Q}_{H_2}$
0	362,27	0,886	0,938	5,816	0,205	0,437	0,000	0,000	0,000
7	363,32	0,879	0,946	5,917	0,228	0,444	0,000	0,001	0,000
15	364,14	0,875	0,962	5,948	0,224	0,456	0,000	0,001	0,000
20	365,36	0,866	0,938	5,953	0,228	0,473	0,000	0,001	0,024
25	365,36	0,859	0,975	6,076	0,258	0,465	0,000	0,001	0,000
30	370,72	0,851	0,946	6,046	0,263	0,471	0,000	0,001	0,032

La temperatura referencia de los gases a la salida del horno isotérmico, para 33,70 kW, varía entre 310,56°C y 314,97°C, mostrando una leve disminución con el incremento del porcentaje de hidrógeno, salvo a 30%, donde se observa un aumento. En contraste, a 42,47 kW, la temperatura tiene un leve incremento, fluctuando entre 362,27°C y 370,72°C, lo que indica una mayor cantidad de calor retenido en los gases de escape. Este incremento representa aproximadamente un 19% más en comparación con la combustión a menor potencia, lo que sugiere que una fracción mayor del calor generado no es absorbida por el sistema y se pierde a través de los gases producto. Por otro lado, la temperatura de referencia muestra una coherencia con las emisiones de NOx medidas en ambas potencias (Gráfico 8 y Gráfico 9), ya que estas se mantienen en un régimen

estable. Esto es consistente con el hecho de que la formación de NO_x ocurre a temperaturas elevadas, lo que sugiere que el comportamiento de la llama se encuentra bajo control.

Si se analiza comparando las contribuciones de cada componente gaseoso al total de energía transportada, el nitrógeno (N₂) es el principal responsable del aumento en la pérdida de energía debido a su alta concentración en los gases de combustión. A 33,70 kW, su potencia térmica varía entre 3,893 kW y 3,948 kW, mientras que, a 42,47 kW, su valor aumenta significativamente, oscilando entre 5,493 kW y 5,729 kW, representando el mayor incremento entre todos los gases. Sin embargo, aunque el N₂ parece ser el gas con mayor impacto debido a su elevado valor con respecto a los demás, todas las potencias de los gases de escape siguen la misma razón de aumento en función de la diferencia de temperatura previamente mencionada. En este sentido, el análisis detallado de los gases de escape se rige únicamente por esta temperatura mayor y no por una anomalía en las concentraciones molares de los gases en ambos casos.

Ahora bien, considerando la naturaleza del quemador y el contexto actual de incorporación de tecnologías de cero emisiones, resulta pertinente evaluar su rendimiento desde la perspectiva de una aplicación industrial, en la que el quemador transfiera calor a un fluido de trabajo dentro del horno. Para ello, se emplea la ecuación de eficiencia térmica (5.9.11), cuyos resultados se presentan en el Gráfico 11.

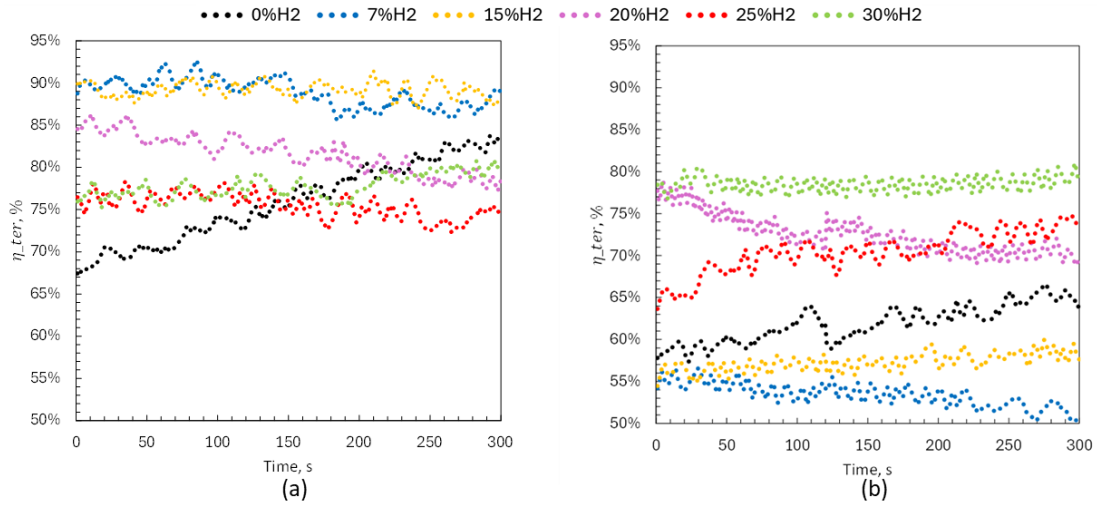


Gráfico 11. Eficiencia Térmica para Distintas Concentraciones de Hidrógeno. (a) 33,70 kW y (b) 42,47kW.

La eficiencia térmica posee comportamientos distintos en función de la potencia aplicada. A 33,70 kW, se observa que la eficiencia es relativamente estable a bajas concentraciones de hidrógeno y alcanza su máximo, aproximadamente al 15%; a concentraciones superiores, no aumenta de forma significativa o incluso disminuye, lo que sugiere una combustión más estable y completa con menores aportes de hidrógeno. En contraste, a 42,47 kW se evidencia una mayor variabilidad, incrementándose progresivamente la eficiencia térmica en función del contenido de hidrógeno hasta alcanzar un óptimo, situado al 30%, donde se logra una combustión más completa, pese a registrar mayores pérdidas de calor en los gases de escape, manifestadas en una elevada temperatura y en la presencia de hidrógeno libre.

6.5 Análisis Temperatura del Manto del Horno Isotérmico

Complementario a los análisis previos, se evalúa el comportamiento de las temperaturas del manto del horno isotérmico, específicamente las temperaturas previamente mencionadas: T_6 , T_7 , T_9 y T_{10} (Ilustración 5).

Tabla 16. Temperaturas Manto Horno Isotérmico para Potencia 33,70 kW.

% H₂	$T_6[^\circ\text{C}]$	$T_7[^\circ\text{C}]$	$T_9[^\circ\text{C}]$	$T_{10}[^\circ\text{C}]$
0	194,08	254,30	229,62	282,11
7	193,89	251,96	228,12	276,88
15	193,23	249,94	226,61	273,78
20	193,15	248,78	225,66	272,26
25	193,20	248,13	225,45	271,14
30	192,53	244,41	221,83	269,53

Tabla 17. Temperaturas Manto Horno Isotérmico para Potencia 42,47 kW.

% H₂	$T_6[^\circ\text{C}]$	$T_7[^\circ\text{C}]$	$T_9[^\circ\text{C}]$	$T_{10}[^\circ\text{C}]$
0	195,74	257,26	236,77	304,43
7	198,37	258,99	238,41	303,32
15	200,29	258,73	238,68	303,84
20	201,02	258,26	238,01	303,65
25	205,90	262,57	240,53	309,52
30	205,85	261,63	240,04	306,52

Para la potencia de 33,70 kW (Tabla 16), se observa una disminución progresiva en todas las temperaturas del manto a medida que aumenta la concentración de H₂ en la mezcla combustible. En particular, T_6 presenta una reducción leve y prácticamente lineal, con una variación de aproximadamente 0,8% entre 0% y 30%. Por su parte, T_7 y T_9 muestran una disminución más notable, alcanzando reducciones del 3,9% y 3,4%, respectivamente. Finalmente, T_{10} experimenta la mayor caída, con un descenso del 4,5%, lo que sugiere un menor aporte térmico en esta zona del manto.

En contraste, para la potencia de 42,47 kW (Tabla 17), las temperaturas del manto presentan una tendencia creciente con el aumento de H₂. La temperatura T_6 muestra un incremento del 5,2%, con una mayor variación entre 20% y 25%. T_7 y T_9 también

aumentan, aunque de manera menos pronunciada, con variaciones del 1,7% y 1,4%, respectivamente, evidenciando fluctuaciones en su evolución. Finalmente, T_{10} registra un aumento del 1,7%, manteniendo una progresión prácticamente lineal en todo el rango de concentraciones de hidrógeno analizado.

En términos generales, los resultados sugieren que el efecto del hidrógeno sobre la temperatura del manto depende de la potencia del sistema. A menor potencia, su presencia genera una reducción en las temperaturas, mientras que a mayor potencia, provoca un incremento térmico. Este comportamiento resalta la necesidad de un análisis detallado de los mecanismos de combustión y transferencia de calor involucrados, considerando en particular la influencia de la radiación y la eficiencia de combustión del hidrógeno en cada escenario.

CONCLUSIONES

La presente investigación aborda experimentalmente la combustión de la mezcla GLP- H_2 en un quemador industrial instalado en un horno isotérmico, cumpliendo de manera integral los objetivos específicos planteados. Se logra generar técnicamente el entorno para ejecutar las pruebas, además de contar con varios episodios de medición que permiten obtener un conocimiento preliminar del funcionamiento del quemador operado únicamente con GLP, lo que sienta las bases para su utilización con ambos combustibles.

Se realiza una revisión de la literatura científica y técnica sobre los procesos de combustión de GLP- H_2 . Este análisis proporciona una base teórica que identifica tendencias, ventajas y desafíos asociados a la incorporación del hidrógeno en combustibles tradicionales.

Se instala e integra un quemador industrial en el horno isotérmico, incorporando sistemas de suministro de GLP, H_2 y aire. Se realiza una caracterización del horno, lo que permite ajustar su funcionamiento de acuerdo con las dimensiones térmicas del horno isotérmico. Asimismo, se implementa un bastidor para regular el ingreso de H_2 desde su cilindro respectivo y se establece una conexión bypass para unir las líneas de flujo del combustible. La correcta configuración del sistema permite establecer un entorno controlado y seguro, fundamental para la realización de las pruebas experimentales.

Se ejecutan ensayos en los que se varían las concentraciones de H_2 en el GLP, regulándose de forma precisa el suministro de aire. Se desarrollan pruebas utilizando diferentes equipos de medición para obtener datos de temperaturas, emisiones, presiones y flujo en la carcasa del manto del horno isotérmico. Además, se diseña un protocolo exhaustivo de puesta en marcha, lo que posibilita evaluar el comportamiento de la combustión bajo distintas condiciones operativas y contribuye a la optimización del rendimiento del quemador.

Se analizan los datos obtenidos en función de las emisiones y del balance energético del horno isotérmico. El estudio del balance químico, fundamentado en un análisis elemental y en mediciones precisas (de oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre e hidrógeno), permite determinar las moles de los productos y evidenciar que la relación aire-combustible (RAC) experimenta un leve incremento con la adición de hidrógeno. Este comportamiento se asocia a la mayor presencia de hidrógeno en la mezcla, que reduce la proporción de GLP y eleva el exceso de aire (λ), manteniéndose en valores cercanos a 1,6. Asimismo, se observa una disminución progresiva de la concentración de CO₂, lo que confirma que el hidrógeno, al ser un combustible libre de carbono, desplaza parcialmente a los hidrocarburos y reduce su formación. Es importante destacar que, con la adición de H₂, el propano se quema en la misma razón que lo hacía en su ausencia, evidenciado por la nula emisión de CO y la constante concentración de oxígeno residual, lo que indica una combustión completa, salvo en condiciones específicas a 42,47 kW.

Asimismo, al comparar los resultados obtenidos con lo establecido en el DS31, se observa lo siguiente: la concentración de O₂ fluctúa en torno al 3%, situándose dentro del rango normativo de 2-9%. El CO₂ mantiene valores cercanos al 9%, cumpliendo con el intervalo permitido de 5-10%. Además, las mediciones de CO indican una ausencia total de este compuesto durante todo el período de estudio. En cuanto a los NO_x, sus niveles se mantienen controlados entre 20 y 100 ppm, mientras que las emisiones de SO₂ registran aproximadamente 5 ppm, cumpliendo con los límites establecidos en la normativa.

Por otro lado, en el análisis del balance energético se evalúan parámetros como la potencia absorbida por el sistema de refrigeración y la energía contenida en los gases de escape. A una potencia de 33,70 kW, la potencia absorbida por el agua de refrigeración alcanza su máximo alrededor del 15% de hidrógeno, mientras que la energía contenida en los gases de escape se mantiene relativamente estable. En contraste, a 42,47 kW, se registra una mayor transferencia térmica hacia el sistema de refrigeración, alcanzando un valor máximo al 30% de hidrógeno, y se observa un

incremento de la energía en los gases de escape, lo cual está ligado íntegramente al valor de sus temperaturas. No obstante, el calor absorbido debido a la combustión aumenta conforme se incrementa la potencia, aunque no lo suficiente para mejorar la eficiencia térmica. Este comportamiento se atribuye a la mayor presencia de H_2O en los productos de combustión.

El análisis de la eficiencia térmica revela comportamientos distintos en función de la potencia aplicada. A 33,70 kW, la eficiencia se mantiene estable a bajas concentraciones de hidrógeno y alcanza su máximo alrededor del 15%, lo que sugiere una combustión más estable y completa con menores aportes de hidrógeno. En cambio, a 42,47 kW la eficiencia mejora progresivamente con el incremento del contenido de hidrógeno, optimizándose al 30% a pesar de las mayores pérdidas térmicas en los gases de escape. Cabe destacar que, a pesar de que la combustión con mayor potencia fue menos eficiente, esto quizá se deba al tamaño del horno isotérmico, ya que a potencias elevadas no se logra transferir correctamente el calor al manto, provocando que los gases de escape salgan a mayor temperatura. Es importante además considerar que las pruebas se realizaron con una única configuración del servomotor de aire para cada potencia, utilizando el mismo flujo de aire en todas las mediciones, configuración pensada para optimizar la combustión a 0% de hidrógeno, lo cual podría limitar el rendimiento cuando se aumenta el contenido de hidrógeno. Con dichas consideraciones, se concluye que para la primera potencia analizada (33,70 kW), el comportamiento a lo largo de las distintas concentraciones se mantiene estable. Asimismo, para la capacidad de aire instalada, se recomienda una concentración del 15 % en volumen de H_2 en la mezcla de combustible. En cuanto a la segunda potencia evaluada (42,47 kW), se observa que, hasta un 15% de H_2 , la tecnología empleada permite alcanzar una combustión eficiente.

Estos resultados confirman que la incorporación de hidrógeno en la mezcla combustible puede favorecer una combustión más limpia y, en determinadas condiciones, mejorar la transferencia de calor y la eficiencia energética del sistema. Sin embargo, es fundamental destacar que los hallazgos presentados corresponden a este

quemador y horno en particular, por lo que están estrechamente vinculados a sus dimensiones y características de diseño. La optimización de la mezcla aire-combustible debe ajustarse a la potencia operativa: en configuraciones de menor potencia se debe evitar el exceso de hidrógeno para mantener la estabilidad y eficiencia, mientras que en sistemas de mayor potencia el incremento del hidrógeno hasta el 30% resulta beneficioso para maximizar la eficiencia térmica, aunque se requieran estrategias adicionales para mitigar las pérdidas de calor y lograr una transferencia óptima hacia el manto del horno. Estos aspectos resaltan la importancia de adaptar el análisis y la optimización de la combustión a las particularidades de cada equipo, considerando que la extrapolación de estos resultados a otros sistemas debe tener en cuenta sus dimensiones y condiciones específicas.

Recomendaciones

A continuación, se proponen trabajos futuros para continuar con la línea de investigación:

- Evaluar el desempeño de la combustión utilizando concentraciones mayores de hidrógeno, con el fin de determinar la razón volumétrica a la que se puede mantener la llama.
- A partir de los puntos de operación obtenidos en esta investigación, establecer la relación óptima de aire y combustible para cada uno de ellos.
- Considerar análisis de eficiencia térmica para cada uno de los combustibles de la mezcla.

BIBLIOGRAFÍA

- Aki, H., Yamamoto, S., Kondoh, J., Maeda, T., Yamaguchi, H., Murata, A., & Ishii, I. (2016). Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen in residential areas. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Baltur S.p.A. (3 de Noviembre de 2024). *Quemadores: Baltur*. Obtenido de Baltur Energy for People: https://www.baltur.com/ww/en/products/burners/gas_burners/btg_15_50-60hz
- BOIERO S.A. (3 de Noviembre de 2024). *BOIERO Ciudades + Inteligentes*. Obtenido de https://www.boiero.com.ar/catalogo/30_gallus-g4-g25
- Buttler, A., & Spliethoff, A. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 82 (3), 2440-2454.
- Carpuso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., & Camporeale, S. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*.
- Comercial OZ. (10 de Noviembre de 2024). *Comercial OZ*. Obtenido de https://www.comercialoz.cl/MLC-549486997-detector-digital-de-gas-profesional-pilas-_JM
- Contestabile, M., Offer, G., Slade, R., Jaeger, F., & Thoennes, M. (2011). Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner? *Energy & Environmental Science*.
- EPCM Holdings. (2022). *epcmholdings.com*. Obtenido de <https://epcmholdings.com/what-is-the-future-of-lpg/>
- Europe, H. (2023). *Asociación Española del Hidrógeno*. Obtenido de <https://aeh2.org/hidrogeno/>

- Fernández, C. (2005). *ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO: CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVA DE FUTURO [Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/>
- Fernández, R. (13 de Noviembre de 2024). *Statista*. Obtenido de Demanda de hidrógeno a nivel mundial entre 2030 y 2070: <https://es.statista.com/estadisticas/1292994/demanda-mundial-de-hidrogeno/>
- Fondo Monetario Internacional. (13 de Noviembre de 2024). *Fondo Monetario Internacional*. Obtenido de Finanzas y Desarrollo: <https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>
- Fundación Renovables. (2021). *El papel del hidrógeno en la transición energética*. Madrid.
- GPI meters. (1 de Noviembre de 2024). Obtenido de GPI meters: Flow Meters for Liquid Measurement : <https://www.gpimeters.com/products/g2s05n09gma-industrial-grade-flow-meter>
- Hottel, H., & Egbert, R. (1941). *The Radiation of Furnace Gases* (Vol. 63(4)). Transactions of the American Society of Mechanical Engineers.
- IRENA. (2020). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Available online.*
- Lamy, C. (2016). From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Lee, K., & Ryu, J. (2005). An experimental study of the flame propagation and combustion characteristics of LPG fuel. *Fuel*.
- Lozano-Martín, D., Moreau, A., & Chamorro, C. (2022). Thermophysical properties of hydrogen mixtures relevant for the development of the hydrogen economy:

- Review of available experimental data and thermodynamic models. *Renewable Energy*.
- Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M., & Caetano, N. (2019). Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. *MDPI*, 11. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/en12060964>
- Munoz-Herrera, C., Hernández, C., Rojas, P., Bernal, L., Monzó, C., Cartagena, R., . . . Toledo, M. (2023). Experimental investigation of the co-combustion of LPG-hydrogen blends on LPG-fueled systems. *Energy*.
- Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M., . . . Kannan, A. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities. *International journal of hydrogen energy*.
- Noussan, M., Raimondi, P., Scita, R., & Hafner, M. (2021). The role of green and blue hydrogen in the energy transition a technological and geopolitical perspective. *Sustainability* 13, 298.
- Onorati, A., Payri, R., Vaglieco, B., Agarwal, A., Bae, C., Bruneaux, G., & Zhao, H. (2022). The role of hydrogen for future internal combustion engines. *International Journal of Engine Research*.
- Peng , P., Cheng , S., & Lu, F. (2020). Characterizing the global liquefied petroleum gas trading community. *ELSEVIER*, 9. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619347535?via%3Dihub#fig1>
- Pratt, R., Luzi, F., & Freeburg, W. (2017). Analysis of hydrogen as a transportation fuel FY17 report (no. PNNL-26920). . *Pacific Northwest National Lab (PNNL), Richland, WA (United States)*.
- Preuster, P., Alekseev, A., & Wasserscheid, P. (2017). Hydrogen storage technologies for future energy systems. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*.

- Renewable Energy Magazine. (13 de Noviembre de 2024). *Energías Renovables: El periodismo de las energías limpias*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/la-produccion-de-95-millones-de-toneladas-20231121>
- Sáez, A., Toledo Torres, M., & Flores-Maradiaga, A. G. (2012). Liquid butane as an alternative fuel for diesel oil burners. *Applied Thermal Engineering*, 1-8.
- Sh. Yasiry, A., & A.K. Shahad, H. (2016). An experimental study of the effect of hydrogen blending on burning velocity of LPG at elevated pressure. *international journal of hydrogen energy* 4 1.
- Shenzhen Mestek Electronics Co.,Ltd. (10 de Noviembre de 2024). *Mestek*. Obtenido de Infrared Thermometers: <http://www.mestek-tools.com/en/productdetail.aspx?detailid=138>
- Skordoulis, N., Koytsoumpa, E., & Karellas, S. (2022). Techno-economic evaluation of medium scale power to hydrogen to combined heat and power generation systems. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Smitkova, M., Janíček, F., & Riccardi, J. (2011). Life cycle analysis of processes for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13.
- Song, C. (2005). Overview of hydrogen production options for developing hydrogen energy. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*.
- Testo SE & Co. KGaA. (3 de Noviembre de 2024). *Analizador de Combustión Testo 350: Testo be sure*. Obtenido de Testo be sure: <https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350/p/0632-3510#tab-technicalData>
- Tukiman, M., Osman, S., Fawzi, Mustaffa, N., & Hanizam, R. (2018). Effect of Performance and Exhaust Emission using Liquid Phase LPG Sequential Injection as an Alternative Fuel in Spark Ignition Engine. *International Journal of Integrated Engineering*.

- Union, E. (Diciembre de 2024). *eurostat*. Obtenido de Share of fossil fuels in gross available energy:
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_FFGAE__custom_9429542/default/line?lang=en
- Wei, S. (2012). Progress in Hydrogen Production from Water. *Chemical Industry & Engineering*.
- Xiao, H. (2015). Demand of hydrogen will grow strongly due to the increment of clean fuel. *China Petrochem*, 9.
- Zainal, B., Ker, P., Mohamed, H., Ong, H., Fattah, I., Rahman, S., & Mahlia, T. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19.

ANEXOS

Tabla 18. Propiedades Termo-físicas de los Fluidos Experimentales.

Fluido	$\rho_i \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$Cp_i \left[\frac{kJ}{kg - ^\circ C} \right]$	$PCI_i \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$MM_i \left[\frac{kg}{mol} \right]$
GLP	2,182	-	46340	-
H₂	0,089	14,42	119960	2,02
Aire	-	1,01	-	-
Agua (L)	1000	4,18	-	-
H₂O (V)	-	1,94	-	18,02
CO₂	-	0,96	-	44,01
N₂	-	1,06	-	28,01
O₂	-	0,96	-	32,00
SO₂	-	0,62	-	64,06
CO	-	1,07	-	28,01
NO	-	1,02	-	30,01

Tabla 19. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 33,70 kW.

Porcentaje Volumétrico de H_2	$\dot{V}_{GLP}[L/min]$	$\dot{V}_{H_2}[L/min]$
0%	20,00	0,00
1%	19,98	0,20
2%	19,96	0,41
3%	19,93	0,62
4%	19,91	0,83
5%	19,89	1,05
6%	19,86	1,27
7%	19,84	1,49
8%	19,82	1,72
9%	19,79	1,96
10%	19,77	2,20
11%	19,74	2,44
12%	19,71	2,69
13%	19,69	2,94
14%	19,66	3,20
15%	19,63	3,46
16%	19,60	3,73
17%	19,57	4,01
18%	19,54	4,29
19%	19,51	4,58
20%	19,48	4,87
21%	19,45	5,17
22%	19,42	5,48
23%	19,38	5,79
24%	19,35	6,11
25%	19,31	6,44
26%	19,28	6,77
27%	19,24	7,12
28%	19,20	7,47
29%	19,17	7,83
30%	19,13	8,20

Tabla 20. Estimación de Flujos Volumétricos para Potencia 42,47 kW.

Porcentaje Volumétrico de H_2	$\dot{V}_{GLP}[L/min]$	$\dot{V}_{H_2}[L/min]$
0%	25,20	0,00
1%	25,17	0,25
2%	25,15	0,51
3%	25,12	0,78
4%	25,09	1,05
5%	25,06	1,32
6%	25,03	1,60
7%	25,00	1,88
8%	24,97	2,17
9%	24,94	2,47
10%	24,90	2,77
11%	24,87	3,07
12%	24,84	3,39
13%	24,80	3,71
14%	24,77	4,03
15%	24,73	4,37
16%	24,70	4,70
17%	24,66	5,05
18%	24,62	5,41
19%	24,59	5,77
20%	24,55	6,14
21%	24,51	6,51
22%	24,46	6,90
23%	24,42	7,30
24%	24,38	7,70
25%	24,34	8,11
26%	24,29	8,53
27%	24,24	8,97
28%	24,20	9,41
29%	24,15	9,86
30%	24,10	10,33

