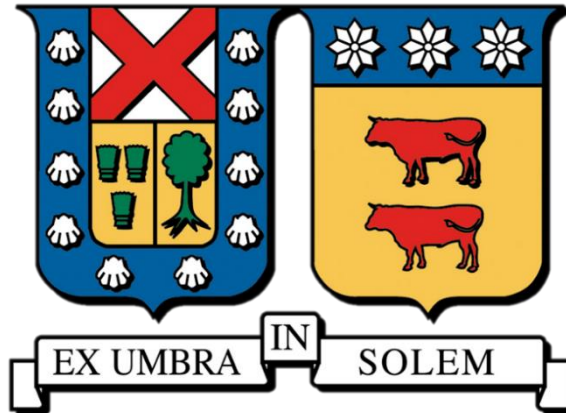


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO – CHILE**



**“Investigación experimental de la premezcla de gas natural con hidrógeno en un quemador de medio poroso inerte para la generación de aire caliente”**

**DANNY CASTILLO ITURRIETA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. Mario Toledo T.**  
**PROFESOR CORREFERENTE: PhD. Rodrigo Barraza V.**

Agosto - 2023

## Índice de contenidos

1. Introducción y objetivos .....	15
1.1 Introducción .....	15
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo general .....	19
1.2.2 Objetivos específicos .....	19
2. Marco teórico.....	20
2.2 Hidrógeno.....	20
2.2.1 Propiedades hidrógeno .....	21
2.2.2 Hidrógeno en el mundo .....	22
2.2.3 Hidrógeno en Chile .....	24
2.3 Gas natural .....	27
2.3.1 Propiedades gas natural.....	29
2.3.2 Gas natural en el mundo.....	30
2.3.3 Gas natural en Chile .....	32
2.4 Medios porosos inertes.....	33
2.5 Combustión completa y combustión estequiométrica.....	35
2.6 Parámetros de operación .....	36
2.7 Mezcla gas natural e hidrógeno .....	39
2.8 Generador de aire caliente.....	45
3. Diseño experimental .....	48
3.1 Elementos del sistema.....	48
3.1.1 Quemador MPI.....	48
3.1.2 Instalación en el laboratorio .....	49

3.1.3 Línea de hidrógeno.....	53
3.1.4 Línea de gas natural .....	55
3.1.5 Línea de aire.....	57
3.1.6 Línea de mezcla.....	58
3.1.7 Instrumentos y equipos de medición.....	59
3.2 Cálculo de flujos .....	63
3.3 Cálculo de calores .....	72
3.4 Cálculo de densidades.....	73
4. Procedimiento experimental.....	73
4.1 Previo a encendido .....	73
4.2 Encendido.....	74
4.3 Apagado .....	75
4.4 Registro de datos.....	75
5. Resultados experimentales y análisis .....	76
5.1 Mediciones de temperatura .....	77
5.1.1 Resultado de mediciones de temperatura.....	77
5.1.2 Análisis de mediciones de temperatura.....	84
5.2 Mediciones de gases productos.....	91
5.2.1 Resultado de mediciones de gases productos .....	91
5.2.2 Análisis de mediciones de gases productos .....	96
5.3 Análisis teórico de adición de hidrógeno a GAC (modo directo).....	99
6. Conclusiones.....	104
7. Bibliografía.....	107
8. Anexos.....	111

## Índice de gráficos

<b>Gráfico 1.1</b> Concentraciones atmosféricas globales de CO <sub>2</sub> en [ppm]. Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA) [3] .....	16
<b>Gráfico 1.2</b> Cambios en la temperatura global en superficie durante los últimos 170 años. Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [4].....	17
<b>Gráfico 1.3</b> Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector. Fuente: Our World in Data [5] (Con datos de Climate Watch y World Resources Institute) .....	17
<b>Gráfico 2.4</b> Densidad energética para distintos combustibles. Fuente: [11] .....	22
<b>Gráfico 2.5</b> Demanda de hidrógeno global por país y por sector. Fuente: International Energy Agency (IEA) [12] .....	23
<b>Gráfico 2.6</b> Demanda del hidrógeno en la industria. Fuente: International Energy Agency (IEA) [12] .....	24
<b>Gráfico 2.7</b> Capacidad instalada de Chile por fuente en [MW]. Fuente: Generadoras de Chile [15].....	25
<b>Gráfico 2.8</b> Estimación [USD/kg] de hidrógeno para el año 2030 de distintos países. Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18] .....	26
<b>Gráfico 2.9</b> Proyección de mercados chilenos de hidrógeno verde y derivados (BUSD). Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18] .....	27
<b>Gráfico 2.10</b> Demanda mundial de gas natural por región, 2015-2025. Fuente: International Energy Agency (IEA) [23] .....	30
<b>Gráfico 2.11</b> Desglose del crecimiento pronosticado en la demanda mundial del gas natural, 2021-2025. Fuente: International Energy Agency (IEA) [23] .....	31
<b>Gráfico 2.12</b> Producción de gas natural en Sudamérica, 2017-2025. Fuente: International Energy Agency (IEA) [23].....	32
<b>Gráfico 2.13</b> Índice de Wobbe de diferentes gases con o sin 10% de hidrógeno. Fuente: [32] .....	39

<b>Gráfico 2.14</b> Número de metano con o sin 10% de hidrógeno. Fuente: [32] .....	40
<b>Gráfico 2.15</b> Velocidad de llama laminar en función de distintos porcentajes de hidrógeno en mezcla con gas natural. Fuente: [32] .....	40
<b>Gráfico 2.16</b> Velocidad de llama laminar y relación de aire/combustible para diferentes gases. Fuente: [32] .....	41
<b>Gráfico 2.17</b> Funcionalidad de artefactos en relación a distintos porcentajes de hidrógeno en una mezcla con gas natural. Fuente: [34] .....	42
<b>Gráfico 2.18</b> Perfil de temperatura para el sólido y el gas en el quemador de medios porosos. Con $\phi = 0.8$ (*g: fracción de hidrógeno en el combustible) Fuente: [35] .....	43
<b>Gráfico 2.19</b> Efecto de la adición de hidrógeno en la velocidad de llama en función de $\phi$ . Fuente: [35] .....	44
<b>Gráfico 2.20</b> Efecto de la adición de hidrógeno en las emisiones de CO <sub>2</sub> en función de $\phi$ . Fuente: [35] .....	44
<b>Gráfico 3.21</b> Relación existente entre el reemplazo de hidrógeno en función potencia y en función volumen. ....	71
<b>Gráfico 3.22</b> Relación entre porcentaje de hidrógeno en función potencia y flujo total de combustible.....	72
<b>Gráfico 5.23</b> Gráfico de temperaturas promedio de los cinco puntos de medición de temperatura para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	79
<b>Gráfico 5.24</b> Temperaturas promedio termocuplas T1 para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia.....	81
<b>Gráfico 5.25</b> Temperaturas promedio termocuplas T2 para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	82
<b>Gráfico 5.26</b> Temperaturas promedio pirómetros TP1 para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia.....	82
<b>Gráfico 5.27</b> Temperaturas promedio pirómetros TP2 para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	83

<b>Gráfico 5.28</b> Temperaturas promedio pirómetros TP3 para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	83
<b>Gráfico 5.29</b> Contribución de los distintos métodos de transferencia de calor en función del porcentaje de hidrógeno en potencia de la mezcla. ....	88
<b>Gráfico 5.30</b> Calor por radiación en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla. ....	89
<b>Gráfico 5.31</b> Calor por convección en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla. ....	89
<b>Gráfico 5.32</b> Eficiencia térmica del quemador MPI en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla. ....	91
<b>Gráfico 5.33</b> Porcentajes de O <sub>2</sub> para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	93
<b>Gráfico 5.34</b> Porcentajes de CO <sub>2</sub> infrarrojo para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	94
<b>Gráfico 5.35</b> Variación de ppm de CO para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	94
<b>Gráfico 5.36</b> Variación de ppm de H <sub>2</sub> para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	95
<b>Gráfico 5.37</b> Variación de ppm de HC para composiciones de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	95
<b>Gráfico 5.38</b> Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 9 [kW] de potencia. ....	100
<b>Gráfico 5.39</b> Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 13 [kW] de potencia. ....	100
<b>Gráfico 5.40</b> Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 18 [kW] de potencia. ....	101

## Índice de imágenes

<b>Imagen 2.1</b> Arcoíris del hidrógeno. ....	20
<b>Imagen 2.2</b> Potencial energético renovable de Chile. Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18]. ....	25
<b>Imagen 2.3</b> Diferentes zonas de combustión en un MPI. ....	35
<b>Imagen 2.4</b> Diseño digital del GAC con sus partes más importantes. Fuente: [36]. ....	45
<b>Imagen 2.5</b> Fotografía real del diseño del generador de aire caliente. ....	46
<b>Imagen 2.6</b> Balance térmico del GAC (Modo indirecto). Fuente: [36]. ....	46
<b>Imagen 3.7</b> Conjunto quemador MPI. (a) Diseño real (b) Diseño digital con principales medidas. ....	49
<b>Imagen 3.8</b> Vista isométrica diseño 3D de la instalación del sistema en el laboratorio. ....	50
<b>Imagen 3.9</b> Diseño 3D del acercamiento al interior de la campana. ....	51
<b>Imagen 3.10</b> Foto real del acercamiento al interior de la campana. ....	51
<b>Imagen 3.11</b> Dibujo técnico del laboratorio simplificado. ....	52
<b>Imagen 3.12</b> Elementos del sistema de suministro de aire-combustible (líneas diferenciadas por colores). ....	53
<b>Imagen 3.13</b> Tanque cilíndrico de almacenamiento de hidrógeno. ....	54
<b>Imagen 3.14</b> Primer regulador de presión de la línea de hidrógeno. ....	54
<b>Imagen 3.15</b> Segundo regulador de presión de la línea de hidrógeno. ....	54
<b>Imagen 3.16</b> Controlador de flujo de hidrógeno. ....	55
<b>Imagen 3.17</b> Tanque cilíndrico de almacenamiento de gas natural. ....	56
<b>Imagen 3.18</b> Primer regulador de presión de la línea de gas natural. ....	56
<b>Imagen 3.19</b> Segundo regulador de presión de la línea de gas natural. ....	56
<b>Imagen 3.20</b> Controlador de flujo de gas natural. ....	57
<b>Imagen 3.21</b> Compresor de aire. ....	57

<b>Imagen 3.22</b> Filtro de aire.....	58
<b>Imagen 3.23</b> Controlador de flujo de aire.....	58
<b>Imagen 3.24</b> Válvula de paso tipo bola. ....	59
<b>Imagen 3.25</b> Válvula arrestallama. ....	59
<b>Imagen 3.26</b> Set de 3 pirómetros. ....	60
<b>Imagen 3.27</b> Termocuplas instaladas en el quemador. ....	60
<b>Imagen 3.28</b> Disposición de pirómetros y termocuplas.....	61
<b>Imagen 3.29</b> Módulo de adquisición de datos o data logger. ....	62
<b>Imagen 3.30</b> Equipo analizador de gases TESTO-350.....	63
<b>Imagen 5.31</b> Disposición de los puntos de medición de temperatura de este trabajo. ....	80
<b>Imagen 5.32</b> Disposición de los puntos de medición de temperatura del trabajo de Cristóbal Monzó.....	80

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Propiedades del hidrógeno utilizado. ....	21
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades del gas natural utilizado. ....	29
<b>Tabla 2.3</b> Capacidad de regasificación y de almacenamiento de terminales de gas natural [26]. ....	33
<b>Tabla 3.4</b> Características y propiedades del quemador MPI .....	48
<b>Tabla 3.5</b> Flujo volumétrico de H <sub>2</sub> y GN para una potencia de 3 [kW] .....	65
<b>Tabla 3.6</b> Flujos volumétricos de H <sub>2</sub> y GN, y representación en porcentajes en función potencia y en función volumen para una potencia de operación de 3 [kW].....	66
<b>Tabla 3.7</b> Volumen de aire estequiométrico real para las distintas composiciones.....	68
<b>Tabla 3.8</b> Flujo volumétrico de aire estequiométrico real para las distintas composiciones de hidrógeno de 0% a 15% en potencia.....	69
<b>Tabla 3.9</b> Comparativa entre el reemplazo en volumen con el reemplazo en energía por parte del hidrógeno y con flujos volumétricos. ....	70
<b>Tabla 5.10</b> Valores de parámetros involucrados .....	76
<b>Tabla 5.11</b> Flujos ingresados en los controladores de flujos de H <sub>2</sub> , GN y Aire. ....	77
<b>Tabla 5.12</b> Resultado temperaturas promedio de los cinco puntos de medición para composición de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia. ....	78
<b>Tabla 5.13</b> Errores instrumentales de mediciones de temperaturas.....	78
<b>Tabla 5.14</b> Temperatura registrada por el equipo TESTO-350 a 300 [mm] de la superficie del quemador MPI. ....	84
<b>Tabla 5.15</b> Calor por radiación, calor por convección, pérdidas de calor en relación al calor total y eficiencia térmica.....	87
<b>Tabla 5.16</b> Resultado emisiones promedio de gases productos para composición de 0% a 15% de H <sub>2</sub> en potencia.....	92
<b>Tabla 5.17</b> Error instrumental de mediciones de gases productos. ....	92

<b>Tabla 5.18</b> Índice de Wobbe caso solo con gas natural.....	102
<b>Tabla 5.19</b> Índice de Wobbe caso mezcla de gas natural con hidrógeno. ....	102
<b>Tabla 5.20</b> Índice de Wobbe caso solo con gas licuado de petróleo. ....	102
<b>Tabla 5.21</b> Índice de Wobbe caso mezcla de gas licuado de petróleo con hidrógeno.....	103

# GLOSARIO

## Abreviaciones

MPI	Medios porosos inertes
GAC	Generador de aire caliente
GN	Gas natural
GLP	Gas licuado de petróleo
GEI	Gases de efecto invernadero
GNL	Gas natural licuado
GNC	Gas natural comprimido
H	Poder calorífico [kJ/kg]
P	Potencia [kW] / Presión [bar]
T	Temperatura / Temperatura termocupla [°C]
TP	Temperatura pirómetro [°C]
m	Masa [kg]
V	Volumen [m <sup>3</sup> ]
V°	Volumen normalizado [Nm <sup>3</sup> /kg]
$\dot{V}$	Flujo volumétrico (caudal) [m <sup>3</sup> /s]
$\bar{h}$	Entalpía [kJ/kg]

## Simbología

$\rho$	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Relación de aire [-]
$\emptyset$	Relación de equivalencia [-]
$\epsilon$	Emisividad [-]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]

## Subíndices

$f$	Combustible
$a$	Aire utilizado
a,e	Aire estequiométrico
inf	Inferior
sup	Superior / superficial
rad	Radiación
conv	Convección
amb	Ambiente
gp	Gases productos

## **Agradecimientos**

Primero que todo debo agradecer a mi familia por todo el apoyo incondicional que me han brindado desde siempre y sobre todo en mi etapa universitaria. Siento una admiración tremenda por el inmenso sacrificio que han hecho mis padres por mí y por mis hermanos, para que podamos ser alguien en el día de mañana. Agradezco también a mis hermanos por la bondad y el apoyo inconmensurable que siempre han tenido conmigo. Le doy las gracias a mi querida abuelita por acogerme en su hogar todo este tiempo. Y a mi querida Beba, mi perrita que partió de este mundo hace no mucho y que siempre fue quien se encargaba de transmitirme la energía positiva más pura que pudiese existir.

También le agradezco inmensamente a Dios y San Expedito, quienes me ayudaron a sostenerme con firmeza ante las adversidades de la vida y a guiarme por caminos de éxito, prosperidad y bendición.

Quisiera agradecer también a mis amigos, a los que formé en el colegio, a los que formé en la misma universidad, a los que formé en el gimnasio y en otras partes, y a los primo-amigos, dado que de alguna u otra forma aportaron con un granito de arena para hacer mucho más ameno el camino universitario.

Agradezco también a mi profesor guía Mario Toledo que ha tenido una gran disposición y voluntad para ayudarme en todo este periodo de memoria. Y a los apoyos académicos David Carillo y José Duque, quienes también me ayudaron de muy buena manera en una gran cantidad de detalles relacionados con la realización de mis experimentos.

Y, por último, me agradezco a mí mismo, por la inagotable perseverancia que sostuve durante toda mi etapa universitaria.

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar la combustión entre la mezcla de gas natural (GN) con hidrógeno ( $H_2$ ) en un quemador de medios porosos inertes (MPI) para una futura implementación en un equipo generador de aire caliente (GAC).

El quemador MPI utilizado está hecho de carburo de silicio siliconado (SiSiC) y permite operar en un rango de potencia que va desde los 2,6 [kW] hasta los 13 [kW]. En este trabajo se implementó un sistema con controladores de flujos para el  $H_2$ , para el GN y para el aire. Se dispuso de dos tipos diferentes de instrumentos para medir temperatura: termocuplas, las cuales permiten medir la temperatura de los gases productos de combustión, y pirómetros, los cuales permiten medir la temperatura superficial del quemador MPI. Además, un analizador de gases permitió medir gases productos de combustión como  $CO_2$ , CO,  $O_2$ ,  $H_2$  y HC. Las pruebas se desarrollaron definiendo una potencia fija de 3 [kW] y una relación de equivalencia ( $\phi$ ) de 0,65, aproximadamente. El procedimiento experimental consideró variar progresivamente la concentración de hidrógeno en la mezcla con gas natural, desde un 0% hasta un máximo de 15% en función de la potencia total, lo que equivale variar hasta un 36,8% en volumen.

Por último, se efectuó un análisis cualitativo de lo que sucede con la eficiencia térmica en un generador de aire caliente (GAC) de modalidad directa si se añade hidrógeno a éste operando con gas natural (GN) y con gas licuado de petróleo (GLP).

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que, para la gran mayoría de puntos de medición de temperatura, cuanto mayor porcentaje de hidrógeno en la mezcla, mayor es la temperatura obtenida. Por otro lado, se obtuvo una disminución del porcentaje de  $CO_2$  a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumentaba. Por último, no fue posible concluir, con los datos obtenidos en esta investigación, si añadir hidrógeno al GAC operando con GN y GLP por separado, aumenta o no la eficiencia térmica del equipo.

**Palabras claves:** Medio poroso inerte, hidrógeno, gas natural, combustión, generador aire caliente.

## Abstract

The main objective of this work is to analyze the combustion between the mixture of natural gas (NG) with hydrogen (H<sub>2</sub>) in a burner of inert porous media (IPM) for a future implementation in a hot air generator.

The IPM burner used is made of siliconized silicon carbide (SiSiC) and allows operation in a power range from 2.6 [kW] to 13 [kW]. In this work, a system was implemented with flow controllers for H<sub>2</sub>, for NG and for air. Two different types of instruments were available to measure temperature: thermocouples, which allow the temperature of the combustion product gases to be measured, and pyrometers, which allow the surface temperature of the MPI burner to be measured. In addition, a gas analyzer made it possible to measure combustion product gases such as CO<sub>2</sub>, CO and HC. The tests were developed defining a constant power of 3 [kW] and an equivalence ratio ( $\phi$ ) of approximately 0.65. The experimental procedure considered progressively varying the concentration of hydrogen in the mixture with natural gas, from 0% to a maximum of 15% depending on the total power, which is equivalent to varying up to 36.8% by volume.

Finally, a qualitative analysis was made of what happens with the thermal efficiency in the direct mode of the hot air generator (GAC) if hydrogen is added to it operating with natural gas (NG) and with liquefied petroleum gas (LPG).

From the results obtained, it was concluded that, for the vast majority of temperature measurement points, the higher the percentage of hydrogen in the mixture, the higher the temperature obtained. On the other hand, a decrease in the percentage of CO<sub>2</sub> was obtained as the percentage of hydrogen in the mixture increased. Finally, it was not possible to conclude, with the data obtained in this investigation, if adding hydrogen to the GAC operating with NG and LPG separately, increases or not the thermal efficiency of the equipment.

**Keywords:** Porous medium, hydrogen, natural gas, combustion, hot air generator.

## **1. Introducción y objetivos**

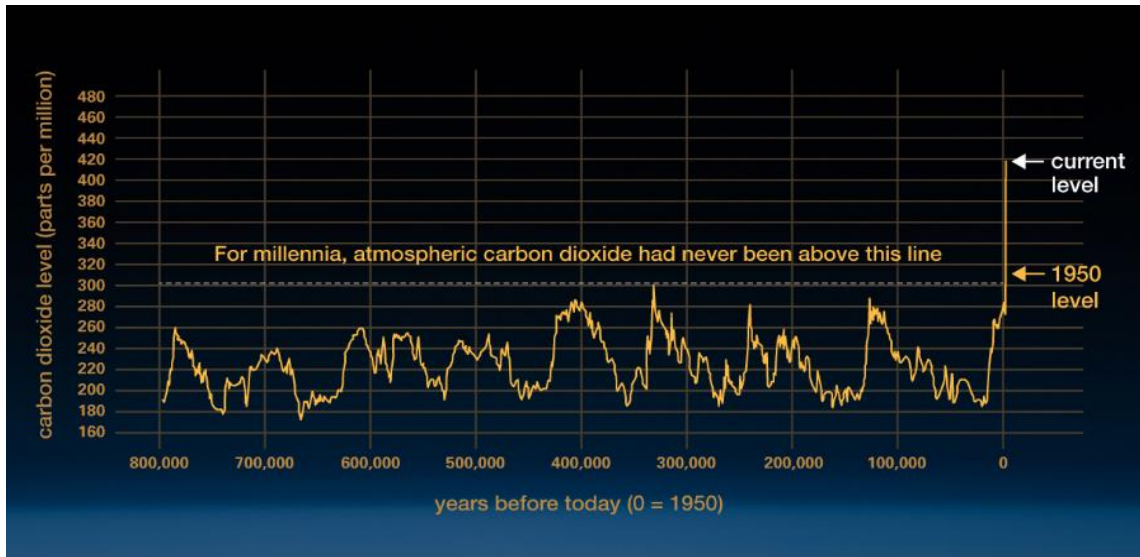
### **1.1 Introducción**

La totalidad de las investigaciones sobre el calentamiento global apuntan a que éste tiene causas antropogénicas, esto quiere decir que la especie humana es la responsable de que el planeta se esté calentando. Se ha logrado determinar que el planeta en los últimos años ha estado teniendo un aumento progresivo en su temperatura promedio. También se ha podido determinar que el océano del planeta se ha ido calentando ligeramente y que se ha expandido producto de la dilatación térmica; lo que conlleva un aumento en el nivel del mar. Además, se ha podido determinar que las capas de hielo de la Antártica y Groenlandia han disminuido considerablemente en los últimos años [1].

Los responsables de este calentamiento global son los gases de efecto invernadero (GEI), donde los principales son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los óxidos de nitroso ( $\text{NO}_x$ ), los clorofluorocarbonos (CFC) y el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). De los gases mencionados, el protagonismo se lo lleva el dióxido de carbono, el cual es liberado a la atmósfera en grandes cantidades cuando se quema combustibles fósiles [2].

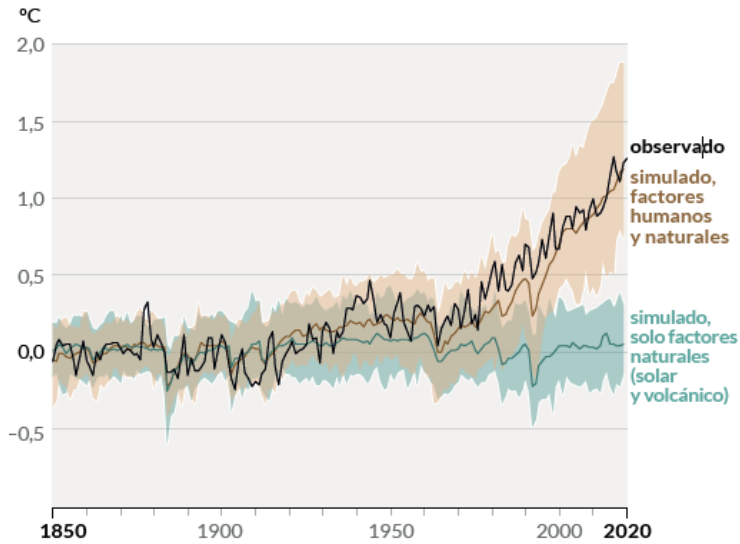
Los combustibles fósiles son descomposición de materia orgánica de animales, plantas y microorganismos que ha sido enterrada en la tierra por millones de años y que, por la acción de altas presiones y altas temperaturas, se convierten en combustibles densamente energéticos. Los tres principales combustibles fósiles son el carbón, el petróleo y el gas natural. Y como se ha mencionado, la gran desventaja de estos combustibles es que liberan grandes cantidades de dióxido de carbono -y también otros contaminantes- a la atmósfera.

Es posible saber cómo era la atmósfera en épocas distantes al analizar antiguas burbujas de aire atrapadas en capas de hielo. En el Gráfico 1.1 es posible apreciar que los niveles de dióxido de carbono nunca habían sido tan altos en un periodo de 800.000 años. Durante los periodos glaciales, los niveles de  $\text{CO}_2$  bordeaban las 200 partes por millón (ppm), y durante los periodos interglaciales más cálidos, los niveles de  $\text{CO}_2$  llegaban a picos de 280 (ppm). Sin embargo, en el año 2013 los niveles de  $\text{CO}_2$  sobrepasaron los 400 (ppm) por primera vez en lo que se tiene como registro histórico [3].



**Gráfico 1.1** Concentraciones atmosféricas globales de CO<sub>2</sub> en [ppm].  
Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA) [3]

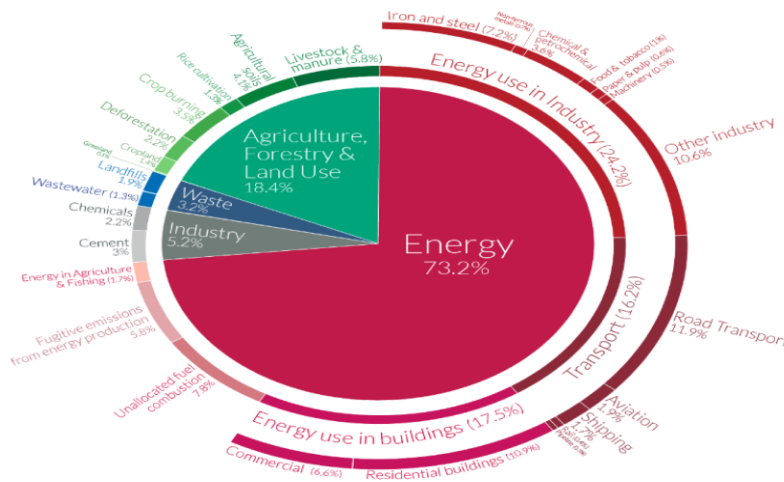
Para responder a la afirmación mencionada anteriormente, de que el calentamiento global es antropogénico, se tiene el Gráfico 1.2. La línea negra continua corresponde al cambio observado en la temperatura global del planeta. La línea verde continua corresponde al cambio de temperatura global del planeta en una simulación en la que no se considera la incidencia de la actividad humana, es decir, se consideran solo los factores naturales como el factor solar y el volcánico. La sombra verde corresponde al rango de temperaturas muy probable de dicha simulación. La línea marrón continua corresponde al cambio de temperatura global del planeta en una simulación en la que se consideran tanto los factores humanos como los factores naturales. La sombra marrón corresponde al rango de temperaturas muy probable de la simulación últimamente mencionada [4].



**Gráfico 1.2** Cambios en la temperatura global en superficie durante los últimos 170 años.

Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [4]

Resulta conveniente conocer con precisión cuál sector es el que lidera las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Gráfico 1.3 demuestra que el sector que más gases de efecto invernadero libera a la atmósfera es el sector de la energía, por consiguiente, resulta imprescindible cambiar la forma en la que se produce y se consume la energía, en donde actualmente impera el uso de combustibles fósiles.



**Gráfico 1.3** Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector.

Fuente: Our World in Data [5] (Con datos de Climate Watch y World Resources Institute)

A tenor de lo expuesto, son múltiples las iniciativas que surgen para frenar el cambio climático y, quizás la más obvia, sea la de reemplazar los combustibles fósiles por otros más amigables con el medioambiente. Por ende, es aquí donde el hidrógeno verde aparece como una de las grandes alternativas. Este hidrógeno lleva el “apellido” verde debido a que en todo su proceso de obtención no se liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera. Además, su combustión solo produce vapor de agua, el cual, si bien es un gas de efecto invernadero, es de bajo impacto en comparación al CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, son diversas las aplicaciones que se realizan usando gas natural como combustible, entre ellas destacan: quemadores de cocina, aire acondicionado, calefacción, generación de electricidad, aplicaciones industriales, entre otras. En cualquiera de estas aplicaciones lo que siempre se busca es que los procesos sean eficientes y lo menos contaminantes posible. Por ende, es aquí donde aparece la innovadora tecnología de los medios porosos inertes (MPI). Esta tecnología presenta una enorme versatilidad, puesto que son numerosas las aplicaciones en las que se usan o se pueden usar MPI, en donde se garantiza tener combustiones térmicamente más eficientes y más limpias; disminuyendo así las emisiones contaminantes que se liberan a la atmósfera.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es investigar experimentalmente la premezcla de gas natural con hidrógeno en un quemador de medio poroso inerte, para su futura aplicación en un generador de aire caliente.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Reconocer la tecnología de los quemadores de medio poroso inerte.
- Implementar un quemador con sistemas de medición y control de gas natural, hidrógeno y aire, temperatura y análisis de gases producto de la combustión.
- Desarrollar pruebas de combustión con variaciones en la concentración de hidrógeno en el gas natural, manteniendo fija la potencia y la relación de equivalencia.
- Evaluar el efecto de la adición de hidrógeno en las temperaturas, emisiones y eficiencia del quemador.
- Evaluar teóricamente la operación y eficiencia de un generador de aire caliente utilizando el quemador con la premezcla de gas natural con hidrógeno.

## 2. Marco teórico

### 2.2 Hidrógeno

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y muy inflamable. Es también el elemento químico más ligero y simple de la tabla periódica, y también el más abundante del universo. Bajo condiciones normales de presión y temperatura, el hidrógeno se encuentra como una molécula diatómica ( $H_2$ ). Si bien los átomos de hidrógeno y moléculas diatómicas de hidrógeno proliferan en el universo, en la Tierra solo se encuentra el hidrógeno unido a otros elementos. Precisamente, en la Tierra el hidrógeno se encuentra en grandes cantidades en forma de agua y en prácticamente casi todas las moléculas de los seres vivos, sin embargo, en la atmósfera se encuentra solo en pequeñas cantidades, menos de 1 (ppm) en volumen, debido a que, si ingresa a la atmósfera, por su ligereza, escapa rápidamente de la gravedad del planeta hacia el espacio exterior [6].

El hidrógeno tiene toda una gama de colores que se relacionan con su proceso de obtención o fuente de energía, como lo señala la Imagen 2.1.

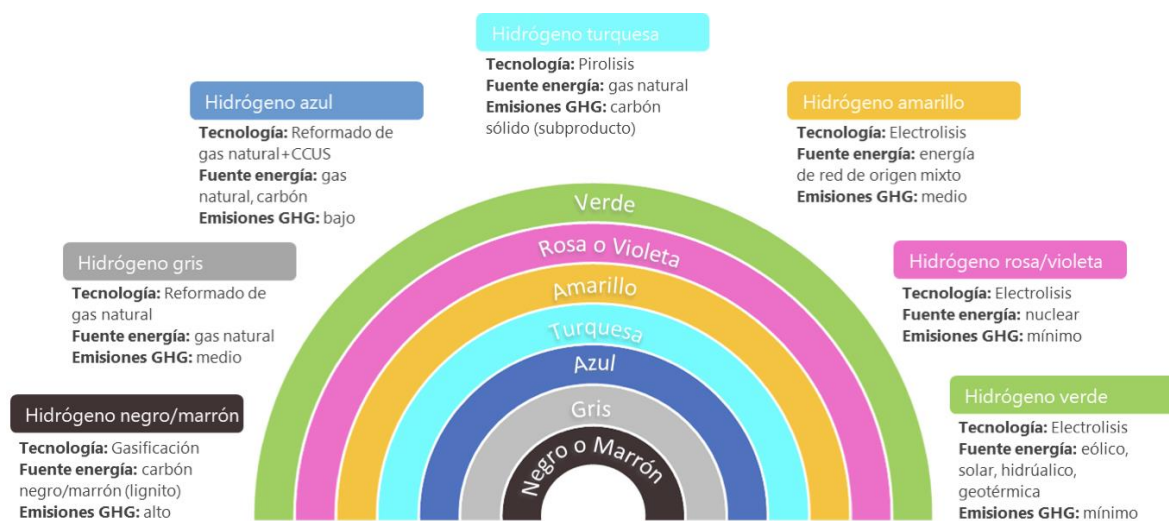


Imagen 2.1 Arcoíris del hidrógeno.

Las tres connotaciones más importantes del hidrógeno son:

- **Hidrógeno gris:** Este tipo de hidrógeno es producido a través de combustibles fósiles como gas natural o carbón y se trata del hidrógeno más ampliamente producido en el mundo. Existen principalmente dos métodos de producción: el reformado de metano

con vapor y la gasificación del carbón. Ambos procesos liberan grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera [7].

- **Hidrógeno azul:** Este tipo de hidrógeno es producido de la misma manera que el hidrógeno gris exceptuando en que se utiliza una captura y almacenamiento de carbono (CCS por sus siglas en inglés). Al realizar este proceso se reduce considerablemente el dióxido de carbono liberado a la atmósfera. A diferencia del hidrógeno gris, el hidrógeno azul es mucho más caro de producir debido a la tecnología de captura de carbono [7].
- **Hidrógeno verde:** Este tipo de hidrógeno es producido a través de un proceso químico conocido como electrólisis. En este proceso se separa el hidrógeno del oxígeno en la molécula del agua utilizando energías renovables como solar o eólica. La ventaja de este hidrógeno -y de ahí su connotación verde- es que en todo su proceso de obtención no se liberan gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono a la atmósfera, sin embargo, la electrólisis sigue siendo una tecnología con un costo medianamente alto [7].

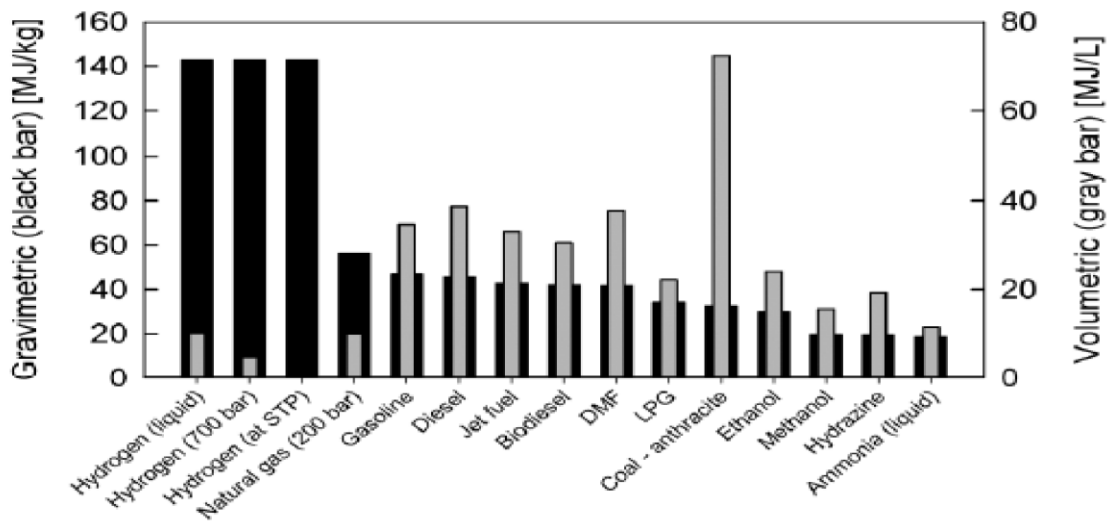
### 2.2.1 Propiedades hidrógeno

En la Tabla 2.1 se presentan las propiedades del hidrógeno utilizado.

**Tabla 2.1** Propiedades del hidrógeno utilizado.

Fórmula Química	H <sub>2</sub>
Densidad en estado gaseoso (22°C y 1 atm)	0,083 [kg/m <sup>3</sup> ]
Punto de ebullición (1 bar) [8]	-252,76 [°C]
Poder calorífico inferior (H <sub>inf</sub> ) [9]	120.000 [kJ/kg]
Poder calorífico superior (H <sub>sup</sub> ) [9]	141.800 [kJ/kg]
Velocidad de llama [8]	346 [cm/s]
Temperatura de autoignición [8]	585 [°C]

El hidrógeno tiene dos propiedades muy interesantes: la primera es que cuando se combustiona el único subproducto que genera es vapor de agua (no emite  $\text{CO}_2$  como sí lo hacen todos los combustibles fósiles), y la segunda es la elevada densidad energética por unidad de masa que posee, siendo muy superior a la que posee el carbón, el gas natural o el petróleo, lo que lo convierte en un atractivo combustible en aplicaciones en las que sea indispensable tener un bajo peso. No obstante, debido a que es el elemento más ligero de la tabla periódica, tiene una densidad energética por unidad de volumen muy baja, lo que implica que se deben utilizar mayores volúmenes de hidrógeno para satisfacer una demanda energética en comparación con otros combustibles [10]. En el Gráfico 2.4 se muestran distintos valores de densidad energética tanto por unidad de masa como por unidad de volumen para distintos combustibles [11].



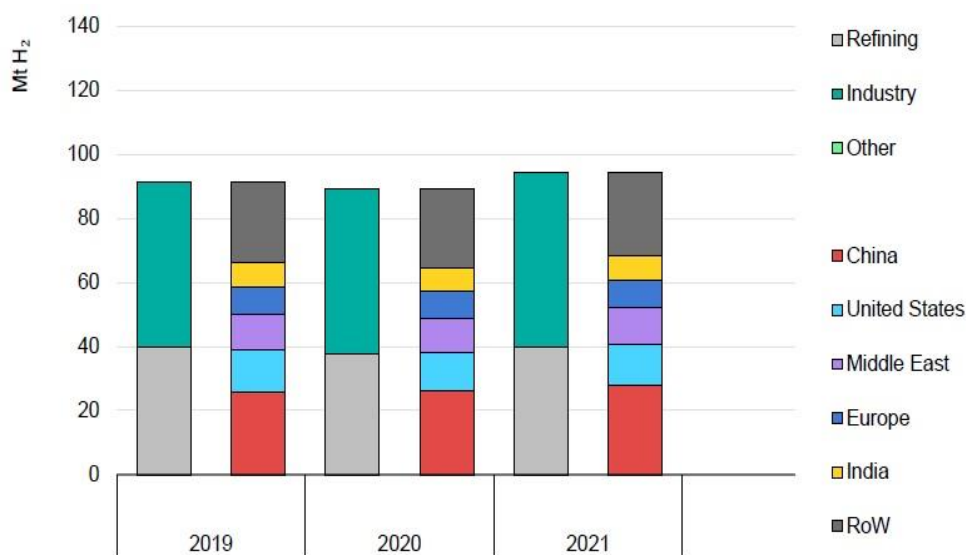
**Gráfico 2.4** Densidad energética para distintos combustibles.

Fuente: [11]

### 2.2.2 Hidrógeno en el mundo

El uso que se le da al hidrógeno globalmente dista mucho de ser un reemplazante a los combustibles fósiles. Su demanda actual se centra principalmente en la industria de la refinación, en la industria química y en la industria del acero. En el Gráfico 2.5 se observa que para el año 2021, el mayor consumidor del mundo era China, con una demanda de alrededor de 28 [Mt]  $\text{H}_2$ , le sigue Estados Unidos y el Oriente Medio con una demanda de alrededor de 12 [Mt]  $\text{H}_2$  para cada uno. Europa es el cuarto consumidor más grande con una

demanda de más de 8 [Mt] H<sub>2</sub> y el siguiente es India con una demanda de 8 [Mt] H<sub>2</sub>. El Gráfico 2.5 denota que hubo una decadencia en la demanda de hidrógeno a raíz de la pandemia de Covid-19 del año 2020, sin embargo, en el año 2021 se alcanzó una demanda de 94 [Mt] H<sub>2</sub>, siendo incluso superior a la demanda del año 2019, que fue de 91 [Mt] H<sub>2</sub> (nivel pre-pandémico) [12].



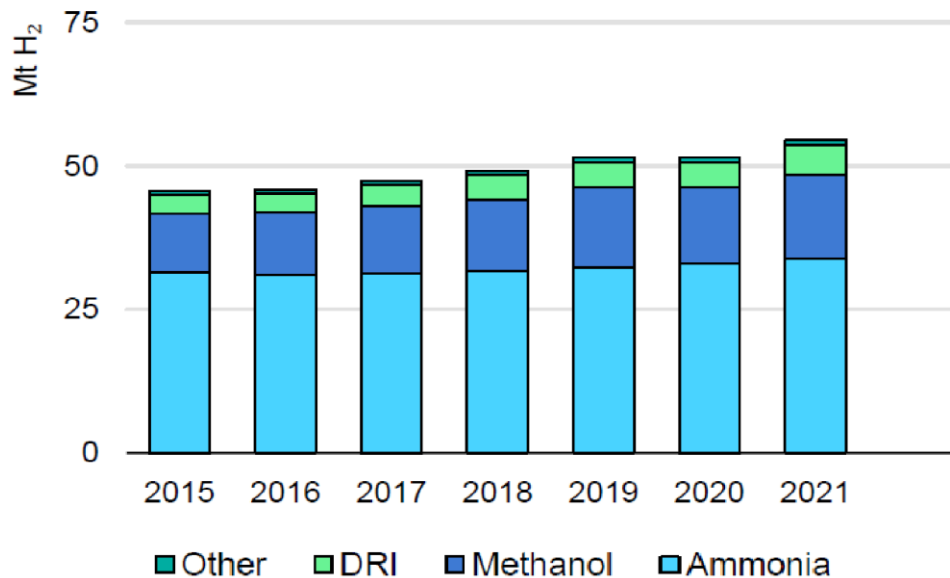
**Gráfico 2.5** Demanda de hidrógeno global por país y por sector.

Fuente: International Energy Agency (IEA) [12]

Las refinerías utilizan el hidrógeno para eliminar impurezas como el azufre de combustibles derivados del petróleo (hidrocraqueo) y también para convertir fracciones de petróleo pesado en productos más ligeros y más valiosos como diésel, gasolina y combustibles para aviones (hidrotratamiento) [13]. La demanda de hidrógeno para el año 2021 en el sector de la industria de refinación llegó a cerca de 40 [Mt] como se aprecia en el Gráfico 2.5 [12].

En relación al resto de los usos de la demanda global de hidrógeno, según el Gráfico 2.6, se utiliza hidrógeno mayormente en la industria química para la producción de amoníaco y metanol. En el año 2021, 34 [Mt] H<sub>2</sub> fueron utilizados para la producción de amoníaco y 15 [Mt] H<sub>2</sub> para la producción de metanol. También se utiliza hidrógeno en la industria del acero, en la reducción directa del hierro (DRI por sus siglas en inglés), con una demanda de alrededor de 5 [Mt] H<sub>2</sub> en el año 2021. La demanda de hidrógeno en otras y nuevas aplicaciones como en la generación de energía, el transporte, los sectores de la construcción

o en la producción de combustibles derivados del hidrógeno fue muy baja, alrededor de 40 [Kt] H<sub>2</sub>; aproximadamente el 0,04% de la demanda mundial [12].

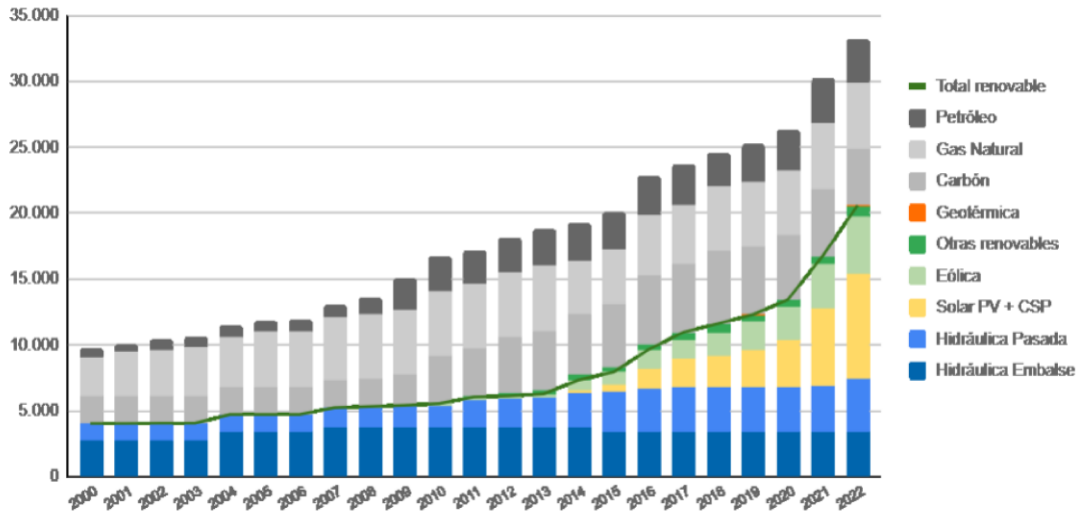


**Gráfico 2.6** Demanda del hidrógeno en la industria.

Fuente: International Energy Agency (IEA) [12]

### 2.2.3 Hidrógeno en Chile

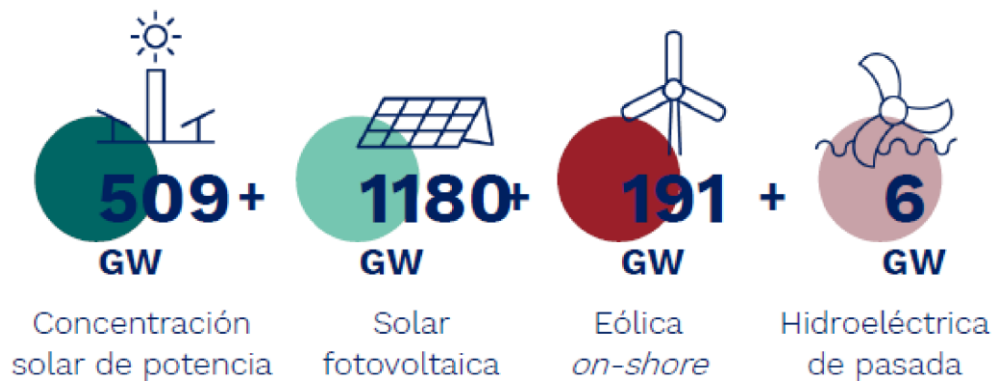
Antes de abordar la temática del hidrógeno en Chile, es preciso conocer la matriz energética del país. Para el año 2022 Chile tuvo una capacidad instalada de 33.218 [MW]. En el Gráfico 2.7, se evidencia un aumento considerable en los últimos años de la participación de energías renovables como la energía solar y eólica (esto a raíz de la disminución de costos de ambas tecnologías [14]), llegando a generar en el año 2022 un total de 20.586 [MW] de energías renovables y un total de 12.362 [MW] de energías no renovables [15].



**Gráfico 2.7** Capacidad instalada de Chile por fuente en [MW].

Fuente: Generadoras de Chile [15]

Chile es un país que sin lugar a dudas posee una geografía muy privilegiada para el uso de energías renovables. Cuenta con el Desierto de Atacama, el lugar cuya radiación solar es la más alta del mundo, llegando a valores sobre  $300 \text{ [W/m}^2\text{]}$  [16], y también cuenta con los fuertes vientos de la Patagonia, donde se han registrado ráfagas de vientos de 65 [nudos] o 120 [km/h] [17]. El Ministerio de Energía de Chile ha estimado que Chile posee más de 1800 [GW] de potencial energético renovable, lo cual equivale a 50 veces la capacidad instalada del año 2022. La Imagen 2.2 muestra los distintos tipos de energías renovables con sus respectivas estimaciones de potencial energético, cuya suma en total supera los 1800 [GW] [18].

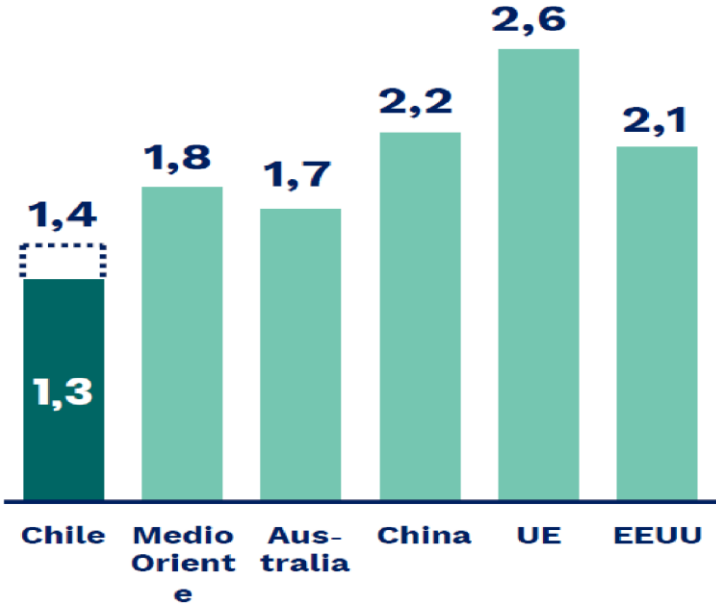


**Imagen 2.2** Potencial energético renovable de Chile.

Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18]

Considerando lo descrito en el párrafo anterior, Chile tiene una ventaja geográfica única, la cual podría otorgarle un enorme beneficio a la hora de producir hidrógeno verde con energías renovables, permitiéndole ser uno de los principales productores y exportadores de hidrógeno verde del mundo. Por lo tanto, si se añade también la disminución progresiva del costo que han estado teniendo los electrolizadores, Chile sería capaz de producir un hidrógeno verde de muy bajo costo, lo cual significa que su producción será atractiva y competitiva en el mercado mundial [18].

El Gráfico 2.8 muestra una estimación del precio que tendría el hidrógeno verde producido por distintos países para el año 2030. Se destaca que el hidrógeno verde producido en Chile, específicamente en el Desierto de Atacama y en la Región de Magallanes tendría el costo nivelado de producción más bajo del mundo para la fecha mencionada [18].

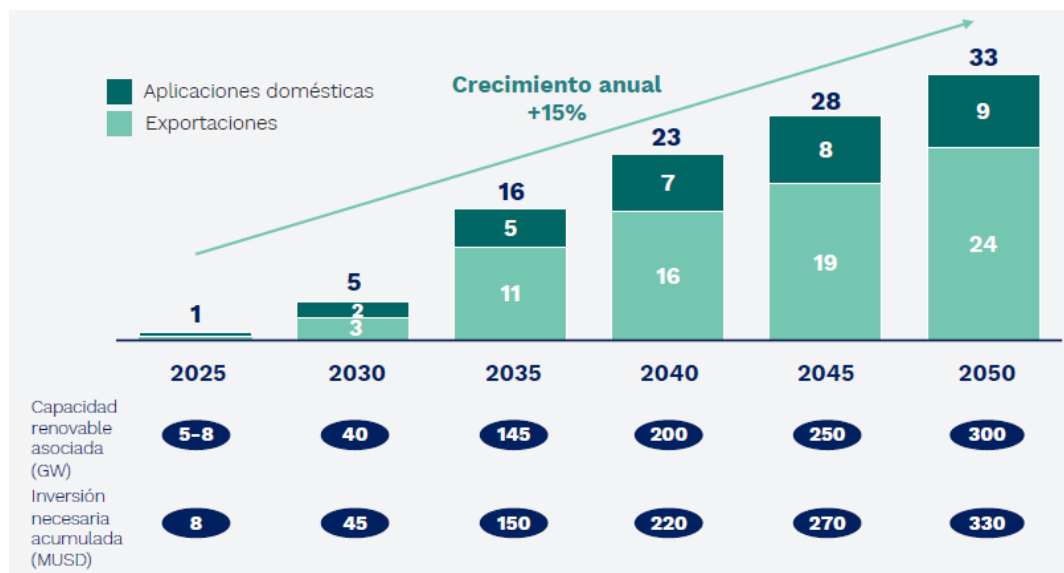


**Gráfico 2.8** Estimación [USD/kg] de hidrógeno para el año 2030 de distintos países.

Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18]

Se concluye que Chile tiene una gran oportunidad de abrirse paso a una enorme industria competitiva a nivel mundial, la cual toma de la mano a la descarbonización que tanto necesita el planeta. Incluso se pronostica que, si Chile sigue un buen plan de acción con el hidrógeno verde, la industria de este combustible podría llegar a ser tan grande económicamente que se compararía con la actual industria minera del país [18].

El Gráfico 2.9 muestra las proyecciones que podría tener, por un lado, las aplicaciones domésticas del uso del hidrógeno verde y, por el otro, las exportaciones.



**Gráfico 2.9** Proyección de mercados chilenos de hidrógeno verde y derivados (BUSD).

Fuente: Ministerio de Energía de Chile [18]

### 2.3 Gas natural

El Gas Natural (GN) es un combustible fósil incoloro e inodoro altamente inflamable. Su composición es principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) [19]. Según su procedencia puede tener distintas proporciones de distintos hidrocarburos como propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), algunos alcanos superiores ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), y también pequeños porcentaje de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), hidrógeno sulfuro ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y, a veces, helio (He) [20]. Sin embargo, el gas natural empleado comercialmente es limpiado de impurezas siendo el metano su componente principal.

El gas natural es usado principalmente para la generación de electricidad, para calefacción de hogares, para cocinar y también como combustible para ciertos vehículos. A diferencia de otros combustibles fósiles como el petróleo o el carbón, el gas natural tiene una combustión mucho más limpia y también emite niveles más bajos de subproductos nocivos hacia la atmósfera [20].

La formación de gas natural se remonta a millones de años atrás. En ese entonces microorganismos de plantas y animales vivían en el océano donde absorbían energía del sol,

la cual se almacenaba en forma de moléculas de carbón en sus cuerpos. Cuando dichos microorganismos murieron, se hundieron en el fondo del océano y durante millones de años se fueron formando capa tras capa de sedimentos de roca sobre ellos. Al pasar el tiempo, esta materia orgánica de microorganismos de plantas y animales fue descomponiéndose y enterrándose cada vez más profundo, lo que aumentó la presión y el calor sobre ellos, produciéndose finalmente combustibles densamente energéticos como el gas natural o el petróleo [20].

Existen dos tipos o formato de ser entregado el gas natural:

- Gas Natural Licuado (GNL): Este formato es producido cuando el gas natural es enfriado hasta convertirse en líquido a aproximadamente  $-162$  [°C] a presión atmosférica. Debido a su estado líquido, el volumen del gas natural es reducido 600 veces en comparación a su estado gaseoso [21]. El GNL se almacena en tanques criogénicos para mantener su baja temperatura y su estado líquido [22]. Una de las ventajas del GNL es que sus propiedades físicas lo hacen idóneo para transporte de largas distancias a través de vehículos pesados como barcos que cruzan los océanos o transporte por camión. No obstante, el costo de construir una planta de GNL sigue siendo alto debido a que se requieren altos consumos de energía, el uso de materiales criogénicos de costo elevado y el cumplimiento de estrictos estándares de diseño y de seguridad [21].
- Gas Natural Comprimido (GNC): Este formato es producido cuando el gas natural es sometido a altas presiones, aproximadamente a 1800 [psig] para el caso del gas natural que incluye proporciones significativas de etano, propano, etc., y a aproximadamente 3600 [psig] para el caso del gas natural que es principalmente metano. Se utiliza GNC, por ejemplo, cuando en un proyecto mar adentro los gasoductos no son viables debido a la distancia, la topografía del lugar o factores ambientales. Una de las ventajas del GNC es que la energía consumida en la operación de una instalación de GNC es alrededor del 40% de una planta de GNL de la misma capacidad [21]. Sin embargo, una de sus desventajas es que tiene una densidad energética menor que el GNL [22].

### 2.3.1 Propiedades gas natural

En la Tabla 2.2 se presentan las propiedades del gas natural utilizado.

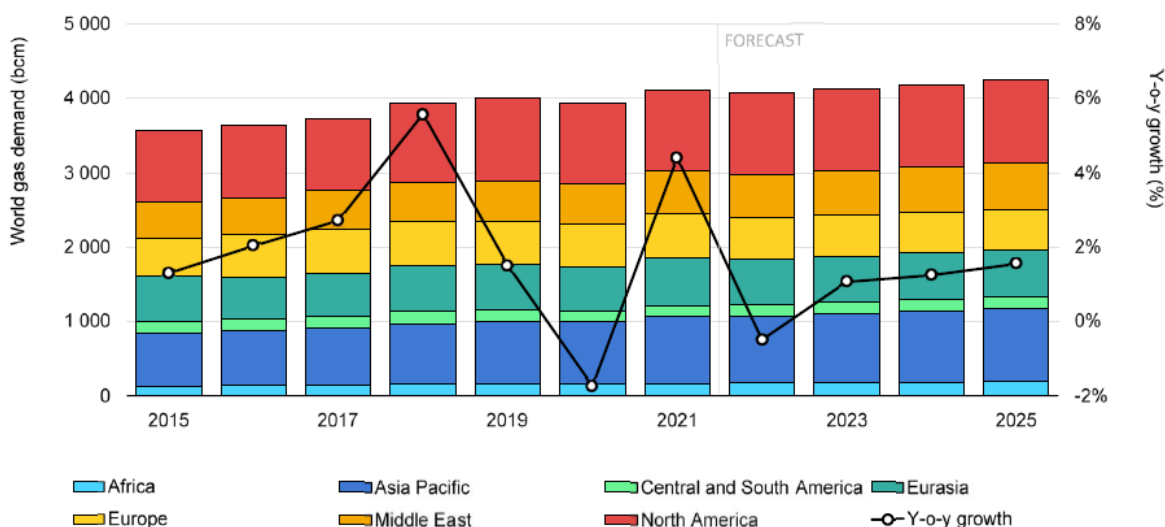
**Tabla 2.2** Propiedades del gas natural utilizado.

Composición en porcentaje de volumen	99,5% Metano (CH <sub>4</sub> )
Densidad gas natural (22°C y 1 atm)	0,662 [kg/m <sup>3</sup> ]
Punto de ebullición (1 atm) [21]	-162 [°C]
Poder calorífico inferior (H <sub>inf</sub> ) [anexo 7]	49.680 [kJ/kg]
Poder calorífico superior (H <sub>sup</sub> ) [anexo 7]	55.180 [kJ/kg]
Velocidad de llama [21]	44,1 [cm/s]
Temperatura de autoignición [21]	540 – 560 [°C]

### 2.3.2 Gas natural en el mundo

La demanda de gas natural en el mundo se aprecia en el Gráfico 2.10. Las dos regiones que han dominado la demanda de gas natural desde el año 2015 son Norteamérica y Asia pacífico. Se pronostica que la demanda o el consumo mundial de gas natural crezca a una tasa promedio anual del 0.8% entre los años 2022 y 2025, llegando a tener un valor aproximado de 4240 [bcm] (billion cubic meters) al final del pronóstico, lo cual significa solo un aumento leve de 140 [bcm] en comparación al año 2021 [23].

A raíz de los precios elevados y suministro limitado que se acumuló en la segunda mitad de 2021, y si también se añade el conflicto de la invasión rusa a Ucrania en febrero de 2022, se produce una caída en el crecimiento de la demanda para el año 2022, tal como lo demuestra el Gráfico 2.10 [23].

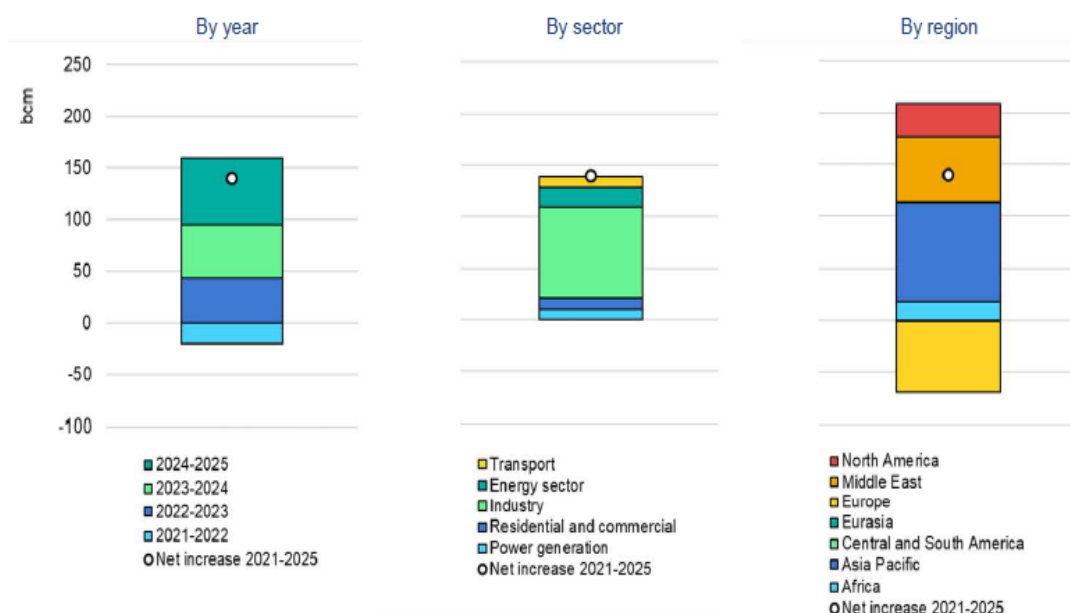


**Gráfico 2.10** Demanda mundial de gas natural por región, 2015-2025.

Fuente: International Energy Agency (IEA) [23]

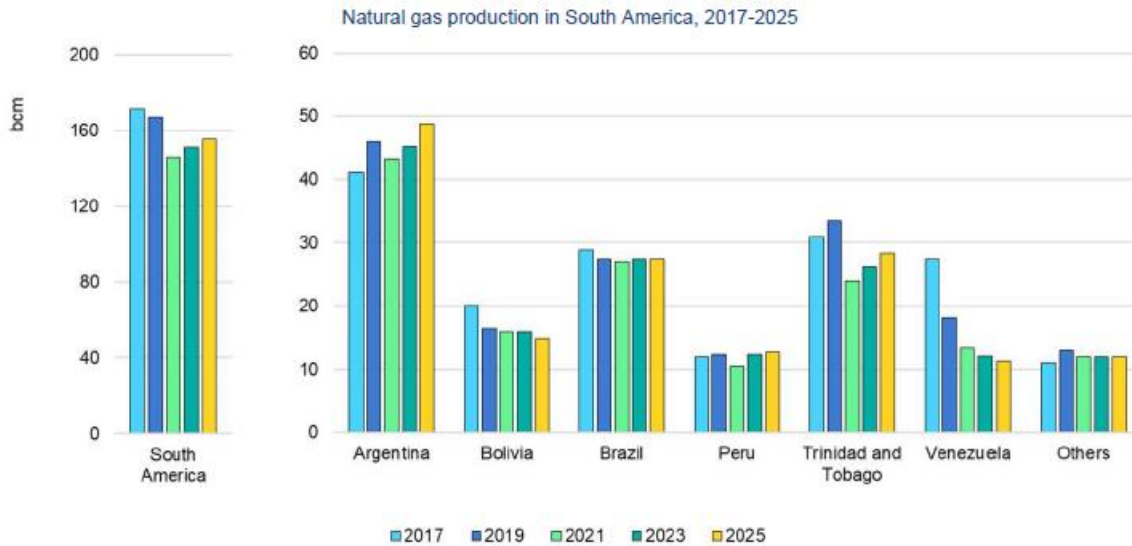
En el Gráfico 2.11 se pronostica que el sector que mayor crecimiento tendrá en la demanda de gas natural desde el año 2021 al 2025 es el sector industrial, el cual representa aproximadamente un 60% del aumento total de la demanda de gas natural durante dicho periodo. Por otra parte, se aprecia que el crecimiento de la demanda global se centra principalmente en dos regiones: la región de Asia Pacífico, la cual representa casi la mitad del crecimiento pronosticado al año 2025, y la región de Oriente Medio, la cual representa un tercio del crecimiento en dicho periodo. Luego continúa las regiones de América del Norte

y África, las cuales brindan contribuciones más modestas. En relación a las regiones de América Central, América del Sur y Eurasia, se pronostica un estancamiento. Por último, para Europa se prevé una disminución significativa en su demanda de gas natural. Cabe mencionar que estos pronósticos están sujetos a la evolución de la guerra, a factores relacionados con las cadenas de suministros de productos básicos y manufactura, e incluso a la situación Covid-19, la cual volvió a incidir en la primera mitad de 2022, cuando regresaron los confinamientos en China [23].



**Gráfico 2.11** Desglose del crecimiento pronosticado en la demanda mundial del gas natural, 2021-2025. Fuente: International Energy Agency (IEA) [23]

El Gráfico 2.12 muestra la producción de gas natural que ha tenido Sudamérica desde el año 2017 hasta un pronóstico en el año 2025. Quienes lideran la producción son tres países: Argentina, Trinidad y Tobago, y Brasil. La producción de gas en América Latina experimentó una caída para los años 2020 y 2021, sin embargo, se prevé que su producción crezca gradualmente a partir del año 2021. Aun así, el nivel de producción en el año 2025 no será lo suficientemente grande como para igualar a la producción del año 2019. El incremento de producción después de la caída se debe a factores como el aumento gradual de la capacidad de gasoductos en Argentina, el aumento de la capacidad de exportación de GNL de Perú, y el progresivo aumento de la producción de Trinidad y Tobago; país el cual no ha podido volver a sus niveles previos [23].



**Gráfico 2.12** Producción de gas natural en Sudamérica, 2017-2025.

Fuente: International Energy Agency (IEA) [23]

### 2.3.3 Gas natural en Chile

Chile no es un país privilegiado en yacimientos de combustibles fósiles, por lo que depende principalmente de la importación de otros países. En cuanto al gas natural, dispone únicamente de una reserva explotable que se localiza en la Región de Magallanes, en donde su uso como combustible se origina en los años 70, cuando la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) se hizo cargo de la distribución del combustible en dicha región. Tiempo después, en 1981, la empresa GASCO Magallanes se hizo cargo de la distribución a Punta Arenas, Puerto Natales y Porvenir. Dada la enorme distancia que separa la Región de Magallanes con la Región Metropolitana, solo en 1997 pudo ser viable la llegada de gas natural a la Región Metropolitana y también a la Región de Valparaíso. Para la llegada de gas a otras regiones del país se firmó un tratado de integración energética con Argentina, lo cual promovió la construcción de cuatro gasoductos. Sin embargo, desde el año 2004 hasta el 2009 hubo restricciones de suministro del gas natural argentino, lo que se conoció como “crisis del gas”. Este problema fomentó a que en Chile se construyeran dos terminales de regasificación de gas natural licuado (GNL), una en la zona central del país, la Terminal Quintero, la cual comenzó a operar en el año 2009, y otra en la zona norte del país, la Terminal Mejillones, la cual comenzó a operar en el año 2010 [24].

A día de hoy, el gas natural es importado principalmente desde Estados Unidos y desde Trinidad y Tobago, el cual llega mediante buques especializados hacia las terminales de Quintero y Mejillones. Además, se importa gas natural desde Argentina por medio de los gasoductos existentes entre ambos países [25].

Las capacidades de regasificación y de almacenamiento de ambas terminales de gas natural se presentan en la Tabla 2.3

**Tabla 2.3** Capacidad de regasificación y de almacenamiento de terminales de gas natural [26].

Terminal Quintero	Regasificación: 15 millones de [m <sup>3</sup> ] por día	Almacenamiento: 334.000 [m <sup>3</sup> ]
Terminal Mejillones	Regasificación: 5.5 millones de [m <sup>3</sup> ] por día	Almacenamiento: 175.000 [m <sup>3</sup> ]

## 2.4 Medios porosos inertes

Siguiendo la línea de un mundo ambientalmente más limpio, surgen diversas alternativas para lograr aquel magno objetivo. Una de ellas es la tecnología de medio porosos inertes (MPI), una moderna tecnología donde la combustión ocurre dentro de los vacíos de una matriz porosa sólida. Los MPI tienen la peculiaridad de ser una tecnología de quemadores cuya combustión es más eficiente térmicamente y, a su vez, más amigable con el medioambiente, puesto que las emisiones de gases contaminantes emitidas son considerablemente menores que las emitidas por quemadores convencionales [27].

En relación a los MPI, existe una profusión de estudios que analizan las ventajas que tienen respecto a otras tecnologías y también presentan una enorme variedad de aplicaciones en los que pueden ser utilizados.

Las ventajas más importantes de los MPI son:

- Transferencia de calor eficiente entre el fluido y la matriz sólida debido a la superficie interna altamente desarrollada del medio poroso [27].

- Velocidades de combustión más altas debido a la buena transferencia de calor [27].
- Menores emisiones contaminantes [28].
- Viabilidad para quemar combustibles de bajo poder calorífico [28].
- Mayor estabilidad de llama y eficiencia de combustión [29].
- El MPI permite operar en mezclas de combustibles muy pobres debido a la intensa transferencia de calor [30].
- Ausencia de llama libre afuera del MPI.

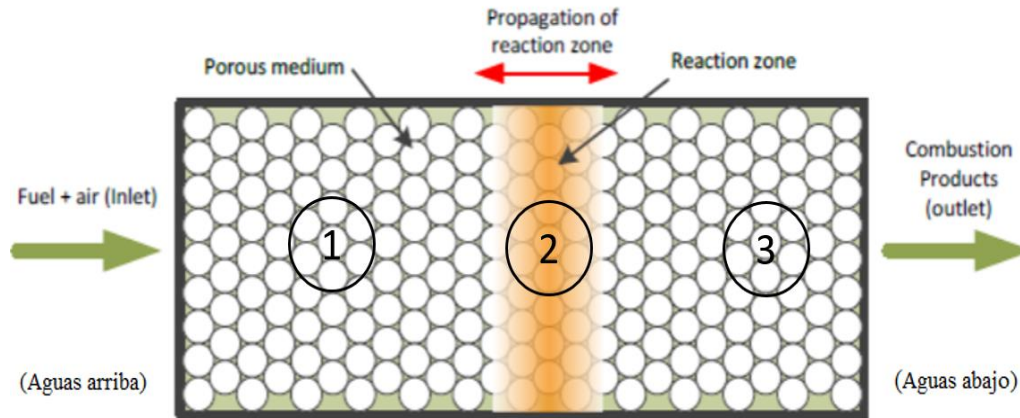
Como se mencionó anteriormente, los MPI se caracterizan por tener una gran versatilidad, por lo que se han ideado usos de MPI en diversas aplicaciones. A continuación, se mostrarán diversas aplicaciones en las que se puede utilizar esta tecnología [27]:

- Turbina
- Motor de combustión interna
- Síntesis de hidrógeno y gas de síntesis
- Intercambiador de calor
- Extracción de petróleo pesado y gas
- Quemadores de cocina
- Celda de combustible
- Generadores termoeléctricos

Cabe destacar que ciertas aplicaciones mencionadas han tenido estudios tanto de investigación numérica como experimental. Además, existe generalidad en que el uso de MPI en las aplicaciones mencionadas contribuye a tener mejores eficiencias térmicas, propiciar mejores mezclas entre aire-combustible y reducir emisiones contaminantes [27].

La combustión de los MPI se clasifica principalmente en dos categorías: combustión estacionaria y combustión transitoria. La combustión estacionaria se usa mayormente en calentadores de superficie y quemadores radiantes. En este tipo de combustión la llama se estabiliza en una región finita en la matriz porosa en función de las condiciones de contorno. Por otro lado, en la combustión transitoria (también conocida como enfoque transitorio), la llama posee la libertad de desplazarse a través del medio poroso tanto en dirección aguas arriba como en dirección aguas abajo [27].

Uno de los fenómenos más interesantes que se produce con la combustión transitoria en los MPI es el “exceso de entalpía”. Para entenderlo correctamente, primero se necesita diferenciar tres zonas distintas en un quemador MPI, como lo muestra la Imagen 2.3.



**Imagen 2.3** Diferentes zonas de combustión en un MPI.

La zona 1 es la zona donde ingresa tanto el combustible como el aire (reactivos) y se mezclan dentro del MPI. Esta zona se encuentra detrás del frente de llama o zona 2 como se aprecia en la Imagen 2.3. Los gases calientes de la zona 2 transfieren calor por convección al medio sólido, y dicho medio sólido al calentarse, transfiere calor por conducción y radiación a la zona 1 aguas arriba [30]. Por lo tanto, al ingresar los reactivos a la zona 1, son precalentados y, luego de ser combustiónados en la zona 2, llegan a temperaturas superadiabáticas en la zona 2. Esto se conoce como exceso de entalpía o recirculación del calor. Se ha demostrado que la recirculación del calor mejora la estabilidad de la llama y amplía los límites de inflamabilidad [31].

### **2.5 Combustión completa y combustión estequiométrica**

Se habla de combustión completa cuando todo el carbón del combustible se transforma en  $\text{CO}_2$ , todo el hidrógeno se transforma en  $\text{H}_2\text{O}$  y todo el azufre (en caso de existir) se transforma en  $\text{SO}_2$ . Por consiguiente, en la combustión completa, todos los componentes combustibles de un combustible se queman totalmente. Caso contrario es la combustión incompleta, en donde los productos de la combustión contienen trazos de combustible o componentes no quemados, como puede ser C,  $\text{H}_2$ , CO y OH.

Una de las razones principales de tener combustión incompleta es la de poseer oxígeno insuficiente. Aunque también puede haber otras razones como cuando el mezclado entre el aire y combustible es insuficiente, y el tiempo de residencia entre el aire y el combustible en la cámara de combustión es muy corto. Además, se requiere también de una energía de activación mínima que permita que se desarrolle químicamente la combustión.

Ahora bien, la cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible lleva el nombre de aire estequiométrico o teórico. Por lo tanto, se habla de combustión estequiométrica o teórica cuando el combustible se quema completamente al usar el aire estequiométrico o teórico. Suele ocurrir que en los procesos de combustión reales se utilice más aire que el valor estequiométrico con la finalidad de aumentar las oportunidades de tener combustión completa [9].

## 2.6 Parámetros de operación

A continuación, se describirán los parámetros más importantes que guardan relación con este trabajo.

- Flujo másico: Este parámetro ( $\dot{m}_f$ ) representa la variación de la masa del combustible con respecto al tiempo en un área específica. Se puede expresar a través del flujo volumétrico de combustible y la densidad de éste, como lo señala la ecuación (1).

$$\dot{m}_f = \dot{V}_f \cdot \rho_f \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

- Volumen de aire estequiométrico normalizado: Este parámetro ( $V_{a,e}^\circ$ ) corresponde al volumen normalizado de aire (estado en el cual la presión de un gas ideal está a 1 [atm] y temperatura de 0 [°C]) que se requiere para quemar 1 [kg] de combustible en un proceso de combustión completa. Para calcular su valor, se requiere saber las fracciones másicas ( $x_i$ ) de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y oxígeno (O) que tiene el combustible. Su fórmula es representada por la ecuación (2).

$$V_{a,e}^\circ = \frac{22,4}{0,21} \left( \frac{x_C}{12,01} + \frac{x_H}{4,032} + \frac{x_S}{32,06} - \frac{x_O}{32} \right) \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (2)$$

- Volumen de aire estequiométrico real: Este parámetro ( $V_{a,e}$ ) representa al volumen estequiométrico de aire que se ajusta con las condiciones reales de operación. Por lo tanto, para obtenerlo, es necesario aplicar un factor de corrección de presión y

temperatura al volumen de aire estequiométrico normalizado, como lo muestra la ecuación (3), donde  $P_0$  y  $T_0$ , corresponden a la presión y temperatura del estado normalizado respectivamente, y  $P$  y  $T$  corresponden a la presión y temperatura de las condiciones reales de operación respectivamente.

$$V_{a,e} = V_{a,e}^{\circ} \frac{P_0 T}{P T_0} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (3)$$

- Potencia: Este parámetro ( $P$ ) representa la cantidad de energía liberada por unidad de tiempo y se puede expresar en función del flujo másico del combustible ( $\dot{m}_f$ ) y su respectivo poder calorífico inferior ( $H_{inf}$ ), como lo muestra la ecuación (4).

$$P = \dot{m}_f \cdot H_{inf} \text{ [kW]} \quad (4)$$

- Relación de aire: Este parámetro ( $\lambda$ ) representa la fracción entre el caudal de aire real utilizado ( $\dot{V}_a$ ) y el caudal de aire estequiométrico ( $\dot{V}_{a,e}$ ), como lo describe la ecuación (5).

$$\lambda = \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_{a,e}} [-] \quad (5)$$

Se considera mezcla rica en combustible y con poco aire cuando  $\lambda < 1$ . Se considera mezcla pobre en combustible y con exceso de aire cuando  $\lambda > 1$ .

- Relación de equivalencia: Este parámetro ( $\phi$ ) corresponde a la proporción entre la relación combustible-aire real y la relación combustible-aire estequiométrica, tal como lo demuestra la ecuación (6).

$$\phi = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{real}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{est}} [-] \quad (6)$$

Sin embargo, la relación de equivalencia también se puede expresar como el recíproco de la relación de aire. Por lo tanto:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} [-] \rightarrow \phi = \frac{\dot{V}_{a,e}}{\dot{V}_a} [-] \quad (7)$$

Se considera mezcla rica en combustible y con poco aire cuando  $\phi > 1$ . Se considera mezcla pobre en combustible y con exceso de aire cuando  $\phi < 1$ .

- Índice de Wobbe: Este parámetro ( $W_o$ ) se utiliza para caracterizar la intercambiabilidad entre distintos combustibles gaseosos en un sistema donde se espera mantener el mismo flujo de energía sin la necesidad de cambiar la configuración del diseño del sistema. Si dos combustibles tienen índices de Wobbe similares, podrán ser intercambiables. Este parámetro depende del poder calorífico superior del combustible ( $H_{sup}$ ) y de su densidad relativa al aire ( $d$ ).

$$W_o = \frac{H_{sup}}{\sqrt{d}} \left[ \frac{MJ}{m^3} \right] \quad (8)$$

- Flujo de calor por radiación: Este parámetro ( $\dot{Q}_{rad}$ ) representa el calor aportado por la radiación. Éste depende de la emisividad del medio ( $\epsilon$ ), la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ), el área de transferencia de calor ( $A$ ), la temperatura superficial del medio ( $T_{sup}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), tal como lo demuestra la ecuación (9).

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \text{ [kW]} \quad (9)$$

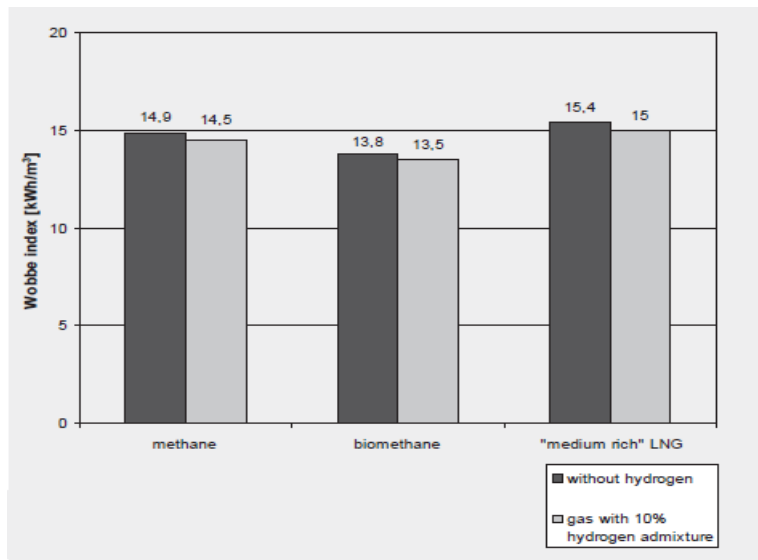
- Flujo de calor por convección: Este parámetro ( $\dot{Q}_{conv}$ ) representa el calor aportado por la convección. Este depende de la masa de los gases productos ( $m_{gp}$ ), el calor específico de los gases productos ( $C_{p_{gp}}$ ), la temperatura de los gases productos ( $T_{gp}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), tal como lo demuestra la ecuación (10).

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_{gp} \cdot C_{p_{gp}} \cdot (T_{gp} - T_{amb}) \text{ [kW]} \quad (10)$$

## 2.7 Mezcla gas natural e hidrógeno

Según un estudio llevado a cabo por Klaus Altfeld y Dave Pinchbeck [32], existen ciertos parámetros que deben ser considerados cuando se mezcla y se produce combustión entre gas natural con hidrógeno. Dichos parámetros son los siguientes:

**Índice de Wobbe:** El índice de Wobbe es uno de los parámetros más importantes a considerar en los aparatos de gas, puesto que se trata de un indicador de la intercambiabilidad de diferentes gases de combustible. Resulta que, independientemente del poder calorífico, los gases con el mismo índice de Wobbe producen la misma carga térmica en un quemador de gas.

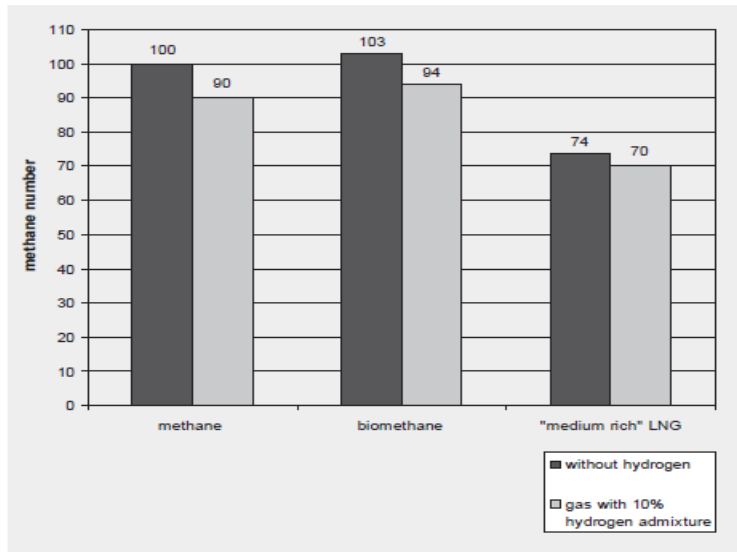


**Gráfico 2.13** Índice de Wobbe de diferentes gases con o sin 10% de hidrógeno.

Fuente: [32]

En el Gráfico 2.13 se muestra que, si se añade 10% de hidrógeno a distintos combustibles, se reduce ligeramente el índice de Wobbe en un 3% aproximadamente.

**Número de Metano:** El número de metano describe el comportamiento de detonación de los gases de combustible en los motores de combustión interna, y depende fuertemente de la composición específica del gas y de la cantidad de hidrocarburos que este tenga.

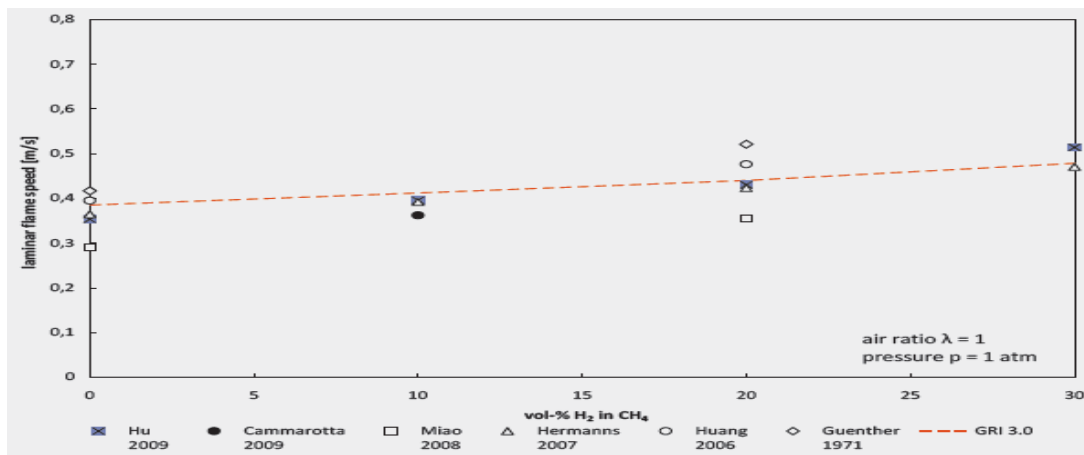


**Gráfico 2.14** Número de metano con o sin 10% de hidrógeno.

Fuente: [32]

En el Gráfico 2.14 se muestra que, si se añade un 10% de hidrógeno a un combustible, disminuye el número de metano.

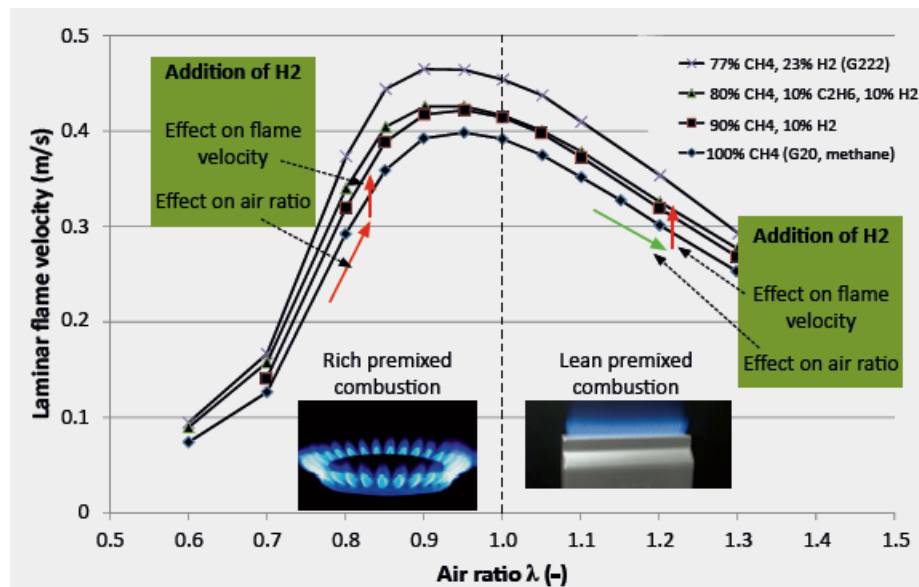
**Velocidad de llama laminar:** Este es un complejo parámetro de combustión que está relacionado con la estabilidad de la llama. También se ha definido como “La tasa de propagación del frente de llama normal en relación con la mezcla sin quemar” [33].



**Gráfico 2.15** Velocidad de llama laminar en función de distintos porcentajes de hidrógeno en mezcla con gas natural. Fuente: [32]

En el Gráfico 2.15 se muestra diversos resultados experimentales de distintos autores y la conclusión es idéntica para todos. En consecuencia, cuanto mayor sea la cantidad de hidrógeno en la mezcla con gas natural, mayor será la velocidad de llama laminar.

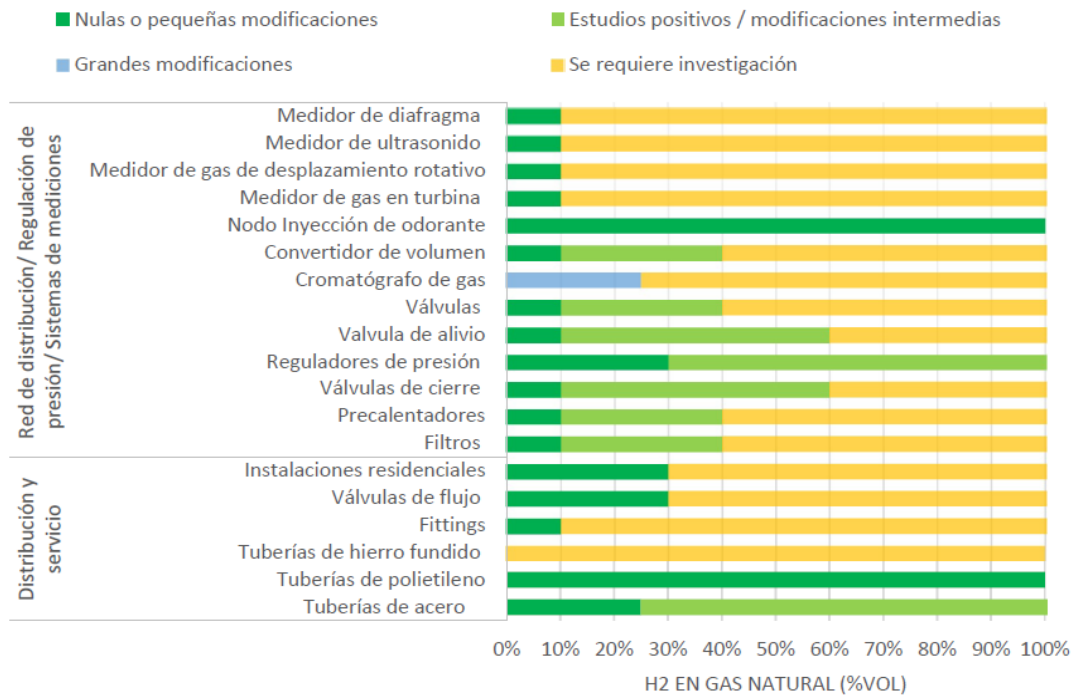
A continuación, se mostrará la relación que existe entre la velocidad de llama laminar y la relación aire-combustible.



**Gráfico 2.16** Velocidad de llama laminar y relación de aire/combustible para diferentes gases. Fuente: [32]

El Gráfico 2.16 muestra que, si la mezcla es rica en combustible, añadir hidrógeno produce un aumento directo de la velocidad de llama laminar, sin embargo, la velocidad de llama laminar aumenta de forma indirecta si la relación aire/combustible también aumenta. Por otro lado, si la mezcla es pobre en combustible o rica en aire, añadir hidrógeno produce un aumento directo de la velocidad de llama laminar, sin embargo, y contrario al caso anterior, la velocidad de llama laminar disminuye de forma indirecta si la relación/aire combustible aumenta.

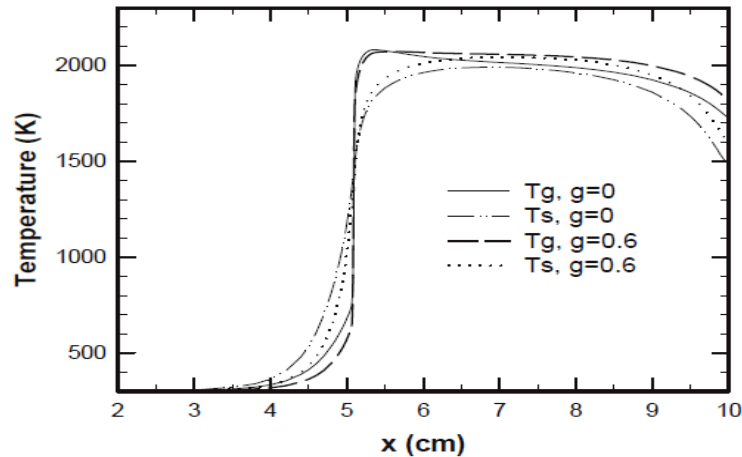
Cabe mencionar que, en la actualidad, la mayoría de los artefactos que operan normalmente con gas natural, no requieren mayores modificaciones o intervenciones cuando el volumen del hidrógeno en la mezcla no supera el 10% [34]. El Gráfico 2.17 ilustra lo mencionado.



**Gráfico 2.17** Funcionalidad de artefactos en relación a distintos porcentajes de hidrógeno en una mezcla con gas natural. Fuente: [34]

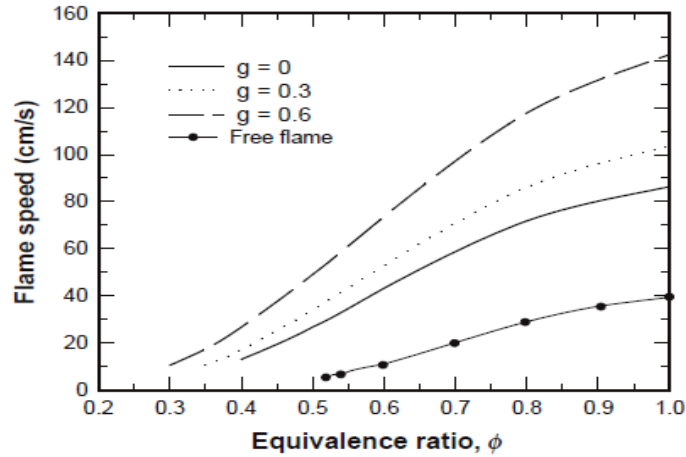
En otro estudio realizado por Chung-jen Tseng [35], se investigó numéricamente los efectos que tendría la adición de hidrógeno en una combustión de metano en un quemador de medios porosos. A continuación, se presentarán algunas de las conclusiones más importantes del estudio:

- El Gráfico 2.18 muestra el perfil de temperatura tanto del gas como el del medio sólido. En la zona de pre-llama (zona  $x=2-5$  [cm]), el sólido posee mayor temperatura que el gas y por lo tanto dicho gas es precalentado previamente a su combustión en la zona de la llama (zona  $x=5$ [cm]), en donde al combustionarse, se llega a temperaturas superadiabáticas. Se puede observar que la temperatura decae un poco en la zona post-llama ( $x=7-10$  [cm]) debido a la pérdida de radiación al ambiente. Cabe destacar que la adición de hidrógeno produce que la temperatura del gas en la zona post-llama permanezca relativamente constante y que sea aproximadamente 100 K más alta que la temperatura del gas cuando se trata de metano puro.



**Gráfico 2.18** Perfil de temperatura para el sólido y el gas en el quemador de medios porosos. Con  $\phi = 0.8$  (\*g: fracción de hidrógeno en el combustible) Fuente: [35]

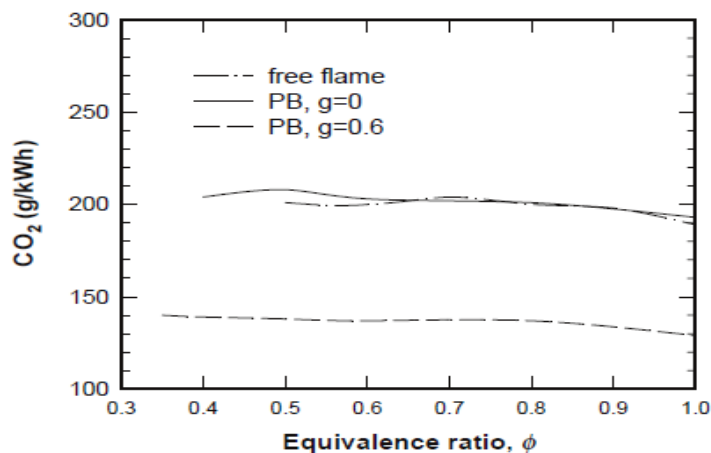
- El Gráfico 2.19 muestra el efecto de la adición de hidrógeno en la velocidad de llama a diferentes relaciones de equivalencia. Se puede apreciar que para un  $\phi = 0.8$ , en un quemador de llama libre se tiene una velocidad de llama de 29 [cm/s], sin embargo, ésta aumenta a 72 [cm/s] para el mismo  $\phi$  cuando se trata de un quemador de medios porosos. Este aumento se debe principalmente al fenómeno de exceso de entalpía o recirculación de calor. Ahora bien, si se adiciona hidrógeno a la combustión de metano en un medio poroso inerte, para el mismo  $\phi$ , la velocidad de llama aumenta a 86 [cm/s] cuando  $g=0.3$ , y llega a ser 118 [cm/s] cuando  $g=0.6$  (Recordar que g: fracción de hidrógeno en el combustible). Este aumento por la adición de hidrógeno se debe a que, en la combustión de los hidrocarburos, existe el paso de reacción relativamente lento de  $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ , el cual obviamente no existe en la combustión de  $\text{H}_2$ . También, este aumento se debe a que el hidrógeno tiene difusividad térmica mucho más alta que los combustibles de hidrocarburos.



**Gráfico 2.19** Efecto de la adición de hidrógeno en la velocidad de llama en función de  $\phi$ .

Fuente: [35]

- El Gráfico 2.20 muestra el efecto de la adición de hidrógeno en las emisiones de  $\text{CO}_2$  en función de la relación de equivalencia. Se observa en el Gráfico 2.20 que las emisiones de  $\text{CO}_2$  decrecen ligeramente a medida que  $\phi$  aumenta. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  tanto para el quemador de llama libre como para el quemador de medios porosos son aproximadamente iguales usando metano puro. Sin embargo, al añadir hidrógeno al 60%, se reducen en aproximadamente un 33% las emisiones de  $\text{CO}_2$  en el quemador de MPI.



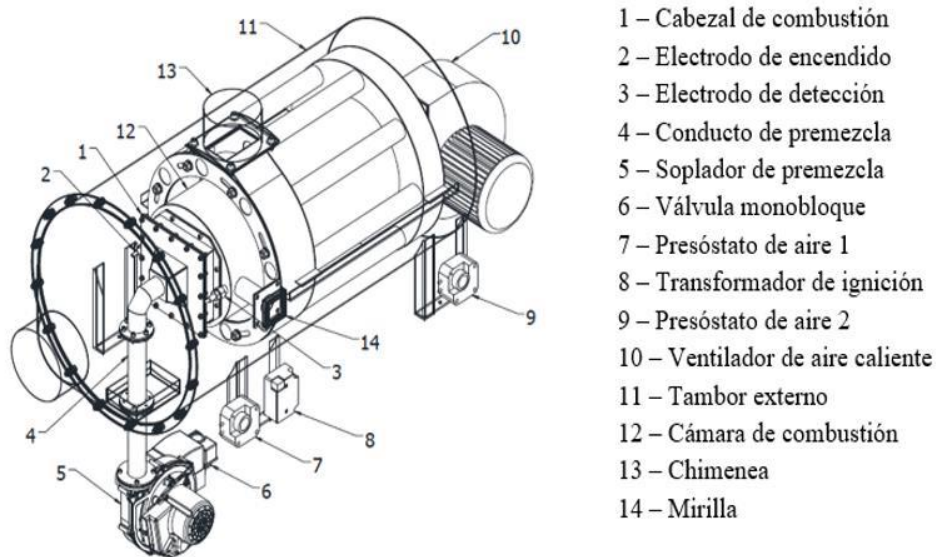
**Gráfico 2.20** Efecto de la adición de hidrógeno en las emisiones de  $\text{CO}_2$  en función de  $\phi$ .

Fuente: [35]

## 2.8 Generador de aire caliente

El generador de aire caliente que se usará en el análisis en el ítem 5 para cumplir el último objetivo específico de este trabajo, es un generador diseñado para deshidratar frutas. Este generador tiene la característica de tener un funcionamiento dual, por lo que puede operar de dos maneras: directa e indirecta. En la forma de funcionamiento directa, los gases de combustión entran en contacto directo con el aire que se desea calentar (aire de secado) y ambos salen expulsados por el mismo ducto. En cambio, en la forma de funcionamiento indirecta, los gases de combustión entran a un intercambiador de calor en donde por fuera se hace circular el aire que se desea calentar (aire de secado); luego este flujo de aire caliente es expulsado por el ducto principal mientras que los gases de combustión son expulsados por una chimenea localizada en la parte superior del equipo.

En la Imagen 2.4 se muestra una fotografía digital del generador de aire caliente en donde están definidas sus partes más importantes y en la Imagen 2.5 se observa una fotografía real del generador de aire caliente.



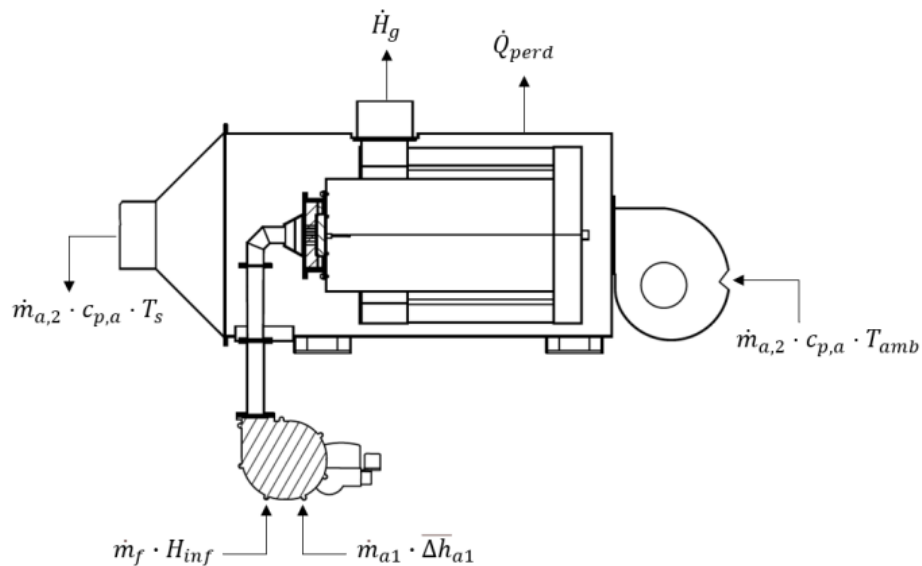
**Imagen 2.4** Diseño digital del GAC con sus partes más importantes. Fuente: [36]



**Imagen 2.5** Fotografía real del diseño del generador de aire caliente.

Este generador de aire caliente también utiliza un quemador de medio poroso inerte el cual está instalado en el interior del equipo en dirección contraria al flujo de aire que se desea calentar.

A continuación, en la Imagen 2.6 se presenta el balance térmico del equipo, a partir del cual se hará un análisis en el Ítem 5.



**Imagen 2.6** Balance térmico del GAC (Modo indirecto). Fuente: [36]

Por lo tanto, la ecuación correspondiente al balance térmico del equipo generador de aire caliente es:

$$\dot{m}_f \cdot H_{inf} + \dot{m}_{a,1} \cdot \Delta \bar{h}_{a,1} + \dot{m}_{a,2} \cdot c_{p,a} \cdot T_{amb} = \dot{H}_g + \dot{Q}_{perd} + \dot{m}_{a,2} \cdot c_{p,a} \cdot T_s \quad (11)$$

El primer término de la izquierda corresponde a la energía que entra con el combustible, en donde  $\dot{m}_f$  corresponde al flujo másico del combustible y  $H_{inf}$  corresponde al poder calorífico inferior de dicho combustible. El segundo término de la izquierda corresponde a la energía que entra con el aire de premezcla, donde  $\dot{m}_{a,1}$  corresponde al flujo másico de aire de premezcla y  $\Delta \bar{h}_{a,1}$  corresponde a la entalpía de dicho aire. El tercer término corresponde a la energía con la que ingresa el aire de secado, en donde  $\dot{m}_{a,2}$  corresponde al flujo másico del aire de secado,  $c_{p,a}$  corresponde al calor específico de dicho aire y  $T_{amb}$  corresponde a la temperatura ambiente. Por el otro lado de la igualdad se tiene  $\dot{H}_g$ , que corresponde a la entalpía de los gases producto de combustión. También se tiene a  $\dot{Q}_{perd}$ , que corresponde al calor desperdiciado y, por último, el tercer término del lado derecho de la igualdad representa a la energía con la que sale el aire de secado, donde  $T_s$  corresponde a la temperatura a la que sale dicho aire.

La ecuación (11) corresponde al balance de energía del GAC en modo indirecto. Para el modo directo es la misma expresión, pero  $\dot{H}_g$  es igual a cero.

La expresión desarrollada de  $\dot{H}_g$  corresponde a:

$$\dot{H}_g = \dot{m}_f \cdot \sum_k n_k \cdot \Delta \bar{h}_k(T) \quad (12)$$

Donde el subíndice  $k$  representa los gases productos de una combustión completa ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  y  $O_2$ ),  $n_k$  corresponde a la cantidad molar específica y  $\Delta \bar{h}_k(T)$  corresponde la entalpía de formación de los gases productos de combustión.

Para calcular la eficiencia del equipo, se tiene la siguiente expresión:

$$n_{th} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{P_q} = \frac{\dot{m}_{a,2} \cdot c_{p,a} \cdot (T_s - T_{amb})}{\dot{m}_f \cdot H_{inf}} \quad (13)$$

Cabe destacar, que la diferencia de temperatura ( $T_s - T_{amb}$ ) se conoce como “salto térmico” y es un indicador que permite caracterizar al equipo independientemente de las condiciones climáticas en la cual se pondrá en marcha.

### 3. Diseño experimental

A continuación, se describirán detalladamente todos los elementos, instrumentos y equipos que fueron necesarios para poder realizar la combustión entre la mezcla de gas natural con hidrógeno en un quemador de medios porosos inertes (MPI).

#### 3.1 Elementos del sistema

##### 3.1.1 Quemador MPI

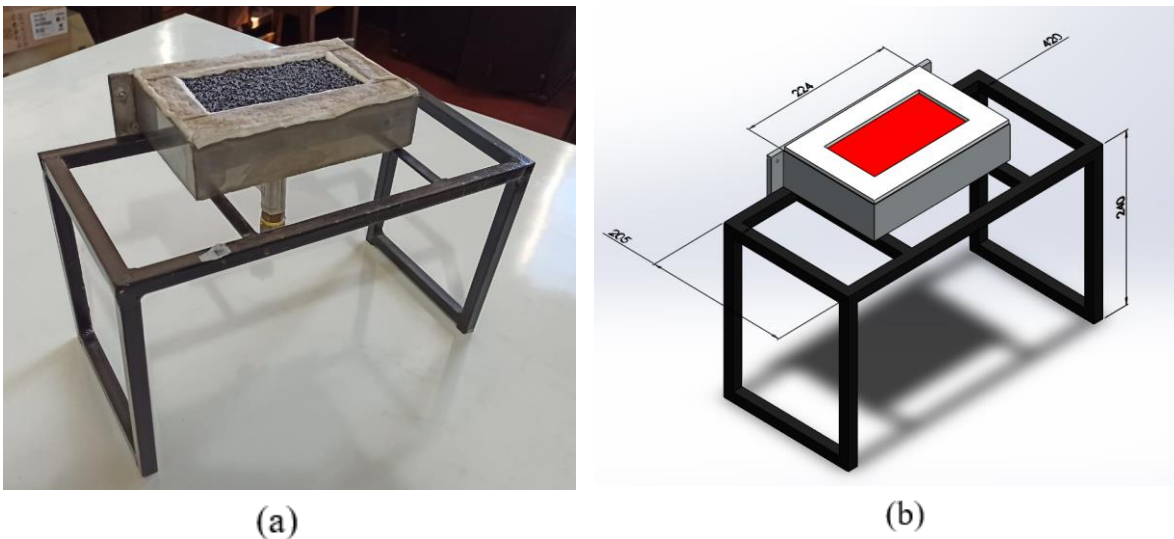
El quemador de medios porosos inertes ha sido diseñado con la intencionalidad de que el análisis que se efectúe utilizándolo sea representativo y que se pueda utilizar en futuras investigaciones. De hecho, en este informe se realizará una comparación con el trabajo desarrollado por Cristóbal Monzó, quien utilizó el mismo quemador, pero en lugar de mezclar gas natural con hidrógeno, mezcló gas licuado de petróleo con hidrógeno.

Las características más importantes del quemador para un análisis termodinámico se definen en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Características y propiedades del quemador MPI

<b>Material</b>	Carburo de silicio siliconado (SiSiC)
<b>Dimensiones</b>	156x83x20 [mm <sup>3</sup> ]
<b>Superficie</b>	0,013 [m <sup>2</sup> ]
<b>Porosidad</b>	20 [ppi]
<b>Potencia Límite</b>	2000 [kW/m <sup>2</sup> ]
<b>Rango de operación</b>	200 – 1000 [kW/m <sup>2</sup> ]
<b>Potencia de operación</b>	2,6 – 13 [kW]
<b>Emisividad para 2000 K</b>	0,9 [-]

En la Imagen 3.7 (a) se puede ver al quemador MPI con los demás elementos que forma parte, y también en la Imagen 3.7 (b) se puede ver la representación en 3D de todo el conjunto. El conjunto cuenta con una estructura de soporte y un cuerpo metálico. En el cuerpo metálico se tiene un difusor para mejorar la homogeneidad de la mezcla, una trampa de llama para evitar el retroceso de la misma, un aislante y el quemador MPI. En la Imagen 3.7 (b) están representadas las dimensiones más importantes del conjunto. El quemador MPI está representado con un color rojizo y el aislante con un color blanco.



**Imagen 3.7** Conjunto quemador MPI. (a) Diseño real (b) Diseño digital con principales medidas.

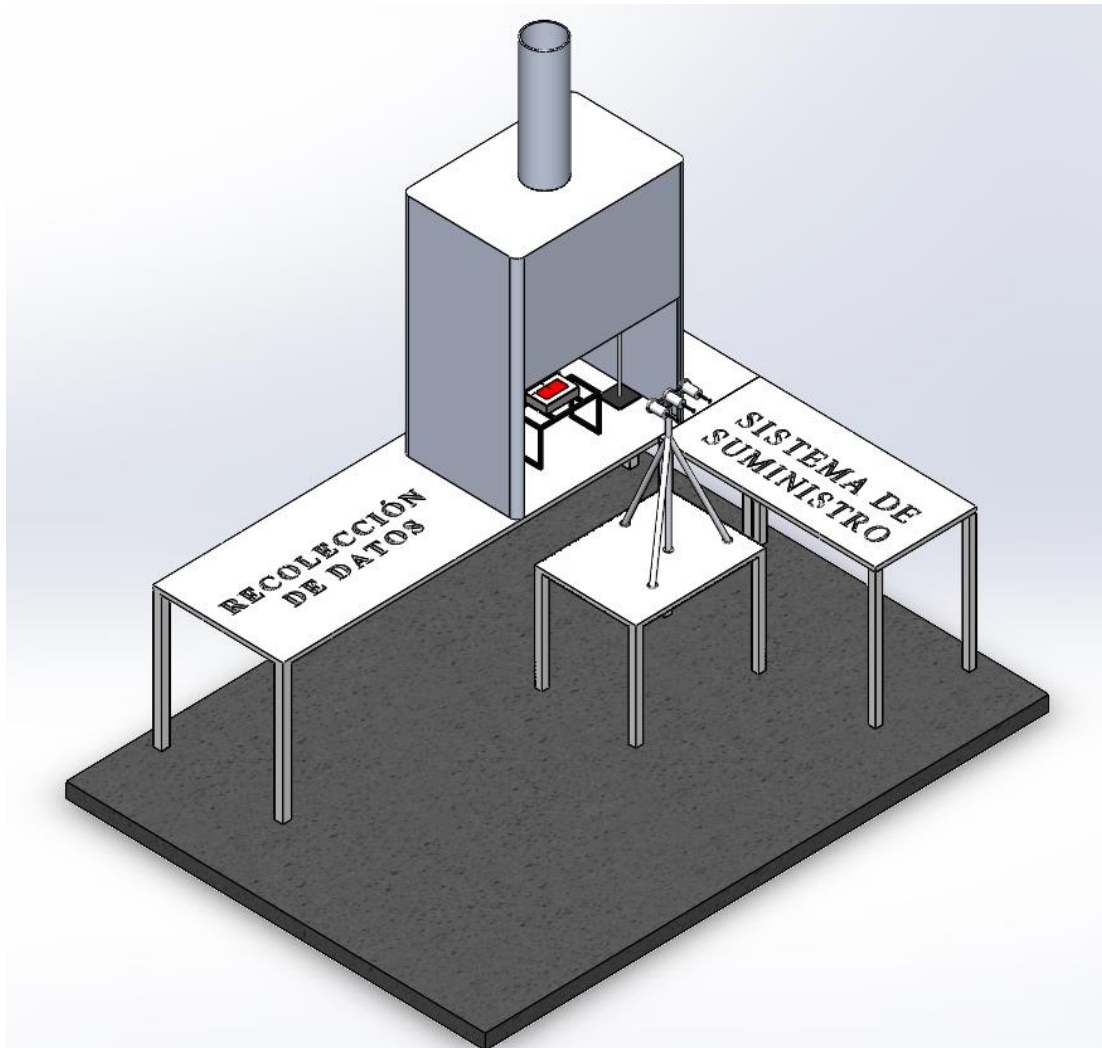
### 3.1.2 Instalación en el laboratorio

En la Imagen 3.8 se tiene una vista isométrica del diseño 3D de la instalación que se realizó en el laboratorio. Se observa en la Imagen 3.8 que la instalación cuenta con una campana de extracción de gases, en cuyo interior se encuentra el conjunto del quemador MPI. Se observa igualmente la disposición de un trípode con un set de 3 pirómetros, los cuales permiten medir la temperatura superficial del quemador MPI. Además, en la instalación del sistema se dispone de una mesa en la que se encuentran los equipos de recolección de datos y en otra parte el sistema de suministro de aire-combustible.

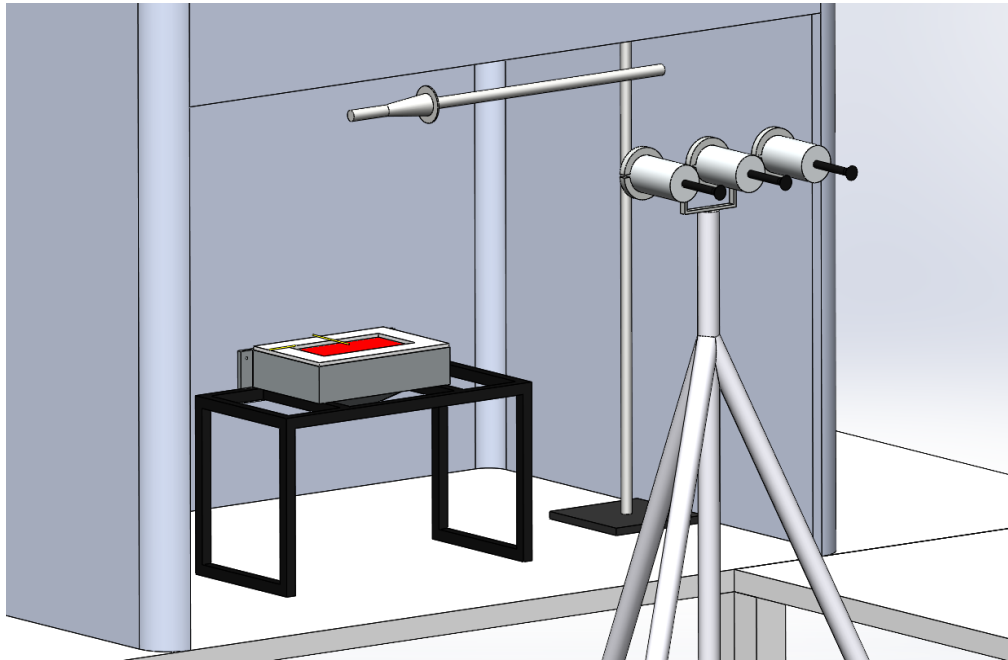
La Imagen 3.9 es un acercamiento hacia la zona interior de la campana, la que permite ver con mayor claridad un sensor de temperatura de un equipo analizador de gases TESTO-350

dispuesto a 300 [mm] del quemador. También se puede observar tenuemente a dos termocuplas instaladas a 5 [mm] del quemador, representadas en color amarillo, las cuales permiten registrar la temperatura del quemador por convección.

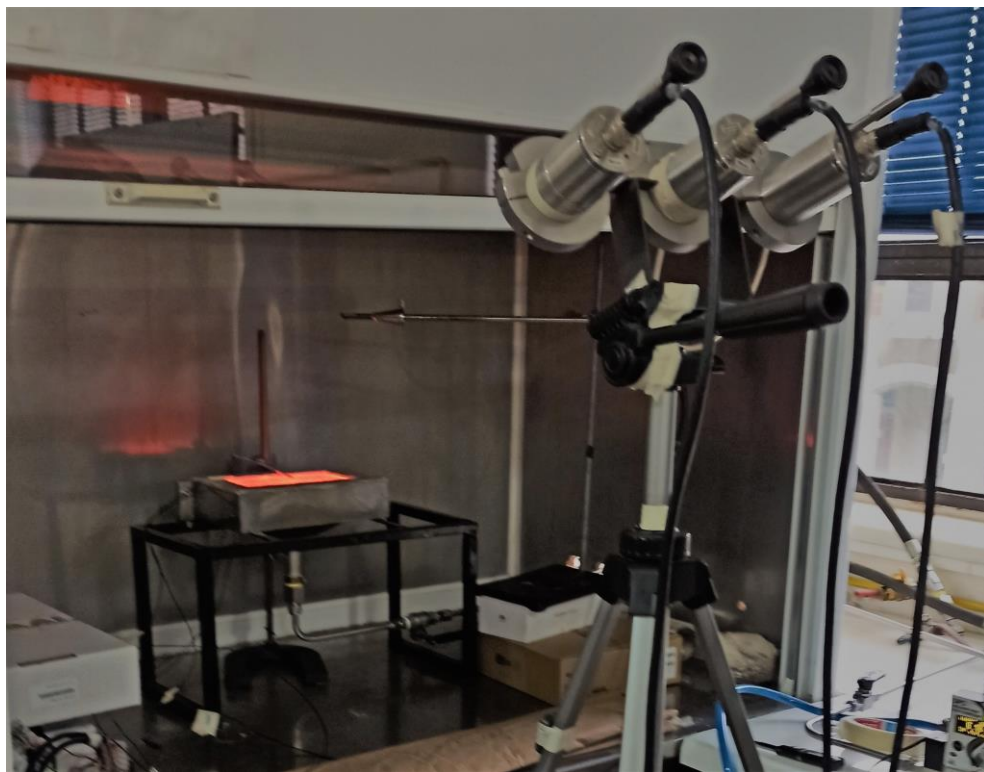
La Imagen 3.10 corresponde a una foto real del mismo acercamiento de la Imagen 3.9.



**Imagen 3.8** Vista isométrica diseño 3D de la instalación del sistema en el laboratorio.

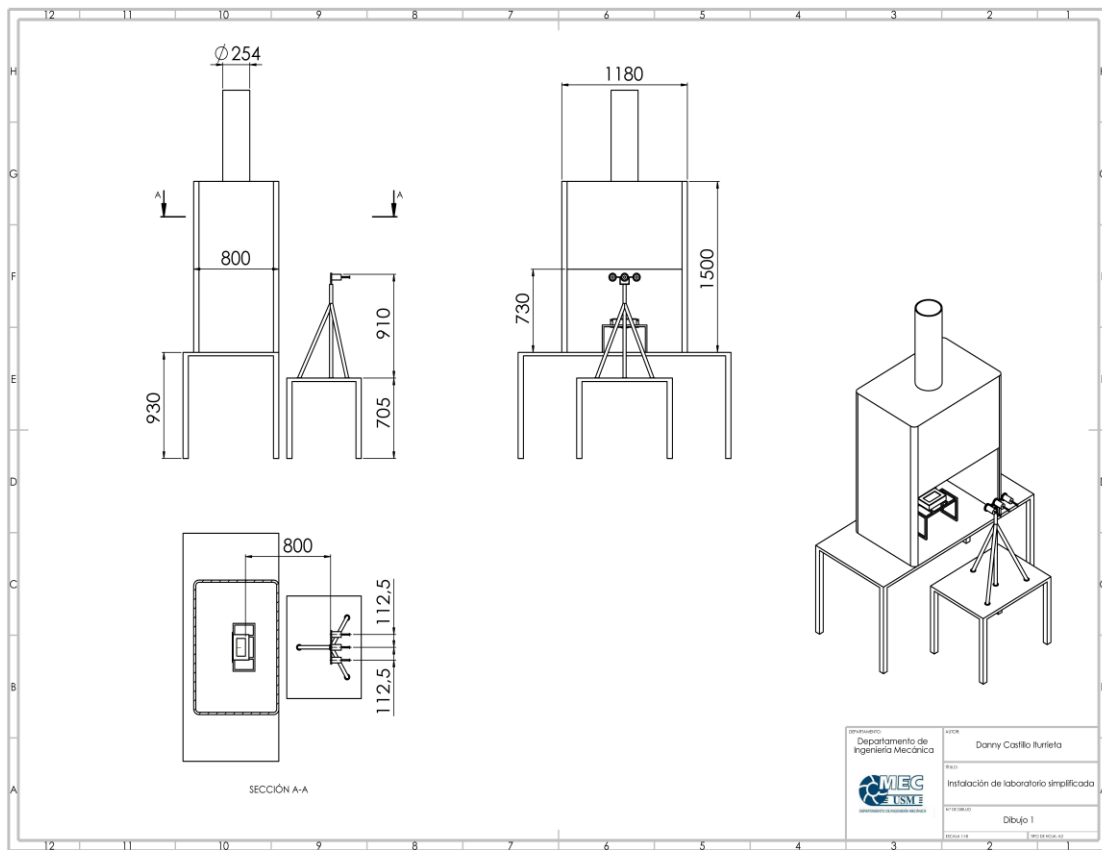


**Imagen 3.9** Diseño 3D del acercamiento al interior de la campana.



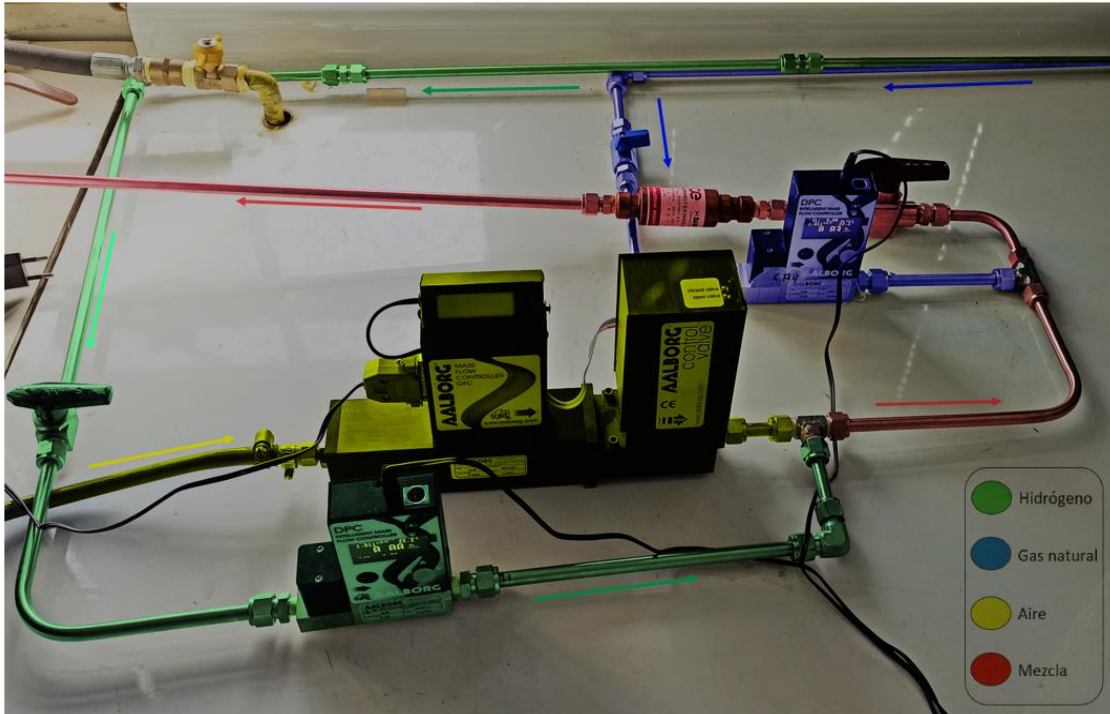
**Imagen 3.10** Foto real del acercamiento al interior de la campana.

Por otra parte, en la Imagen 3.11 se puede observar un dibujo técnico de una versión simplificada del laboratorio, con la finalidad de definir las dimensiones más importantes.



**Imagen 3.11** Dibujo técnico del laboratorio simplificado.

La Imagen 3.12 muestra parte de los elementos correspondientes al sistema de suministro de aire-combustible, en donde se ha diferenciado con colores las distintas líneas; correspondiendo el verde para la línea de hidrógeno, el azul para la línea de gas natural, el amarillo para la línea de aire y el rojo para la línea en mezcla. Además, se tienen flechas que indican la dirección de los distintos flujos.



**Imagen 3.12** Elementos del sistema de suministro de aire-combustible (líneas diferenciadas por colores).

### 3.1.3 Línea de hidrógeno

El suministro de la línea corresponde a un tanque cilíndrico de hidrógeno dispuesto en las afueras del laboratorio cuyas especificaciones aparecen en la Imagen 3.13. Dicho tanque tiene añadido un regulador de presión con las características descritas en la Imagen 3.14. Siguiendo aguas abajo, la línea de hidrógeno cuenta con un segundo regulador de presión, ubicado en una de las paredes del laboratorio, con las especificaciones descritas en la Imagen 3.15. Luego, en la mesa del sistema de suministro de aire-combustible, se encuentra instalado un controlador de flujo con las especificaciones mencionadas en la Imagen 3.16. Cabe mencionar, que la línea es de acero inoxidable de 3/8" de diámetro y contiene distintas válvulas de paso a lo largo de la misma. Es preciso añadir que la presión de la línea es de 1 [bar].

	Marca	Linde
	Capacidad	7 [m <sup>3</sup> ]
	Presión	150 [bar]

**Imagen 3.13** Tanque cilíndrico de almacenamiento de hidrógeno.

	Marca	AGA
	Modelo	3037392-3S-350
	Rango de presión aguas arriba	0 - 250 [bar]
	Rango de presión aguas abajo	0 - 13 [bar]

**Imagen 3.14** Primer regulador de presión de la línea de hidrógeno.

	Marca	Indura
	Modelo	SEMD310006
	Rango de presión	0 - 10,5 [bar]

**Imagen 3.15** Segundo regulador de presión de la línea de hidrógeno.

	<p>Marca</p>	<p>Aalborg</p>
	<p>Modelo</p>	<p>DPC17</p>
	<p>Rango de regulación</p>	<p>0 - 20 [sL/min]</p>

**Imagen 3.16** Controlador de flujo de hidrógeno.

### 3.1.4 Línea de gas natural


Al igual que la línea de hidrógeno, el suministro de la línea de gas natural corresponde a un tanque de almacenamiento cilíndrico, el cual se encuentra al exterior del laboratorio y sus especificaciones aparecen en la Imagen 3.17. Dicho tanque también tiene añadido un regulador de presión con las características descritas en la Imagen 3.18. Y de la misma manera que con el hidrógeno, al seguir la línea aguas abajo, se encuentra ubicado en una de las paredes del laboratorio, un segundo regulador de presión con las especificaciones señaladas en la Imagen 3.19. En la mesa del sistema de suministro de aire-combustible también se encuentra instalado un controlador de flujo cuyas características están descritas en la Imagen 3.20. Del mismo modo, la línea es de acero inoxidable de 3/8" de diámetro y contiene distintas válvulas de paso a lo largo de la misma. Es preciso añadir que la presión de la línea es de 1 [bar].

	Marca	Linde
	Capacidad	10 [m <sup>3</sup> ]
	Presión	165 [bar]


**Imagen 3.17** Tanque cilíndrico de almacenamiento de gas natural.

	Marca	Harris
	Modelo	KH1003
	Rango de presión aguas arriba	0 - 250 [bar]
	Rango de presión aguas abajo	0 - 13 [bar]

**Imagen 3.18** Primer regulador de presión de la línea de gas natural.

	Marca	AGA
	Modelo	W40B
	Rango de presión	0 - 20 [bar]

**Imagen 3.19** Segundo regulador de presión de la línea de gas natural.

	Marca	Aalborg
	Modelo	DPC17
	Rango de regulación	0 - 20 [sL/min]


**Imagen 3.20** Controlador de flujo de gas natural.

### 3.1.5 Línea de aire

La línea de aire es abastecida por un compresor de aire el cual tiene las características señaladas en la Imagen 3.21. La línea cuenta con un filtro de aire cuyas especificaciones son mencionadas en la Imagen 3.22. Por último, en la mesa del sistema de suministro de aire-combustible, se tiene instalado un controlador de flujo con las características descritas en la Imagen 3.23. De la misma manera que las otras líneas, se trata de una línea de acero inoxidable y de 3/8" de diámetro, y en este caso también la presión de la línea es de 1 [bar].

	Marca	Dari
	Modelo	DEC 100/2800-2M
	Potencia	2 [hp]
	Capacidad del tanque	100 [L]
	Presión de salida	10 [bar]
	Rango de trabajo	0 - 100 [L/min]

**Imagen 3.21** Compresor de aire.

	Marca	EMC
	Modelo	HEL4000-035-T
	Rango de presión aguas arriba	0 - 10 [bar]
	Rango de presión aguas abajo	0 - 1 [bar]

**Imagen 3.22** Filtro de aire.

	Marca	Aalborg
	Modelo	GFC57
	Rango de regulación	0 - 200 [L/min]

**Imagen 3.23** Controlador de flujo de aire.

### 3.1.6 Línea de mezcla

Como se puede apreciar en la Imagen 3.12, primeramente, se mezcla el hidrógeno con el aire en un conector tipo T, luego, a dicha mezcla se le añade el gas natural en un conector tipo T igualmente. Siguiendo aguas abajo en la línea, se tiene instalada una válvula de paso con las características mencionadas en la Imagen 3.24 y también se tiene instalada una válvula arrestallama con las especificaciones descritas en la Imagen 3.25.



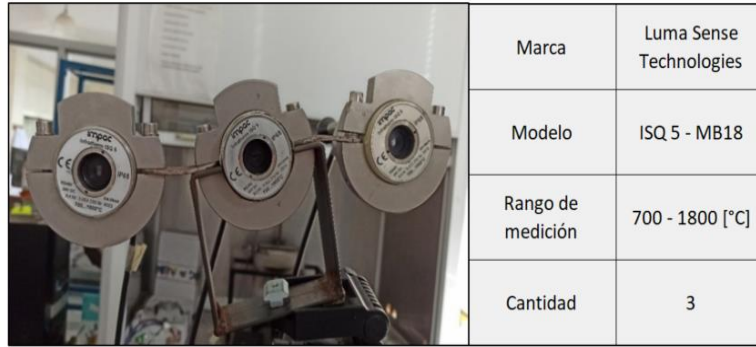
**Imagen 3.24** Válvula de paso tipo bola.



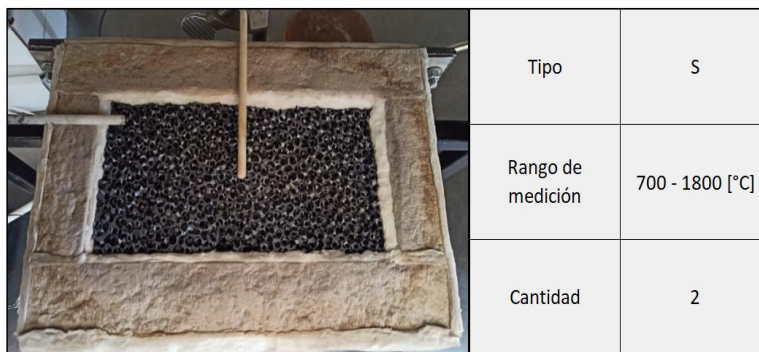
**Imagen 3.25** Válvula arrestallama.

### 3.1.7 Instrumentos y equipos de medición

Para la medición de la temperatura se utilizaron dos instrumentos: pirómetros y termocuplas. Un pirómetro es un instrumento que permite medir la temperatura superficial de un elemento sin la necesidad de estar en contacto con este. Una termocupla o termopar es un transductor formado por la unión de dos metales que, al aplicar temperatura en la unión de estos, genera un pequeño voltaje que después puede ser transformado a lectura de temperatura por otro dispositivo. El set de pirómetros utilizados y sus características aparecen mencionadas en la Imagen 3.26, y las termocuplas utilizadas y sus características aparecen mencionadas en la Imagen 3.27.

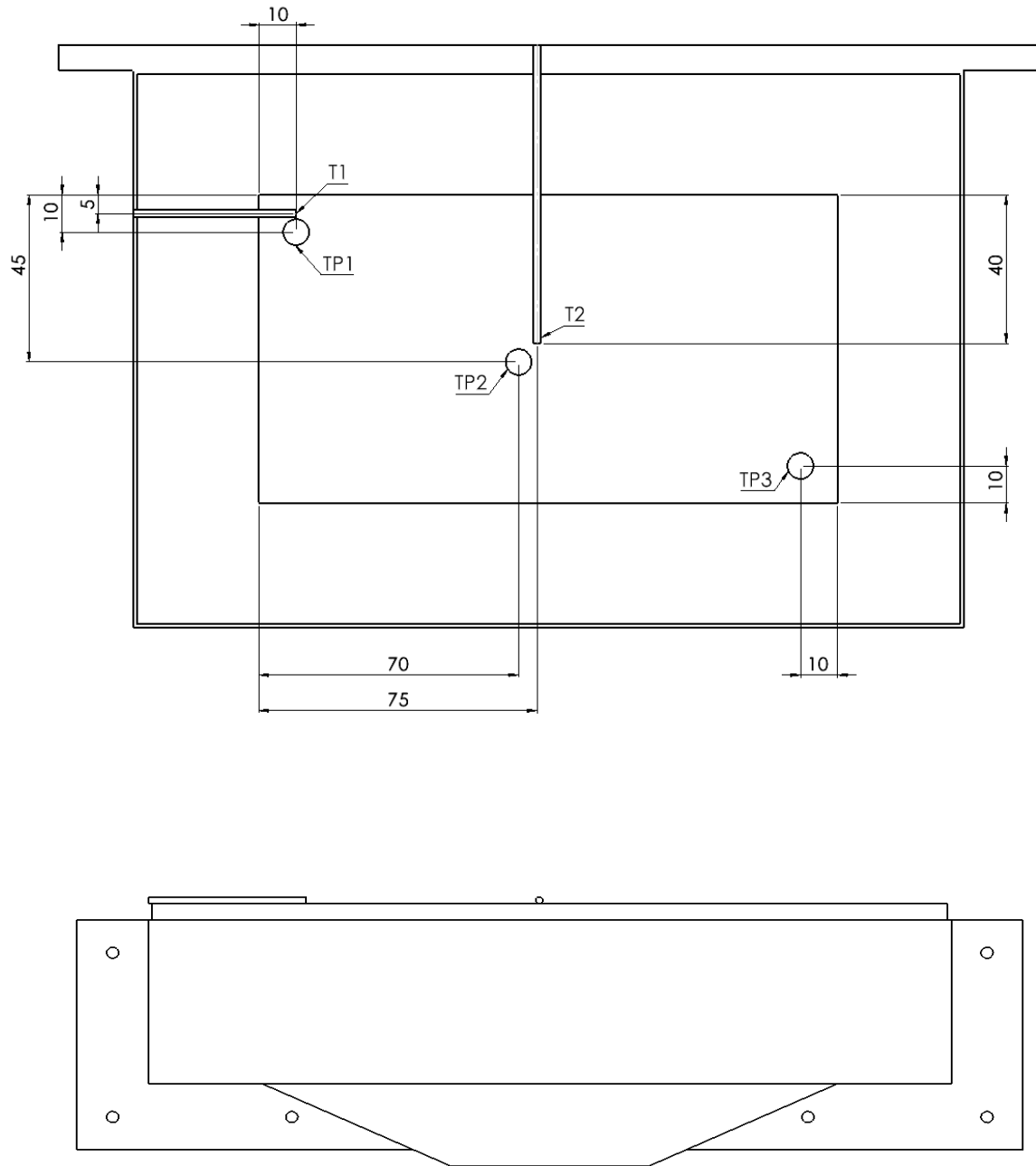


**Imagen 3.26** Set de 3 pirómetros.



**Imagen 3.27** Termocuplas instaladas en el quemador.

La disposición de las termocuplas y los pirómetros en el quemador MPI aparecen señaladas en la Imagen 3.28. Donde la notación TP y T corresponde a temperatura de pirómetros y temperatura de termocuplas respectivamente.



**Imagen 3.28** Disposición de pirómetros y termocuplas.

Para poder obtener un registro de los datos de temperaturas medidos por los instrumentos, se utilizó un módulo de adquisición de datos -o también conocido como data logger- marca OMEGA, cuyas características aparecen en la Imagen 3.29. Dicho dispositivo permite conectar tanto los terminales de los pirómetros como el de las termocuplas, mientras que, a su vez, es conectado a un computador, donde con la ayuda de un software, permite dejar registrada las lecturas de temperatura recopiladas por ambos instrumentos. El software lleva el nombre de Daq View, el cual tiene la característica de recolectar los datos de temperatura con la periodicidad que el usuario desee y, además, genera el registro de temperaturas en un archivo Excel 'csv' (comma separated values).

Es preciso mencionar que, para el caso de las termocuplas, es el data logger con su software, el que convierte una señal de voltaje en temperatura. En cambio, para el caso de los pirómetros, el registro en el software Daw View se mantiene en voltaje, por lo que, para hacer su transformación a temperatura, se requiere de una fórmula matemática.



**Imagen 3.29** Módulo de adquisición de datos o data logger.

Por otra parte, para medir los gases productos, se utilizó un equipo analizador de gases de combustión TESTO-350, cuyo sensor de gases se fijó a 300 [mm] del quemador MPI. Aquel equipo permite medir una gran variedad de gases, sin embargo, los de interés para este trabajo fueron los porcentajes de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> infrarrojo, y las ppm (partículas por millón) de CO, HC y H<sub>2</sub>. De la misma manera que el data logger, este equipo utiliza un software que permite tabular la toma de datos en una planilla Excel. En la Imagen 3.30 se muestra una foto del equipo y sus características.



**Imagen 3.30** Equipo analizador de gases TESTO-350.

Es preciso añadir que, el computador, el módulo de adquisición de datos y el equipo analizador de gases se encuentran instalados en la mesa de “recolección de datos” de la Imagen 3.8.

### 3.2 Cálculo de flujos

En este apartado se explicará el método utilizado para obtener el flujo volumétrico de combustible tanto de hidrógeno como de gas natural, así como también el flujo volumétrico de aire necesario para la combustión.

Primeramente, se define una potencia, es decir, la cantidad de calor que liberará el quemador MPI por unidad de tiempo. El rango de potencia de operación del quemador, como se señaló en la Tabla 3.4, es de 2,6 - 13 [kW], por lo que se selecciona una potencia de trabajo de 3 [kW], puesto que con dicha potencia el compresor de aire se mantiene dentro de su rango de trabajo.

Tal como lo demuestra la ecuación (4), la potencia depende del flujo másico del combustible y de su poder calorífico inferior. En este caso se trata de la mezcla de dos combustibles, por lo tanto, la expresión de la potencia queda definida por la ecuación (14).

$$P [kW] = \sum_{H_2 \text{ y } GN} \dot{m}_f \left[ \frac{kg}{s} \right] \cdot H_{inf} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (14)$$

La ecuación (14) expresa que la potencia de operación del quemador es aportada tanto por el hidrógeno como por el gas natural. Para mayor entendimiento, si se elige una potencia de

trabajo de 10 [kW], y se considera que el valor de porcentaje de hidrógeno en potencia es un 20% y, por ende, el valor de porcentaje de gas natural en potencia es un 80%, eso quiere decir que el hidrógeno aporta con 2 [kW] de potencia y el gas natural aporta con los restantes 8 [kW] de potencia.

Ahora bien, la ecuación (14) puede expresarse utilizando lo establecido por la ecuación (1), en donde el flujo másico de combustible se expresa en función del flujo volumétrico de combustible y la densidad de éste. Por consiguiente, la ecuación (14) queda definida por la ecuación (15).

$$P [kW] = \sum_{H_2 \text{ y } GN} \dot{V}_f \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot \rho_f \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot H_{inf} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (15)$$

Dado que los controladores de flujo utilizados en este trabajo operan con unidades de [L/min], es conveniente hacer el cambio de unidades respectivo. Por lo tanto, la ecuación (15) queda expresada de la siguiente manera:

$$P [kW] = \sum_{H_2 \text{ y } GN} \frac{\dot{V}_f \left[ \frac{L}{min} \right] \cdot \rho_f \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot H_{inf} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]}{60000 [-]} \quad (16)$$

Se utilizará la notación  $X_{H_2}$  y  $Y_{GN}$  para referirse al porcentaje de hidrógeno en potencia y al porcentaje de gas natural en potencia respectivamente. Es importante mencionar que la suma de ambos factores siempre debe ser igual a 1. Por ejemplo, para el caso del hidrógeno, la expresión de la potencia quedaría:

$$X_{H_2} \cdot P [kW] = \frac{\dot{V}_{H_2} \left[ \frac{L}{min} \right] \cdot \rho_{H_2} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot H_{inf_{H_2}} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]}{60000 [-]} \quad (17)$$

Y despejando para poder obtener la expresión para el flujo volumétrico de hidrógeno en la mezcla, se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{H_2} \left[ \frac{L}{min} \right] = \frac{X_{H_2} \cdot P[kW] \cdot 60000[-]}{H_{inf_{H_2}} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \cdot \rho_{H_2} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad (18)$$

Se debe realizar el mismo despeje para poder obtener la expresión del flujo volumétrico de gas natural en la mezcla.

Al realizar los cálculos de los flujos volumétricos tanto para el hidrógeno como para el gas natural, usando sus respectivas densidades y poderes caloríficos inferiores, usando una potencia de 3 [kW] y variando el porcentaje de hidrógeno en potencia de 0% a 15%, se obtiene la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Flujo volumétrico de H<sub>2</sub> y GN para una potencia de 3 [kW]

Función potencia		$\dot{V}_{H_2}$ [L/min]	$\dot{V}_{GN}$ [L/min]	$\dot{V}_{comb}$ [L/min]
X_H2	Y_GN			
0%	100%	0,00	5,47	5,47
1%	99%	0,18	5,42	5,60
2%	98%	0,36	5,36	5,72
3%	97%	0,54	5,31	5,85
4%	96%	0,72	5,25	5,97
5%	95%	0,90	5,20	6,10
6%	94%	1,08	5,14	6,22
7%	93%	1,26	5,09	6,35
8%	92%	1,44	5,03	6,47
9%	91%	1,62	4,98	6,60
10%	90%	1,80	4,92	6,73
11%	89%	1,98	4,87	6,85
12%	88%	2,16	4,81	6,98
13%	87%	2,34	4,76	7,10
14%	86%	2,52	4,70	7,23
15%	85%	2,70	4,65	7,35

Se puede apreciar en la Tabla 3.5 que el valor  $\dot{V}_{comb}$  representa al flujo volumétrico total, es decir, la suma del flujo volumétrico de hidrógeno y del flujo volumétrico de gas natural.

Luego, lo que se requiere saber es cuál es el porcentaje de hidrógeno en volumen que se está añadiendo a la mezcla para los distintos valores de porcentaje de hidrógeno en potencia, con

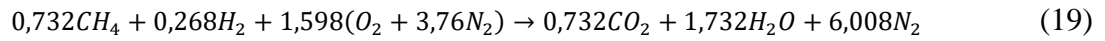
la finalidad de realizar una comparación entre el reemplazo en volumen por parte del hidrógeno con el reemplazo en energía por parte del hidrógeno.

Para obtener el porcentaje de hidrógeno en volumen se divide  $\dot{V}_{H2}$  entre  $\dot{V}_{comb}$ , y para obtener el porcentaje de gas natural en volumen se divide  $\dot{V}_{GN}$  entre  $\dot{V}_{comb}$ . Es posible ver en la Tabla 3.6 que los valores de función potencia y función volumen no coinciden, sin embargo, si uno aumenta el otro también lo hace.

**Tabla 3.6** Flujos volumétricos de H<sub>2</sub> y GN, y representación en porcentajes en función potencia y en función volumen para una potencia de operación de 3 [kW].

Función volumen		Función potencia		$\dot{V}_{H2}$ [L/min]	$\dot{V}_{GN}$ [L/min]	$\dot{V}_{comb}$ [L/min]
%H <sub>2</sub>	%GN	X <sub>H2</sub>	Y <sub>GN</sub>			
0,0%	100,0%	0%	100%	0,00	5,47	5,47
3,2%	96,8%	1%	99%	0,18	5,42	5,60
6,3%	93,7%	2%	98%	0,36	5,36	5,72
9,2%	90,8%	3%	97%	0,54	5,31	5,85
12,1%	87,9%	4%	96%	0,72	5,25	5,97
14,8%	85,2%	5%	95%	0,90	5,20	6,10
17,4%	82,6%	6%	94%	1,08	5,14	6,22
19,9%	80,1%	7%	93%	1,26	5,09	6,35
22,3%	77,7%	8%	92%	1,44	5,03	6,47
24,6%	75,4%	9%	91%	1,62	4,98	6,60
26,8%	73,2%	10%	90%	1,80	4,92	6,73
28,9%	71,1%	11%	89%	1,98	4,87	6,85
31,0%	69,0%	12%	88%	2,16	4,81	6,98
33,0%	67,0%	13%	87%	2,34	4,76	7,10
34,9%	65,1%	14%	86%	2,52	4,70	7,23
36,8%	63,2%	15%	85%	2,70	4,65	7,35

A continuación, para facilitar la explicación, se planteará la ecuación química balanceada para la combustión estequiométrica y completa de 1 [kmol] de combustible considerando un ejemplo de composición de 10% de hidrógeno y 90% de gas natural en función potencia. Dicha composición en potencia, según la Tabla 3.6, representa una composición de 26,8% de hidrógeno y 73,2% de gas natural en volumen. También se puede ver en la Tabla 3.6, que la composición seleccionada tiene un flujo volumétrico de hidrógeno y de gas natural de 1,8 [L/min] y 4,92 [L/min] respectivamente. Por lo tanto, si se tiene 1 [kmol] combustible, significa tener 0,268 [kmol] de hidrógeno y 0,732 [kmol] de gas natural para la composición seleccionada.



Con esta ecuación química y, sabiendo las masas atómicas del carbono y del hidrógeno, es posible obtener la cantidad de masa en [kg] del carbono y del hidrógeno, y la masa total; correspondiendo a la suma de ambas, que hay en un 1[kmol] de combustible. En este ejemplo de composiciones en particular, los valores son:

$$m_C = 8,79 [kg] \quad m_H = 3,49 [kg] \quad m_{total} = 12,28 [kg]$$

Para poder calcular el volumen de aire estequiométrico normalizado de la ecuación (2) se requiere saber únicamente las fracciones máscas de carbono e hidrógeno, es decir  $x_C$  y  $x_H$  respectivamente, puesto que la mezcla entre gas natural e hidrógeno no contiene azufre ni oxígeno. Por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$V^{\circ}_{a,e} = \frac{22,4}{0,21} \left( \frac{x_C}{12,01} + \frac{x_H}{4,032} \right) \left[ \frac{Nm^3}{kg} \right] \quad (20)$$

Reemplazando los valores para la composición de ejemplo seleccionada, se tiene el siguiente valor para el volumen de aire estequiométrico normalizado:

$$V^{\circ}_{a,e} = 13,88 \left[ \frac{Nm^3}{kg} \right]$$

Ahora bien, para poder obtener el valor del volumen de aire estequiométrico real, se debe aplicar el factor de corrección por presión y temperatura de la ecuación (3) al valor del volumen de aire estequiométrico normalizado calculado anteriormente. En este trabajo se operó con presión a 1 [bar], lo que equivale a 0,987 [atm], y con temperatura de 22 [°C], lo que equivale a 295,15 K. Efectuando los cálculos se tiene que el volumen de aire estequiométrico real es:

$$V_{a,e} = 15,19 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Se debe repetir el mismo procedimiento para obtener el volumen de aire estequiométrico real para las distintas composiciones en potencia de hidrogeno. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Volumen de aire estequiométrico real para las distintas composiciones.

Función volumen		Función potencia		V <sub>a,e</sub> [m3/kg]
%H2	%GN	X_H2	Y_GN	
0,0%	100,0%	0%	100%	14,56
3,2%	96,8%	1%	99%	14,62
6,3%	93,7%	2%	98%	14,68
9,2%	90,8%	3%	97%	14,74
12,1%	87,9%	4%	96%	14,80
14,8%	85,2%	5%	95%	14,87
17,4%	82,6%	6%	94%	14,93
19,9%	80,1%	7%	93%	14,99
22,3%	77,7%	8%	92%	15,06
24,6%	75,4%	9%	91%	15,13
26,8%	73,2%	10%	90%	15,19
28,9%	71,1%	11%	89%	15,26
31,0%	69,0%	12%	88%	15,33
33,0%	67,0%	13%	87%	15,40
34,9%	65,1%	14%	86%	15,47
36,8%	63,2%	15%	85%	15,54

Ahora bien, para poder determinar el flujo volumétrico (caudal) de aire estequiométrico real, se requiere saber el flujo másico total de combustible (el cual equivale a la suma del flujo másico de hidrógeno más el flujo másico de gas natural) y el volumen de aire estequiométrico real previamente calculado. Para poder determinar el flujo másico de hidrógeno y de gas natural, se requiere transformar los flujos volumétricos de la Tabla 3.6 usando las densidades respectivas de cada combustible.

En el caso del ejemplo de 10% de hidrógeno en potencia, se tienen los siguientes valores:

$$\dot{m}_{comb} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{GN} = 0,00015 \left[ \frac{kg}{min} \right] + 0,00326 \left[ \frac{kg}{min} \right] = 0,00341 \left[ \frac{kg}{min} \right]$$

$$\dot{V}_{a,e} = V_{a,e} \cdot \dot{m}_{comb} = 15,19 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \cdot 0,00341 \left[ \frac{kg}{min} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right] = 51,82 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

Repetiendo el mismo procedimiento para las demás composiciones, se tiene la Tabla 3.8

**Tabla 3.8** Flujo volumétrico de aire estequiométrico real para las distintas composiciones de hidrógeno de 0% a 15% en potencia.

Función volumen		Función potencia		ṁ <sub>H2</sub> [kg/min]	ṁ <sub>GN</sub> [kg/min]	ṁ <sub>comb</sub> [kg/min]	V̇ <sub>a,e</sub> [L/min]
%H2	%GN	X <sub>H2</sub>	Y <sub>GN</sub>				
0,0%	100,0%	0%	100%	0,000,E+00	3,623,E-03	3,623,E-03	52,75
3,2%	96,8%	1%	99%	1,500,E-05	3,587,E-03	3,602,E-03	52,66
6,3%	93,7%	2%	98%	3,000,E-05	3,551,E-03	3,581,E-03	52,56
9,2%	90,8%	3%	97%	4,500,E-05	3,514,E-03	3,559,E-03	52,47
12,1%	87,9%	4%	96%	6,000,E-05	3,478,E-03	3,538,E-03	52,38
14,8%	85,2%	5%	95%	7,500,E-05	3,442,E-03	3,517,E-03	52,29
17,4%	82,6%	6%	94%	9,000,E-05	3,406,E-03	3,496,E-03	52,19
19,9%	80,1%	7%	93%	1,050,E-04	3,370,E-03	3,475,E-03	52,10
22,3%	77,7%	8%	92%	1,200,E-04	3,333,E-03	3,453,E-03	52,01
24,6%	75,4%	9%	91%	1,350,E-04	3,297,E-03	3,432,E-03	51,91
26,8%	73,2%	10%	90%	1,500,E-04	3,261,E-03	3,411,E-03	51,82
28,9%	71,1%	11%	89%	1,650,E-04	3,225,E-03	3,390,E-03	51,73
31,0%	69,0%	12%	88%	1,800,E-04	3,188,E-03	3,368,E-03	51,63
33,0%	67,0%	13%	87%	1,950,E-04	3,152,E-03	3,347,E-03	51,54
34,9%	65,1%	14%	86%	2,100,E-04	3,116,E-03	3,326,E-03	51,45
36,8%	63,2%	15%	85%	2,250,E-04	3,080,E-03	3,305,E-03	51,36

Por último, se debe decidir la relación de equivalencia fija a utilizar y despejar el flujo volumétrico de aire a utilizar de la ecuación (7).

En los experimentos realizados se trabajó con una relación de equivalencia fija de 0,65 [-], por consiguiente, el flujo de aire a utilizar sería el siguiente:

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{V}_{a,e}}{\phi} = \frac{51,82 \left[ \frac{L}{min} \right]}{0,65} = 79,72 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

En consecuencia, con la información expuesta y el procedimiento señalado, se puede obtener los tres flujos volumétricos deseados, es decir, el flujo volumétrico de hidrógeno, el de gas natural y el de aire para las distintas composiciones de hidrógeno en la mezcla.

En resumen, para el ejemplo de la composición de 10% de hidrógeno en potencia, los tres flujos a ingresar en los controladores de flujos respectivos serían:

$$\text{Flujo volumétrico de hidrógeno} \rightarrow \dot{V}_{H_2} = 1,8 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

$$\text{Flujo volumétrico de gas natural} \rightarrow \dot{V}_{GN} = 4,92 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

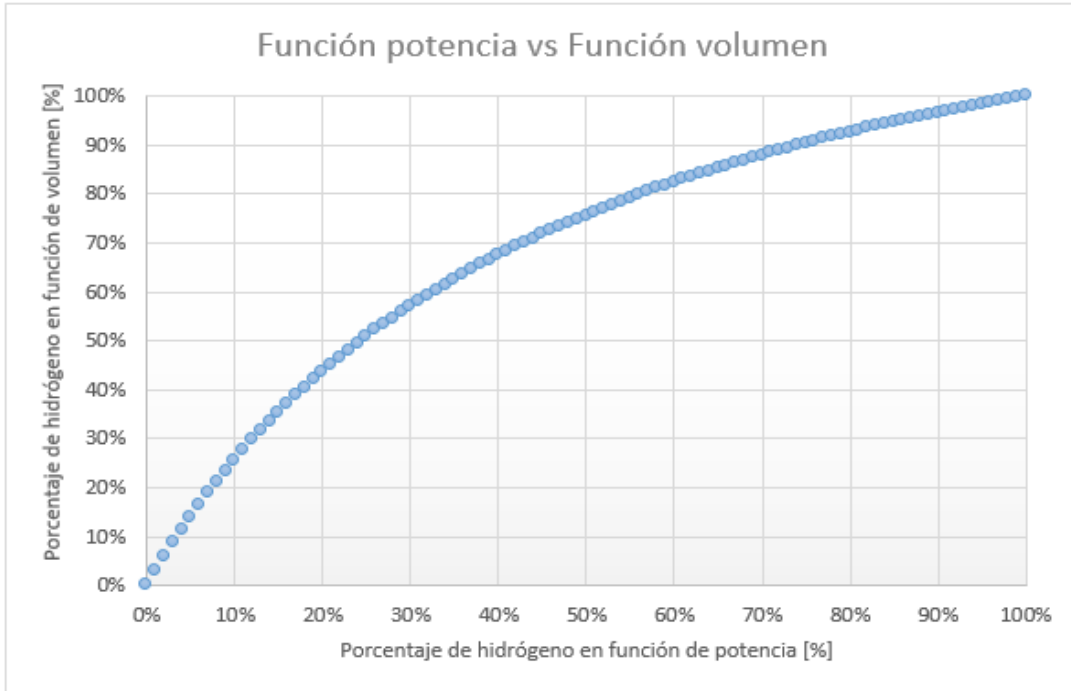
$$\text{Flujo volumétrico de aire} \rightarrow \dot{V}_a = 79,72 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

La Tabla 3.9 tiene la finalidad de hacer una comparativa entre el reemplazo en volumen por parte del hidrógeno con el reemplazo en energía por parte del hidrógeno. Y también hacer una comparativa entre el aumento de hidrogeno en función potencia y el aumento del flujo total de combustible. Por lo tanto, se exponen los valores del flujo volumétrico de hidrógeno, de gas natural y del total, para los distintos porcentajes en función potencia de hidrógeno de 0% a 100% (en tramos de 10%), con el correspondiente valor de porcentaje en función volumen.

**Tabla 3.9** Comparativa entre el reemplazo en volumen con el reemplazo en energía por parte del hidrógeno y con flujos volumétricos.

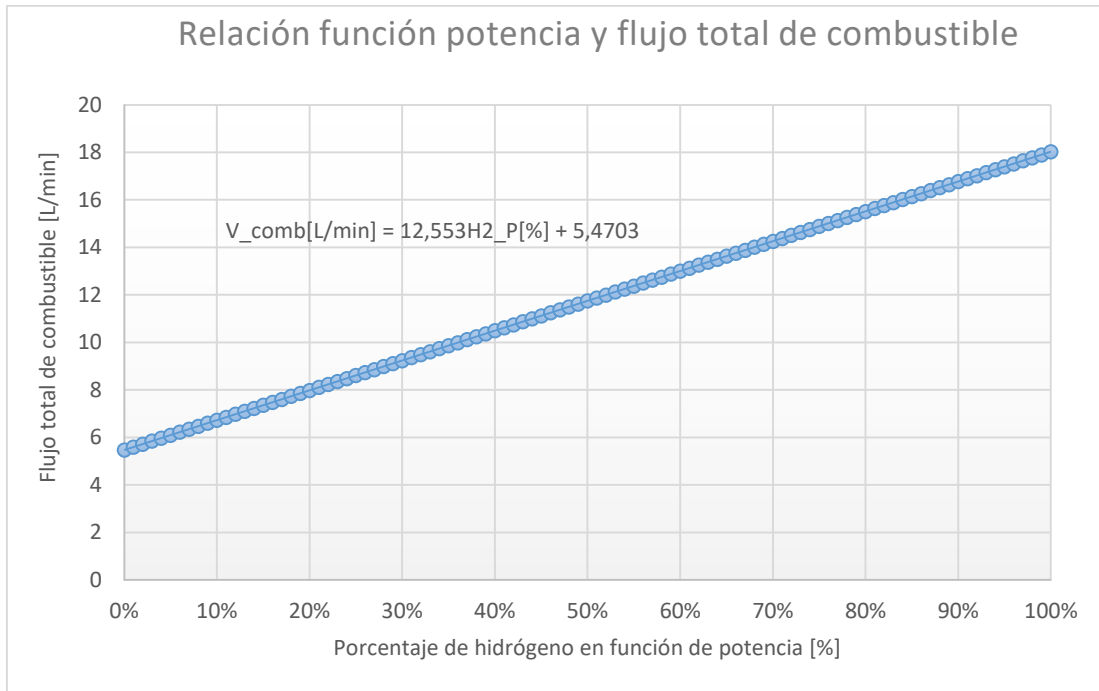
Función volumen		Función potencia		$\dot{V}_{H2}$ [L/min]	$\dot{V}_{GN}$ [L/min]	$\dot{V}_{comb}$ [L/min]
%H2	%GN	X_H2	Y_GN			
0,0%	100,0%	0%	100%	0,00	5,47	5,47
26,8%	73,2%	10%	90%	1,80	4,92	6,73
45,2%	54,8%	20%	80%	3,60	4,38	7,98
58,5%	41,5%	30%	70%	5,41	3,83	9,24
68,7%	31,3%	40%	60%	7,21	3,28	10,49
76,7%	23,3%	50%	50%	9,01	2,74	11,75
83,2%	16,8%	60%	40%	10,81	2,19	13,00
88,5%	11,5%	70%	30%	12,62	1,64	14,26
92,9%	7,1%	80%	20%	14,42	1,09	15,51
96,7%	3,3%	90%	10%	16,22	0,55	16,77
100,0%	0,0%	100%	0%	18,02	0,00	18,02

El Gráfico 3.21 muestra la relación que existe entre el reemplazo de hidrógeno en la mezcla en función potencia y el reemplazo en función volumen. Es posible observar que la relación crece considerablemente en los primeros tramos, es decir, se requiere un aporte mucho mayor en volumen de hidrógeno para ligeros cambios en el aporte energético de éste.



**Gráfico 3.21** Relación existente entre el reemplazo de hidrógeno en función potencia y en función volumen.

En el Gráfico 3.22 muestra la relación existente entre el porcentaje de hidrógeno de la mezcla en función potencia y el flujo total de combustible. Se puede observar que la relación entre ambos parámetros es lineal, esto quiere decir que cuanto mayor es el aporte energético de hidrógeno en la mezcla, mayor es también la cantidad de flujo total de combustible de dicha mezcla. Cabe destacar que cuando el hidrógeno está aportando el 100% de la energía en el quemador, se requiere un flujo total de combustible más de 3 veces mayor que en el caso donde el gas natural es quien aporta el 100% de la energía.



**Gráfico 3.22** Relación entre porcentaje de hidrógeno en función potencia y flujo total de combustible.

### 3.3 Cálculo de calores

Para poder calcular el valor tanto del calor generado por radiación como el calor generado por convección se requiere las ecuaciones (9) y (10) respectivamente.

Para el caso del calor generado por radiación, el valor de la emisividad ( $\epsilon$ ) y del área (A) del quemador MPI aparecen en la Tabla 3.4. El valor de  $T_{sup}$  corresponde a la temperatura superficial promedio registrada por los tres pirómetros y el valor  $T_{amb}$  corresponde a la temperatura ambiente del laboratorio.

Para el caso del calor generado por convección, el valor de  $\dot{m}_{gp}$  corresponde al flujo másico total de los gases producto y el valor  $C_{p_{gp}}$  al calor específico de dichos gases. El valor de  $T_{gp}$  corresponde a la temperatura superficial promedio registrada por las dos termocuplas y el valor  $T_{amb}$  corresponde a la temperatura ambiente del laboratorio.

Ahora bien, para poder obtener el valor de las pérdidas de calor en la combustión, se debe conocer primero la cantidad total de calor que emite el quemador por unidad de tiempo, la cual es igual a la potencia de trabajo seleccionada de 3 [kW]. De la ecuación (21) se puede despejar las pérdidas de calor en la combustión.

$$\dot{Q}_{total} = P = \dot{m}_{comb} \cdot LHV = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{perd} \quad (21)$$

### 3.4 Cálculo de densidades

Para obtener el valor de la densidad tanto del hidrógeno como del gas natural (metano) se utilizó la ley de los gases ideales. Dicha ley es la siguiente:

$$PV = nRT \quad (22)$$

P: Presión en [atm]

V= Volumen en [L]

n = Número de moles [mol]

R = 0,08205746 [atm · L/mol · K]

T = Temperatura en [K]

Haciendo ajustes a la ecuación (22) se puede llegar a tener una expresión de la densidad de un gas ideal, como lo muestra la ecuación (23).

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} \quad (23)$$

Donde la única variable nueva es la M, la cual corresponde a la masa molar en [g/mol].

## 4. Procedimiento experimental

En este apartado se explicará todo lo efectuado antes, durante y después del encendido del quemador MPI, en donde se tuvo un gran enfoque en la seguridad, puesto que se está trabajando con sustancias muy inflamables y peligrosas.

### 4.1 Previo a encendido

A continuación, se enlistará las acciones y medidas que se realizan previo al encendido del quemador:

- Verificar que todas las válvulas estén cerradas.
- Verificar que los tanques cilíndricos tengan combustible; observando que el primer regulador de presión tenga un cambio de presión entre el lector aguas arriba y el lector aguas abajo.
- Revisar que no se encuentren elementos inflamables en la zona de trabajo.
- Abrir llaves de paso desde el suministro hacia aguas abajo.
- Inspeccionar con un detector de fugas las posibles fugas de combustible en todas las uniones del piping.
- Realizar una prueba por burbujeo en las uniones del piping para detectar una posible fuga de combustible.
- Conectar los controladores flujos y encenderlos.
- Encender compresor y esperar un tiempo para que se llene a su capacidad máxima.
- Encender la campana de extracción de gases.
- Hacer un barrido con aire para limpiar las líneas que van desde los controladores de flujo hasta el quemador.

## 4.2 Encendido

El encendido del quemador se efectúa quemando únicamente gas natural. Primero se trabaja con una potencia de 1 [kW], lo que equivale a un flujo volumétrico de gas natural de aproximadamente 1,8 [L/min], y se agrega aire hasta tener una mezcla con exceso de aire y en donde apenas exista llama libre (llama confinada). La razón de iniciar el encendido con una potencia baja es para evitar que el quemador MPI se someta a cambios abruptos de temperatura. Una vez estabilizada la combustión en 1 [kW] sin llama libre, se continúa aumentando la potencia del quemador en tramos de 1 [kW], quemando únicamente gas natural con exceso de aire hasta llegar a la potencia de operación de 3 [kW].

Por lo tanto, la condición inicial del quemador MPI para realizar los experimentos es de 3 [kW] de potencia, operando únicamente con gas natural, mezcla con exceso de aire y una relación equivalencia de  $\phi = 0,65$  (con dicha relación de equivalencia se tiene llama confinada). Luego, se procede a añadir hidrógeno; ingresando en los controladores de flujo los valores de flujos volumétricos (caudales) calculados en el Ítem 3.2.

### 4.3 Apagado

A continuación, se enlistarán las acciones y medidas que se realizan para el apagado del quemador MPI.

- Disminuir el porcentaje de hidrógeno en volumen en la mezcla a 0%.
- Disminuir la potencia de operación cada 1 [kW] para evitar cambios abruptos de temperatura en el quemador.
- Disminuir el caudal de gas natural a 0.
- Cerrar las llaves de paso desde las más cercanas al quemador hasta las del suministro.
- Apagar primero controlador de flujo de hidrógeno, luego el de gas natural y finalmente el de aire.
- Apagar compresor de aire.
- Apagar campana de extracción de gases.

### 4.4 Registro de datos

La composición inicial de operación es 0% de H<sub>2</sub> y 100% de GN en potencia, la siguiente es 1% de H<sub>2</sub> y 99% de GN en potencia, la posterior a ella es 2% de H<sub>2</sub> y 98% de GN en potencia, y así sucesivamente hasta llegar a una composición de 15% de H<sub>2</sub> y 85% de GN en potencia. Dichas composiciones se fijan ingresando en los controladores de flujos los valores de flujos volumétricos obtenidos realizando el procedimiento de cálculo detallado en el Ítem 3.2

Observando la fluctuación de los valores de temperaturas entregados por el software Daq View del data logger, fue posible percatarse que los valores de temperaturas registrados por los pirómetros y las termocuplas se estabilizaban en un periodo aproximado de 0,5 [min], por consiguiente, se estableció un periodo de 1 [min] de estabilización entre mediciones a diferentes composiciones de H<sub>2</sub> y GN.

También, se estableció un periodo de 5 [min] para el registro de datos para cada composición diferente de H<sub>2</sub> y GN. Es preciso añadir que se configuró el software Daq View para que registrara datos cada 1 [s]. Por lo tanto, en cada periodo de 5 [min] fue posible obtener 300 valores de temperatura para cada uno de los pirómetros y cada una de las termocuplas, y 300

valores de [ppm] o [%] para cada gas contaminante. Asimismo, se efectuaron dos pruebas de la manera descrita con la finalidad de tener una mayor cantidad de datos y, por consiguiente, que éstos sean más confiables. Por lo tanto, cada valor de temperatura medido y cada valor de [ppm] o [%] de gases contaminantes medido para las distintas composiciones de H<sub>2</sub> y GN, corresponde a un promedio de 300 valores de la primera prueba, el cual se promedia con el promedio de los 300 valores de la segunda prueba.

Cabe añadir que, en el momento de realizar los experimentos, el controlador de flujo de aire presentó un problema a la hora de regular con precisión el flujo, por lo que no se pudo ingresar exactamente el valor del flujo volumétrico de aire calculado en el Ítem 3.2, por lo tanto, no se pudo mantener una relación de equivalencia constante de  $\phi = 0,65$ , sin embargo, y como lo muestra la Tabla 5.11, de todas maneras, sí se pudo mantener una relación de equivalencia al menos cercana al valor de 0,65.

## 5. Resultados experimentales y análisis

Los valores utilizados para obtener el valor de los flujos volumétricos y con ello realizar las pruebas se muestran en la Tabla 5.10.

**Tabla 5.10** Valores de parámetros involucrados

Poder calorífico inferior H <sub>2</sub>	120.000 [kJ/kg]
Poder calorífico inferior GN	49.680 [kJ/kg]
Temperatura de operación	22 [°C]
Presión de operación	1 [bar]
Densidad H <sub>2</sub>	0,083 [g/L]
Densidad GN	0,662 [g/L]

En la Tabla 5.11 se exponen los valores de los flujos volumétricos que se ingresaron en los controladores de flujos tanto de hidrógeno, como de gas natural y de aire. Estos valores corresponden a  $\dot{V}_{H_2}$ ,  $\dot{V}_{GN}$  y  $\dot{V}_a$  respectivamente; todos ellos en [L/min].

**Tabla 5.11** Flujos ingresados en los controladores de flujos de H<sub>2</sub>, GN y Aire.

Función volumen		Función potencia		Flujo volumétrico utilizado [L/min]			V̇ <sub>a,e</sub> [L/min]	V̇ <sub>a</sub> [L/min]	Ø Resultante
%H <sub>2</sub>	%GN	X_H <sub>2</sub>	Y_GN	V̇ <sub>H<sub>2</sub></sub> [L/min]	V̇ <sub>GN</sub> [L/min]	V̇ <sub>comb</sub> [L/min]			
0,0%	100,0%	0%	100%	0,00	5,47	5,47	52,75	82	0,643
3,2%	96,8%	1%	99%	0,18	5,42	5,60	52,66	82	0,642
6,3%	93,7%	2%	98%	0,36	5,36	5,72	52,56	82	0,641
9,2%	90,8%	3%	97%	0,54	5,31	5,85	52,47	80	0,656
12,1%	87,9%	4%	96%	0,72	5,25	5,97	52,38	81	0,647
14,8%	85,2%	5%	95%	0,90	5,20	6,10	52,29	81	0,645
17,4%	82,6%	6%	94%	1,08	5,14	6,22	52,19	81	0,644
19,9%	80,1%	7%	93%	1,26	5,09	6,35	52,10	80	0,651
22,3%	77,7%	8%	92%	1,44	5,03	6,47	52,01	81	0,642
24,6%	75,4%	9%	91%	1,62	4,98	6,60	51,91	80	0,649
26,8%	73,2%	10%	90%	1,80	4,92	6,73	51,82	80	0,648
28,9%	71,1%	11%	89%	1,98	4,87	6,85	51,73	80	0,647
31,0%	69,0%	12%	88%	2,16	4,81	6,98	51,63	80	0,645
33,0%	67,0%	13%	87%	2,34	4,76	7,10	51,54	80	0,644
34,9%	65,1%	14%	86%	2,52	4,70	7,23	51,45	81	0,635
36,8%	63,2%	15%	85%	2,70	4,65	7,35	51,36	81	0,634

## 5.1 Mediciones de temperatura

### 5.1.1 Resultado de mediciones de temperatura

En la Tabla 5.12 se muestra el resultado de las mediciones de temperatura obtenidas tanto por los pirómetros como por las termocuplas. Como se mencionó en el Ítem 4.4, los valores de temperaturas mostrados en la tabla para las diferentes composiciones corresponden al promedio de 300 valores de la primera prueba con el promedio de 300 valores de la segunda prueba para cada valor de porcentaje de hidrógeno en potencia. Por otra parte, en la Tabla 5.13 es posible ver los errores instrumentales tanto de las termocuplas como de los pirómetros.

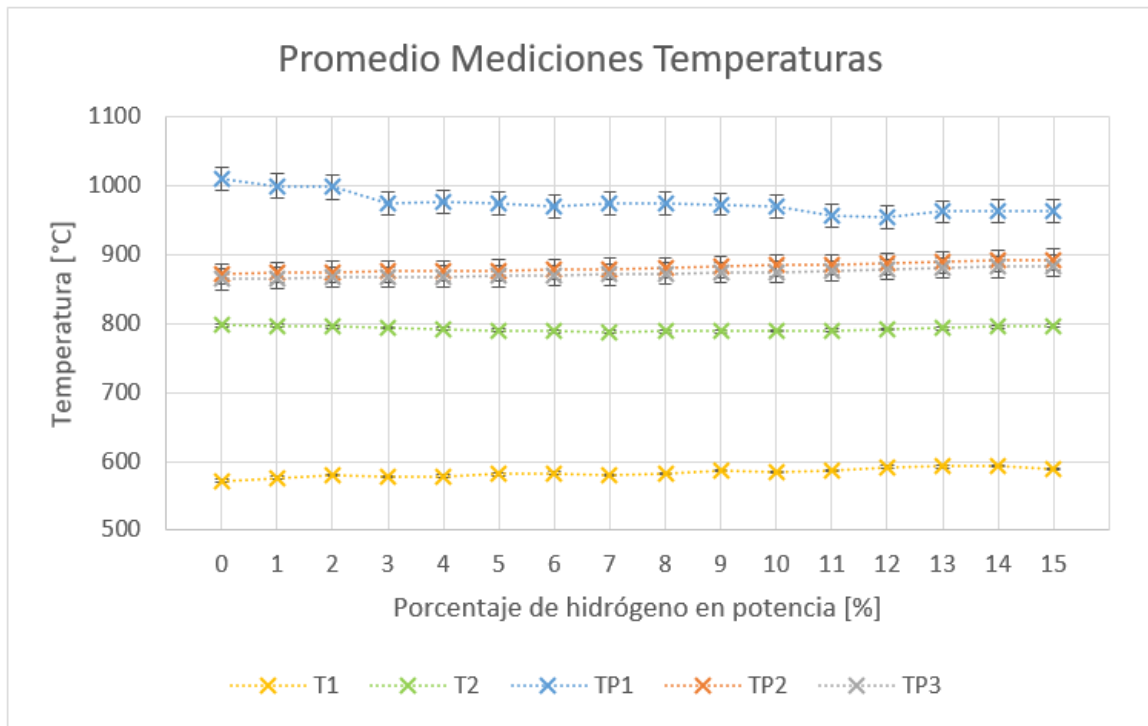
**Tabla 5.12** Resultado temperaturas promedio de los cinco puntos de medición para composición de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.

%H <sub>2</sub>	<b>Temperaturas Promedio [°C]</b>				
	T1	T2	TP1	TP2	TP3
0%	572,1	797,0	1010,0	871,9	863,8
1%	576,5	796,7	999,3	873,9	865,7
2%	580,5	795,0	997,4	874,6	866,5
3%	578,4	793,8	974,0	875,5	867,0
4%	578,8	791,9	976,6	875,7	867,7
5%	581,2	789,7	973,1	876,5	868,5
6%	583,1	788,4	970,1	878,0	869,8
7%	580,3	787,9	972,9	878,8	870,8
8%	581,8	788,2	974,5	880,2	872,3
9%	586,0	788,5	972,7	881,9	873,4
10%	583,8	789,4	968,7	884,6	874,3
11%	586,8	790,1	956,4	884,7	875,7
12%	591,9	791,4	954,4	886,4	877,8
13%	592,6	793,3	961,7	888,7	880,4
14%	593,4	794,8	963,5	890,7	882,2
15%	589,0	796,3	963,0	892,2	883,3
$\Delta T$	16,9	-0,7	-47,0	20,2	19,5

**Tabla 5.13** Errores instrumentales de mediciones de temperaturas.

%H <sub>2</sub>	<b>Error instrumental en [°C]</b>				
	Error termocupla tipo S: $\pm 0,25$		Error pirómetro: $0,5 \pm 2$ [°C] + Error Resistencia: 1%		
	T1	T2	TP1	TP2	TP3
0%	1,43	1,99	17,15	15,08	14,96
1%	1,44	1,99	16,99	15,11	14,99
2%	1,45	1,99	16,96	15,12	15,00
3%	1,45	1,98	16,61	15,13	15,00
4%	1,45	1,98	16,65	15,14	15,02
5%	1,45	1,97	16,60	15,15	15,03
6%	1,46	1,97	16,55	15,17	15,05
7%	1,45	1,97	16,59	15,18	15,06
8%	1,45	1,97	16,62	15,20	15,08
9%	1,46	1,97	16,59	15,23	15,10
10%	1,46	1,97	16,53	15,27	15,11
11%	1,47	1,98	16,35	15,27	15,14
12%	1,48	1,98	16,32	15,30	15,17
13%	1,48	1,98	16,43	15,33	15,21
14%	1,48	1,99	16,45	15,36	15,23
15%	1,47	1,99	16,45	15,38	15,25

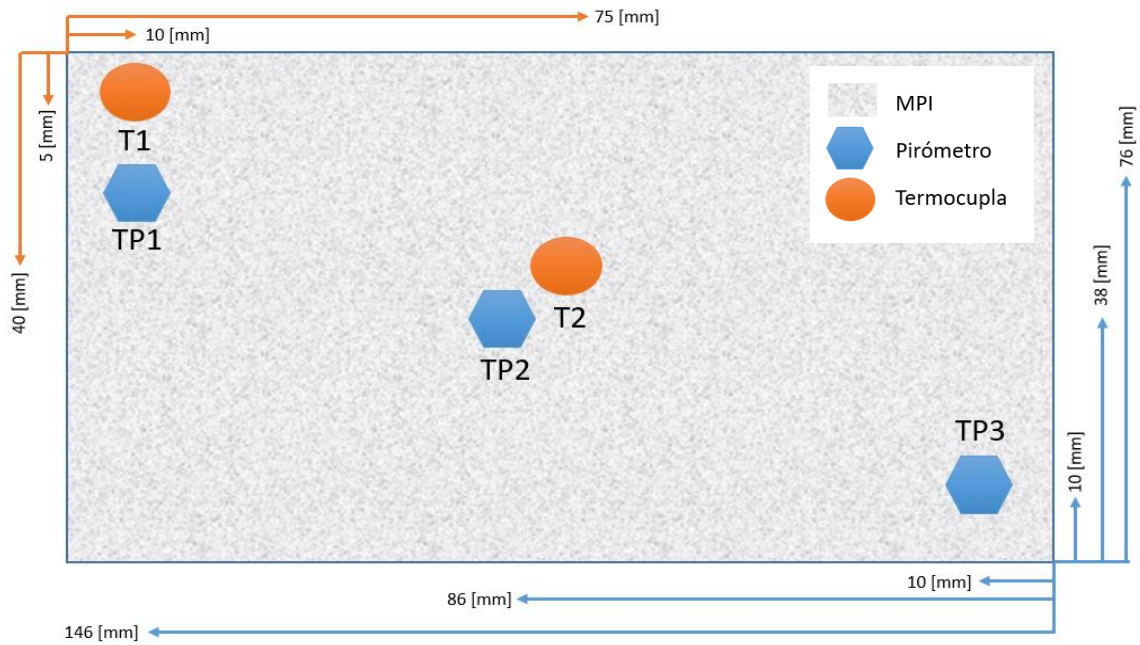
El Gráfico 5.23 muestra las cinco curvas correspondientes a los cinco puntos de temperatura señalados en la Tabla 5.12. Cabe mencionar que los errores de la Tabla 5.13 están incluidos en las cinco curvas, sin embargo, al ser tan pequeños dichos errores no logran ser tan notorios en el Gráfico 5.23.



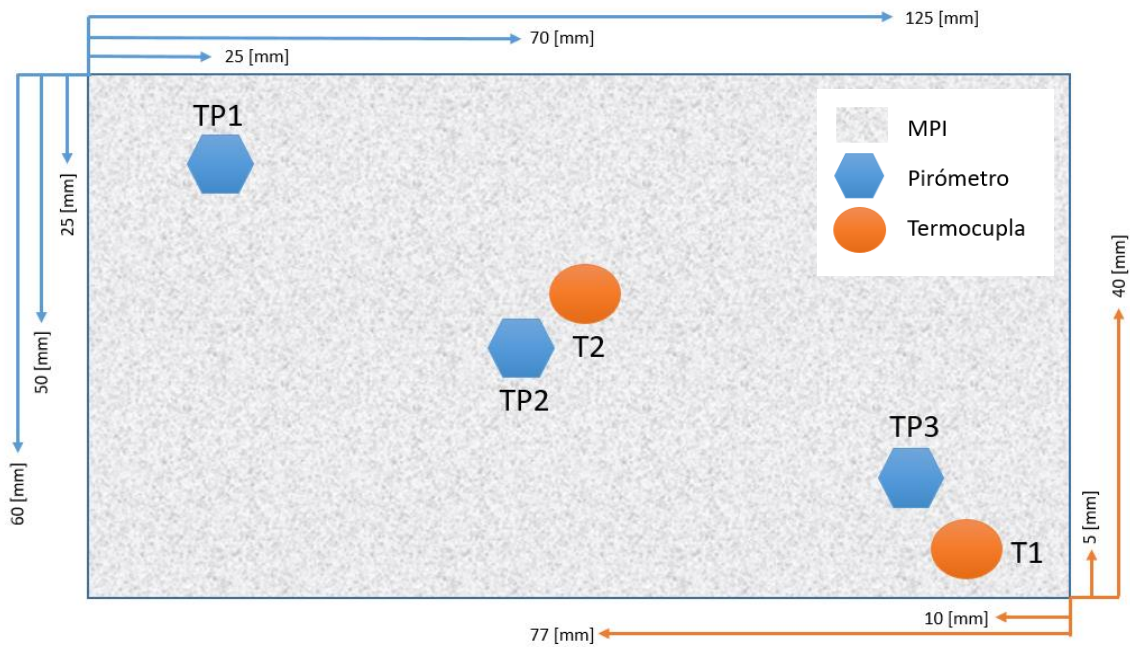
**Gráfico 5.23** Gráfico de temperaturas promedio de los cinco puntos de medición de temperatura para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.

A continuación, se realizará una comparación con el trabajo realizado por Cristóbal Monzó, quien utilizó el mismo quemador MPI utilizado en este trabajo, sin embargo, en lugar de mezclar gas natural con hidrógeno, mezcló gas licuado de petróleo con hidrógeno.

En la Imagen 5.31 se muestra la disposición de los puntos de medición de temperatura en el quemador MPI que se utilizó en este trabajo. Y también, a modo de comparación, la Imagen 5.32 muestra la disposición de los puntos de medición de temperatura que Monzó empleó en su trabajo.

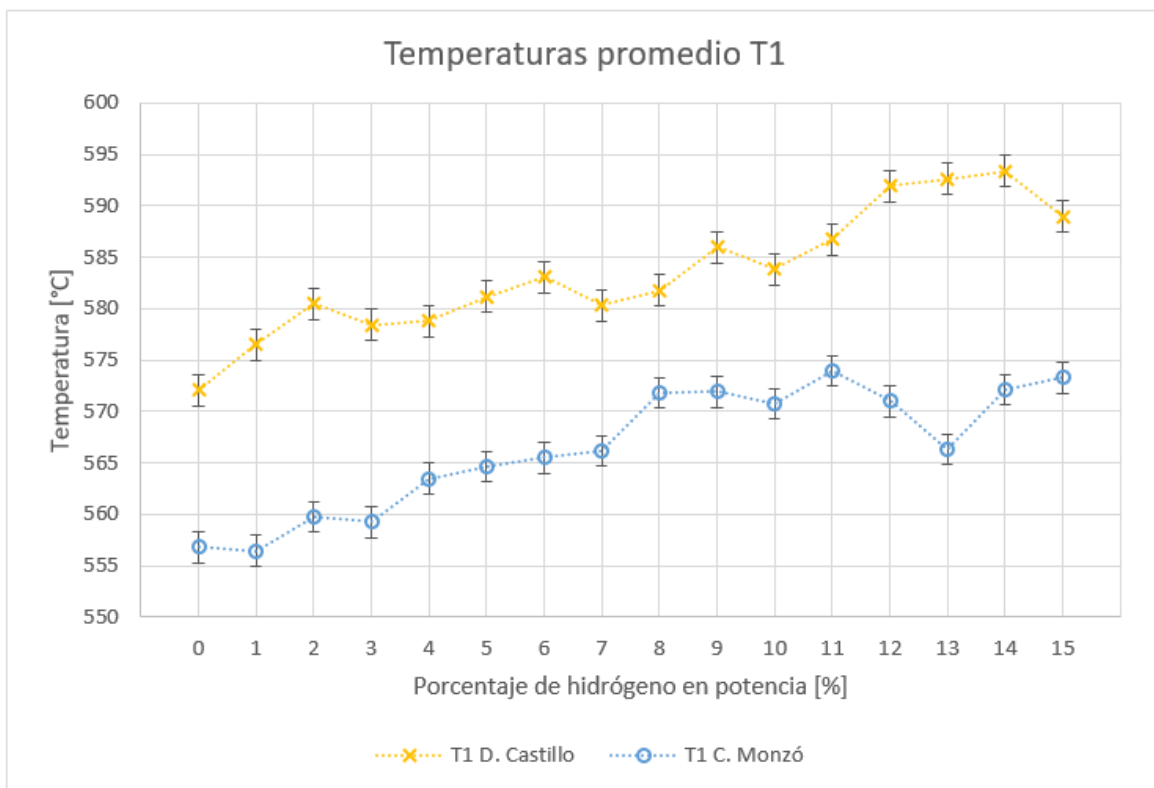


**Imagen 5.31** Disposición de los puntos de medición de temperatura de este trabajo.

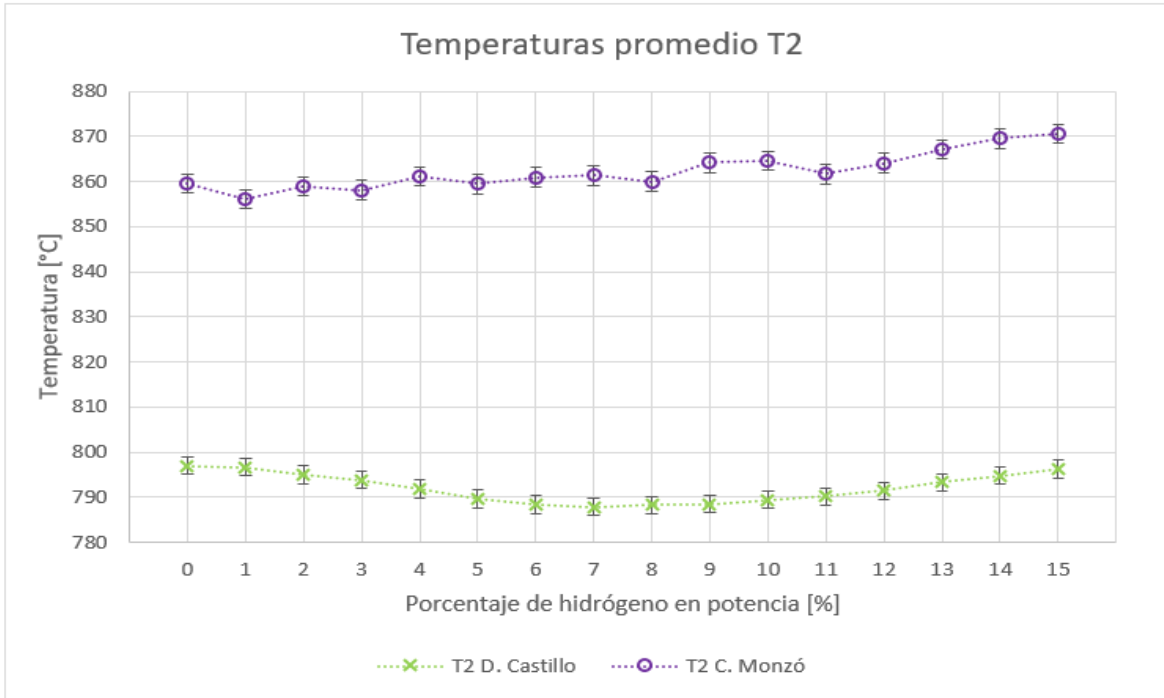


**Imagen 5.32** Disposición de los puntos de medición de temperatura del trabajo de Cristóbal Monzó.

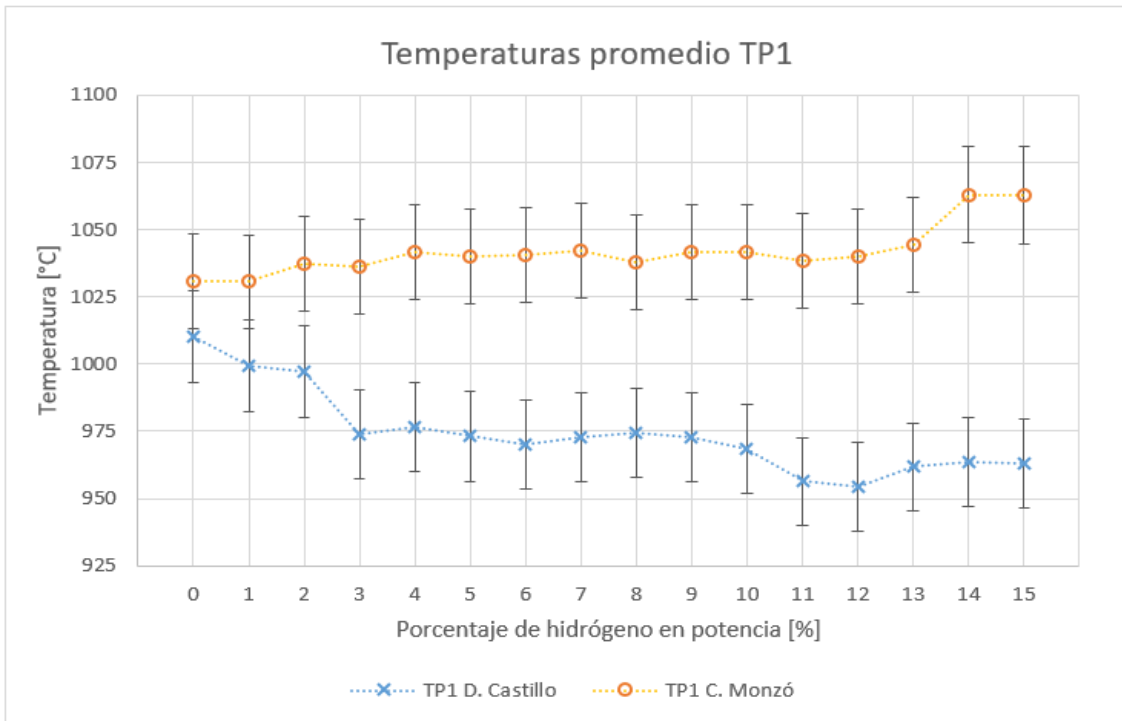
Ahora se procederá a mostrar las cinco curvas de temperatura del Gráfico 5.23 por separado, en donde a cada una se le añadirá la curva de temperatura respectiva perteneciente al trabajo de Monzó; dichos gráficos corresponden desde el Gráfico 5.24 hasta el Gráfico 5.28



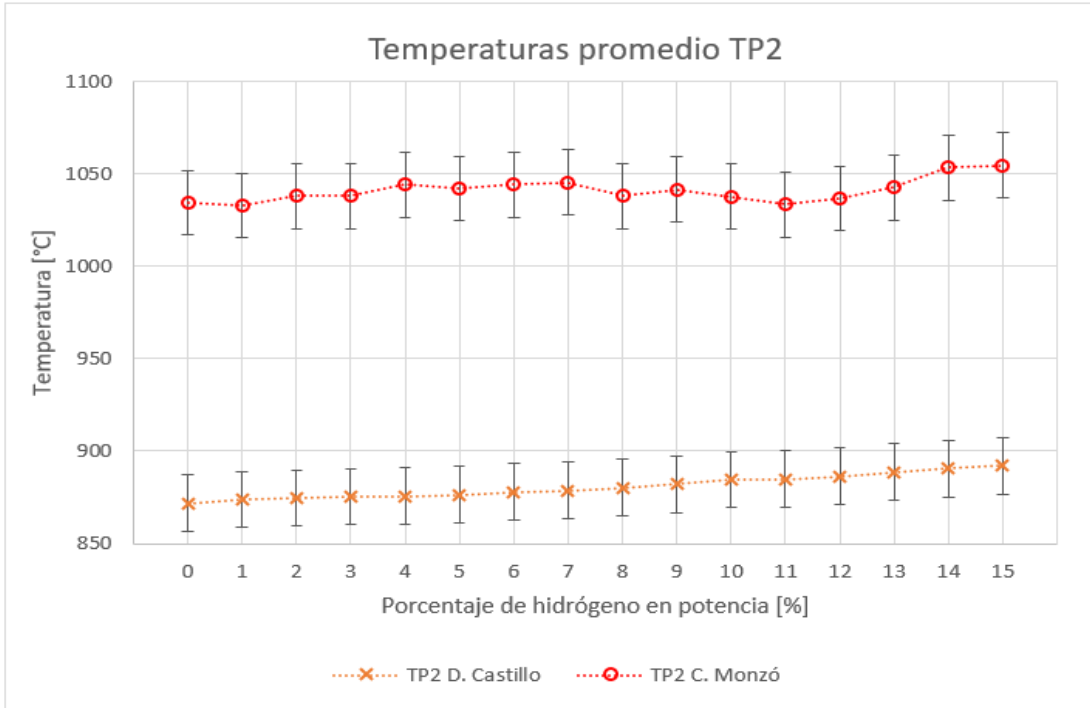
**Gráfico 5.24** Temperaturas promedio termocuplas T1 para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



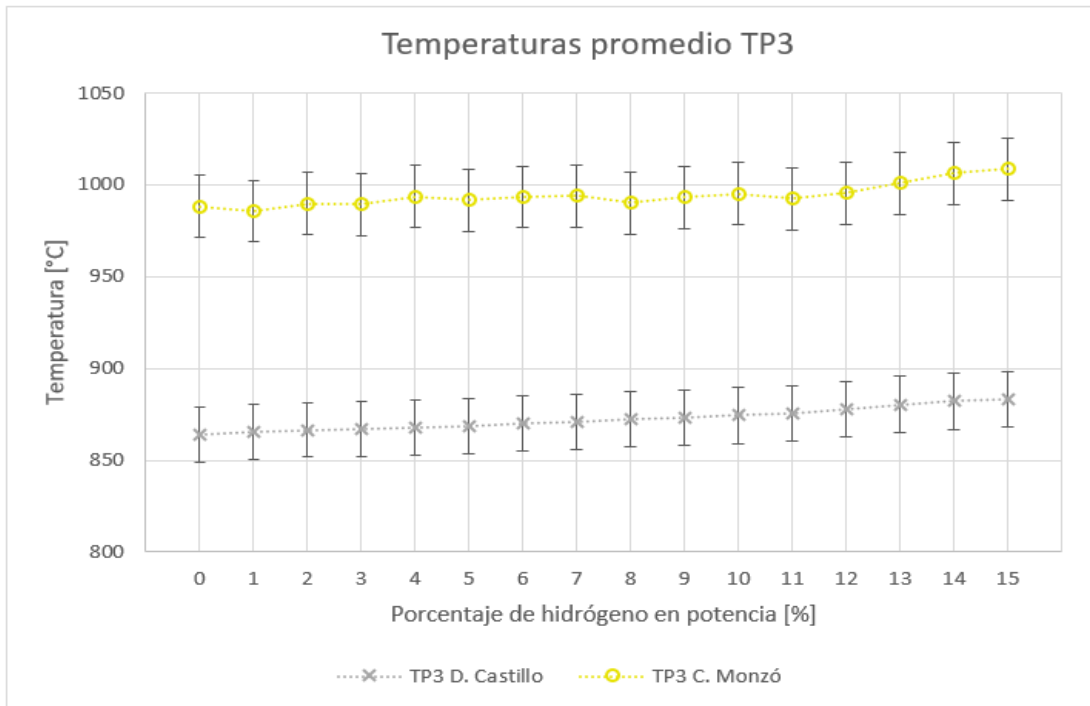
**Gráfico 5.25** Temperaturas promedio termocuplas T2 para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.26** Temperaturas promedio pirómetros TP1 para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.27** Temperaturas promedio pirómetros TP2 para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.28** Temperaturas promedio pirómetros TP3 para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.

En la Tabla 5.14 se muestran los valores de temperatura registrados por el equipo analizador de gases TESTO-350, cuyo sensor fue posicionado a 300 [mm] de la superficie del quemador MPI. Se muestran los valores de temperatura registrados en las dos pruebas realizadas para las composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en función potencia y el promedio de ambas.

**Tabla 5.14** Temperatura registrada por el equipo TESTO-350 a 300 [mm] de la superficie del quemador MPI.

%H2	Temperatura TESTO [°C]		
	Prueba 1	Prueba 2	Promedio
0	73,27	68,62	70,94
1	68,35	61,70	65,03
2	72,11	65,08	68,60
3	67,90	64,65	66,27
4	72,57	65,31	68,94
5	71,97	66,90	69,44
6	67,65	65,24	66,45
7	72,71	63,73	68,22
8	67,43	64,23	65,83
9	67,17	67,32	67,24
10	68,06	64,31	66,18
11	70,41	64,81	67,61
12	69,71	66,36	68,04
13	73,74	64,23	68,98
14	70,56	65,66	68,11
15	68,39	69,12	68,76

### 5.1.2 Análisis de mediciones de temperatura

Es posible apreciar en la Tabla 5.12 que para los puntos de medición T1, TP2 y TP3 la temperatura promedio aumenta a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla también lo hace. Sin embargo, para el punto de medición TP1, la temperatura promedio decrece a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Y para el punto de medición T2, la temperatura decrece para los primeros porcentajes de hidrógeno en potencia y luego vuelve a subir a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Tiene sentido termodinámico que la temperatura aumente en la mayoría de los puntos al aumentar la cantidad de hidrógeno en la mezcla, puesto que éste posee un poder calorífico inferior por unidad de masa ( $H_{inf}$ ) equivalente a más de dos veces mayor que el del gas natural. Sin embargo, esto no es del todo correcto, puesto que la potencia del quemador se mantiene

constante, lo que equivale a decir que el producto entre el flujo másico y el poder calorífico inferior de la mezcla se mantiene constante.

También en la Tabla 5.12 es posible observar el cambio o delta de temperatura que tuvo cada punto de medición con respecto al estado en donde hay 15% de hidrógeno en función potencia en la mezcla y el estado en donde hay 0% de hidrógeno en función potencia en la mezcla. Se puede observar que el punto de medición que mayor diferencia presentó entre los dos estados mencionados fue el punto TP1, con un delta de  $-47$  [°C], y el punto de medición que menor diferencia presentó entre los dos estados mencionados fue el punto T2, con un delta de  $-0,7$  [°C].

Una de las razones que permite explicar la disminución de temperatura en el punto de medición TP1 es debido a que la mezcla entre hidrógeno y gas natural no posee uniformidad u homogeneidad perfecta, por consiguiente, el calor no se reparte exactamente igual en todos los puntos del quemador. Por otro lado, en la esquina superior izquierda, aparte del punto de medición de temperatura decreciente TP1, se encuentra también el punto de medición T1, el cual presenta un comportamiento de temperatura creciente a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Esto implica que, en esa zona del quemador, se obtiene un aumento de la tasa de calor generada por convección, pero una disminución de la tasa de calor generada por radiación.

En cuanto a la comparación con el trabajo de Monzó, es posible apreciar en el Gráfico 5.25, Gráfico 5.26, Gráfico 5.27 y Gráfico 5.28, que los valores de temperatura promedio registrados por Monzó fueron superiores a los registrados por el autor de este trabajo, a excepción por el Gráfico 5.24 en donde se produjo el caso contrario. El hecho de que la temperatura promedio de la mayoría de los puntos de medición de Monzó hayan resultado mayores, guarda relación con que en su trabajo el quemador se operó con una potencia de 6 [kW], es decir, el doble a la utilizada en esta investigación, por lo tanto, se dispuso de una mayor energía térmica.

Cabe precisar también que todas las curvas de temperatura promedio de Monzó resultaron tener un comportamiento creciente a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumentaba.

También se debe mencionar que la temperatura registrada por el equipo TESTO-350 fue mucho mayor en el trabajo de Monzó que en esta investigación, incluso considerando que Monzó posicionó el sensor del equipo a una distancia de 630 [mm] de la superficie del quemador, en cambio, en este trabajo la distancia fue de 300 [mm]. La temperatura promedio registrada por el analizador de gases en las pruebas de Monzó fue de 200 [°C] aproximadamente, mientras que, en este trabajo, como se puede ver en la Tabla 5.14, la temperatura promedio ronda los 65-70 [°C]. Una explicación a esta diferencia se le atribuye a que el quemador en el trabajo de Monzó operó con el doble de la potencia utilizada en este trabajo, por lo tanto, el resultado de todas las temperaturas debiese ser mayor porque se está liberando mayor energía térmica. Otra explicación plausible es que en este trabajo se utilizó una razón de equivalencia menor a la usada por Monzó, por lo que se requirió un flujo de aire mayor, por consiguiente, el calor generado debe distribuirse en una mayor cantidad de masa, generando así una disminución de temperatura de los gases productos de combustión. En la Tabla 5.15 se muestra el resultado del cálculo para obtener el valor del calor liberado por radiación y el calor liberado por convección, cuyas expresiones quedaron definidas en el Ítem 2.6. Además, se presentan las pérdidas de calor, las cuales corresponden a la sustracción entre el calor total (potencia de operación de 3[kW]) menos el calor radiante y el calor convectivo. La Tabla 5.15 también muestra los porcentajes que tienen el calor radiante, el calor convectivo y el calor de pérdidas en relación al calor total, en donde éste último resultó ser un valor considerablemente bajo para todas las concentraciones de H<sub>2</sub> en función potencia. Además, se incluye la eficiencia del quemador, en donde se asume que todo el calor convectivo y radiante será utilizado en algún proceso, por lo tanto, la expresión de la eficiencia se calculó de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv}}{\dot{Q}_{total}} \quad (24)$$

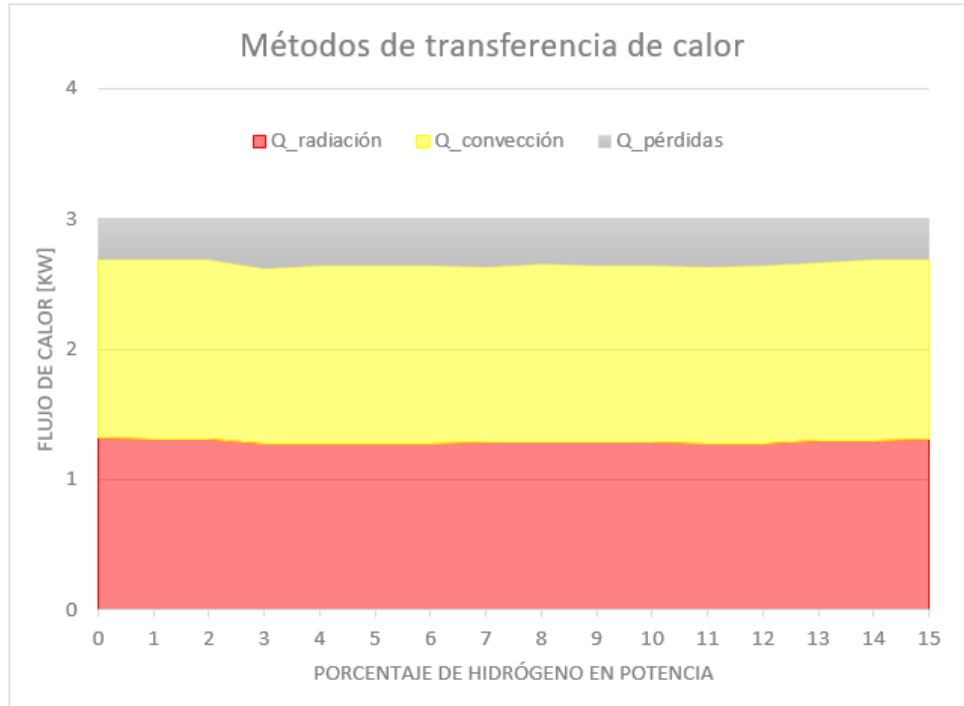
En la Tabla 5.15 es posible observar que el resultado de la eficiencia en todas las concentraciones de hidrógeno en potencia es superior al 87%, lo cual es un valor bastante aceptable.

**Tabla 5.15** Calor por radiación, calor por convección, pérdidas de calor en relación al calor total y eficiencia térmica.

% H <sub>2</sub>	Q_Total [kW]	Q_rad [kW]	Porcentaje rad [%]	Q_conv [kW]	Porcentaje conv [%]	Q_perd [kW]	Porcentaje perd [%]	Eficiencia [%]
0%	3	1,318	43,9%	1,386	46,2%	0,296	9,9%	90,1%
1%	3	1,308	43,6%	1,391	46,4%	0,301	10,0%	90,0%
2%	3	1,307	43,6%	1,393	46,4%	0,299	10,0%	90,0%
3%	3	1,275	42,5%	1,360	45,3%	0,365	12,2%	87,8%
4%	3	1,280	42,7%	1,373	45,8%	0,346	11,5%	88,5%
5%	3	1,278	42,6%	1,374	45,8%	0,348	11,6%	88,4%
6%	3	1,277	42,6%	1,375	45,8%	0,348	11,6%	88,4%
7%	3	1,284	42,8%	1,356	45,2%	0,360	12,0%	88,0%
8%	3	1,291	43,0%	1,373	45,8%	0,336	11,2%	88,8%
9%	3	1,292	43,1%	1,364	45,5%	0,344	11,5%	88,5%
10%	3	1,291	43,0%	1,363	45,4%	0,345	11,5%	88,5%
11%	3	1,276	42,5%	1,367	45,6%	0,357	11,9%	88,1%
12%	3	1,278	42,6%	1,375	45,8%	0,346	11,5%	88,5%
13%	3	1,296	43,2%	1,379	46,0%	0,325	10,8%	89,2%
14%	3	1,304	43,5%	1,397	46,6%	0,299	10,0%	90,0%
15%	3	1,307	43,6%	1,394	46,5%	0,299	10,0%	90,0%

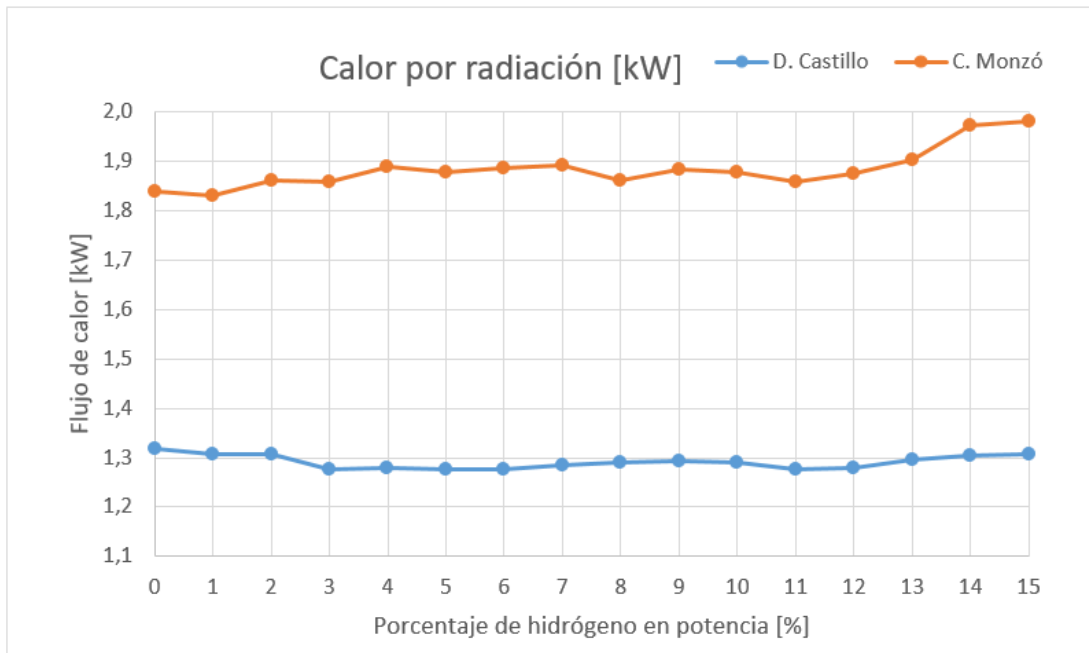
Es importante mencionar que, para el cálculo del calor por convección, usando la ecuación (10), se necesitó calcular los valores  $m_{gp}$  y  $Cp_{gp}$ , que corresponden a la masa de los gases productos y el calor específico de los gases productos respectivamente. Por lo tanto, se requirió hacer un balance estequiométrico el cual, a diferencia de la expresión (19), sí considera el oxígeno sobrante de los gases productos de combustión debido a que se empleó experimentalmente combustión con exceso de aire. No obstante, si bien se detectó experimentalmente en los gases productos la presencia de CO, H<sub>2</sub> y HC, dichos valores no se incluyeron en el balance estequiométrico y, por consiguiente, no fueron incluidos para obtener  $m_{gp}$  y  $Cp_{gp}$ , puesto que las concentraciones de dichos gases obtenidas (Tabla 5.16) son despreciables en un balance de masa.

El Gráfico 5.29 permite ver de una manera más descriptiva la contribución del calor por radiación, la contribución de calor por convección y las pérdidas de calor en relación a la tasa de calor total de 3 [kW]; y todo ello en función del porcentaje de hidrógeno en potencia de la mezcla.

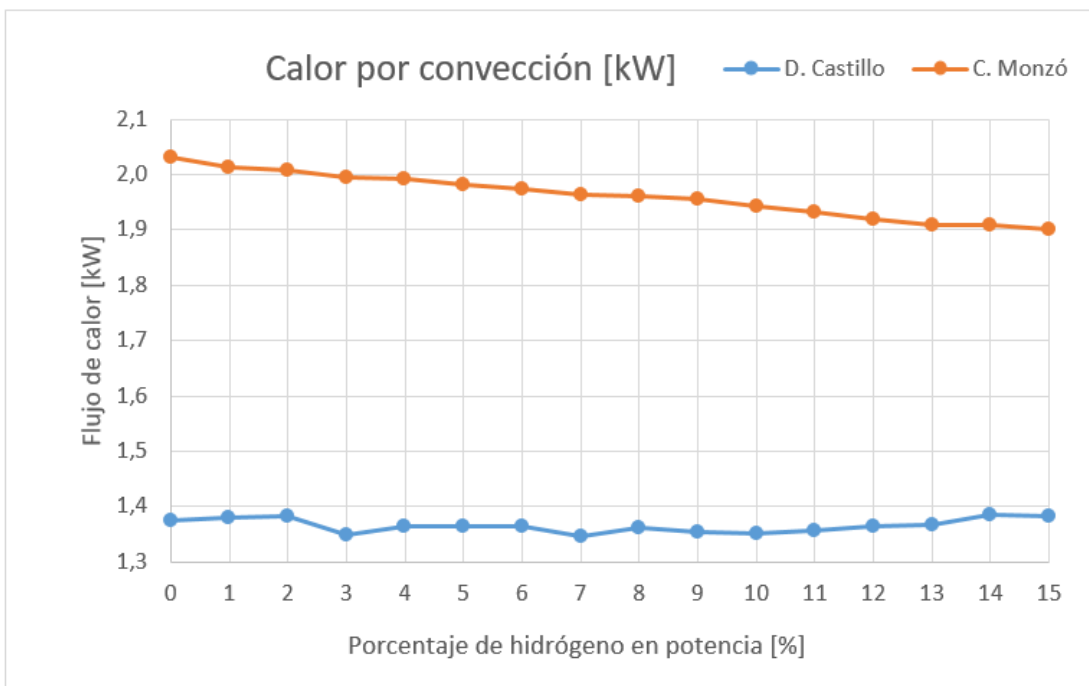


**Gráfico 5.29** Contribución de los distintos métodos de transferencia de calor en función del porcentaje de hidrógeno en potencia de la mezcla.

El Gráfico 5.30 y el Gráfico 5.31 tienen el objetivo de visualizar si la adición de hidrógeno mejora o empeora la transferencia de calor por radiación y convección respectivamente. A ambos gráficos se ha añadido la curva respectiva del trabajo de Monzó.



**Gráfico 5.30** Calor por radiación en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla.

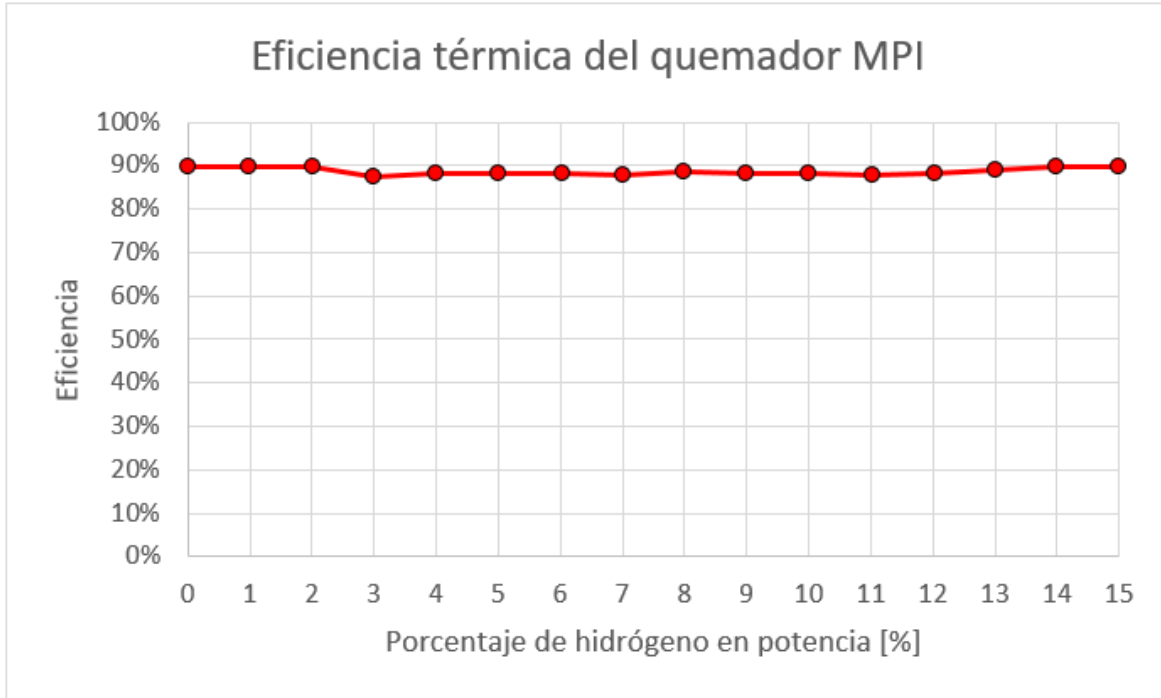


**Gráfico 5.31** Calor por convección en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla.

Tanto en el Gráfico 5.30 como en el Gráfico 5.31 se puede apreciar una clara tendencia para las curvas de flujo de calor del trabajo de Monzó. En el Gráfico 5.30 se puede observar que el calor por radiación aumenta a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla también lo hace. Y en el Gráfico 5.31 se puede observar que el calor por convección disminuye a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta.

Por el contrario, las curvas de flujo de calor de este trabajo no tienen una tendencia clara. Se podría suponer por simple vista que los valores de calor por radiación y por convección permanecen relativamente constante a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Para apoyar esa suposición se calculó dos valores estadísticos para ambas curvas: el rango y la desviación estándar. Para ambas curvas, el valor del rango no supera los 0,05 [kW] y la desviación estándar no supera los 0,015 [kW]. En consecuencia, se podría considerar que, en este trabajo, tanto el calor por radiación como el calor por convección, permanecen constantes a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta.

El Gráfico 5.32 muestra la eficiencia térmica del quemador MPI en función del porcentaje de hidrógeno en potencia. La ecuación (24) señala que la eficiencia térmica depende, por un lado, del calor por radiación ( $\dot{Q}_{rad}$ ) y del calor por convección ( $\dot{Q}_{conv}$ ), los cuales se han determinado como constantes a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta y, por otro lado, la eficiencia térmica también depende del calor total ( $\dot{Q}_{total}$ ), el cual corresponde a la potencia fija de 3 [kW]. Por lo tanto, dado que las tres variables que definen a la eficiencia térmica del quemador MPI permanecen constantes a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta, se puede concluir, por consiguiente, que la eficiencia térmica del quemador MPI permanece también constante a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta.



**Gráfico 5.32** Eficiencia térmica del quemador MPI en función del porcentaje de hidrógeno en potencia en la mezcla.

## 5.2 Mediciones de gases productos

### 5.2.1 Resultado de mediciones de gases productos

En la Tabla 5.16 se muestra el resultado de las mediciones de gases productos obtenidas usando el analizador de gases TESTO-350. Los gases de interés son CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC y H<sub>2</sub>. Es preciso señalar que no se incluye a los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), puesto que el equipo detectó 0 [ppm] durante todo momento en las dos pruebas realizadas. Por otra parte, en la Tabla 5.17 es posible ver el error instrumental asociado a la medición de cada gas en específico, donde dichos valores se obtuvieron de la ficha técnica del equipo en cuestión.

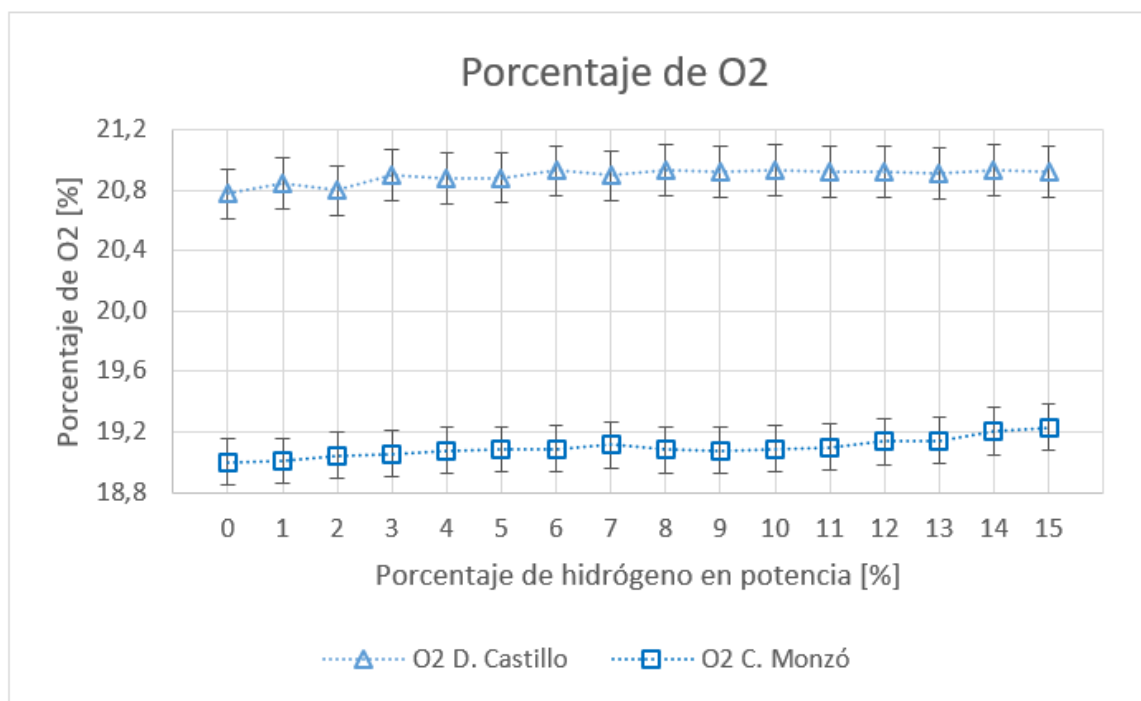
**Tabla 5.16** Resultado emisiones promedio de gases productos para composición de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.

%H <sub>2</sub>	<b>Emisiones promedio</b>				
	%O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm HC	ppm H <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> IR
0%	20,77	24,30	756,35	1,71	0,04
1%	20,84	21,39	723,97	3,02	0,02
2%	20,80	24,39	717,14	6,52	0,03
3%	20,90	25,08	710,71	7,67	0,02
4%	20,88	27,64	710,24	10,47	0,04
5%	20,88	27,50	710,46	12,25	0,03
6%	20,93	26,18	705,61	12,47	0,02
7%	20,89	26,72	704,70	13,85	0,03
8%	20,93	24,88	699,25	10,95	0,02
9%	20,92	25,54	696,62	11,77	0,02
10%	20,93	24,92	692,90	10,50	0,02
11%	20,92	24,99	689,35	10,76	0,02
12%	20,92	25,36	684,54	9,49	0,02
13%	20,91	25,25	680,00	9,97	0,02
14%	20,93	24,12	673,92	8,44	0,02
15%	20,92	24,42	670,19	8,44	0,02

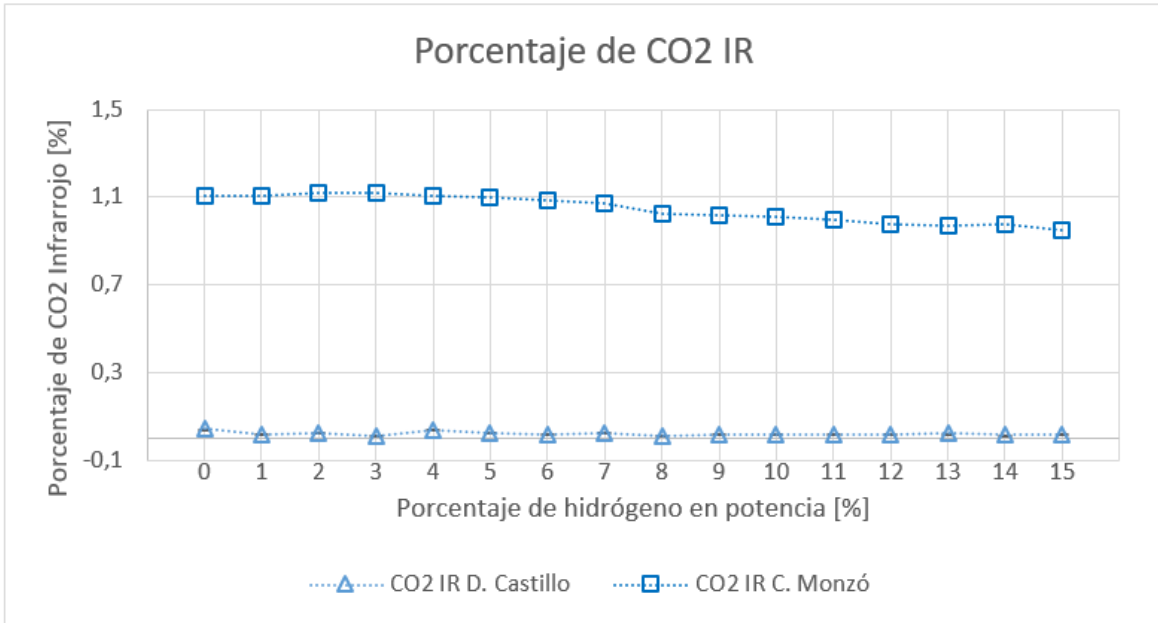
**Tabla 5.17** Error instrumental de mediciones de gases productos.

%H <sub>2</sub>	<b>Error instrumental</b>				
	%O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm HC	ppm H <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub> IR
	0,8 [%]	2 [%]	2 [%]	1 [ppm]	0,2 [%]
0%	0,166	0,49	15,13	1	8,6E-05
1%	0,167	0,43	14,48	1	4,1E-05
2%	0,166	0,49	14,34	1	5,3E-05
3%	0,167	0,50	14,21	1	3,0E-05
4%	0,167	0,55	14,20	1	7,8E-05
5%	0,167	0,55	14,21	1	5,8E-05
6%	0,167	0,52	14,11	1	3,4E-05
7%	0,167	0,53	14,09	1	5,2E-05
8%	0,167	0,50	13,98	1	3,1E-05
9%	0,167	0,51	13,93	1	3,7E-05
10%	0,167	0,50	13,86	1	3,6E-05
11%	0,167	0,50	13,79	1	3,9E-05
12%	0,167	0,51	13,69	1	3,7E-05
13%	0,167	0,51	13,60	1	4,6E-05
14%	0,167	0,48	13,48	1	3,2E-05
15%	0,167	0,49	13,40	1	4,4E-05

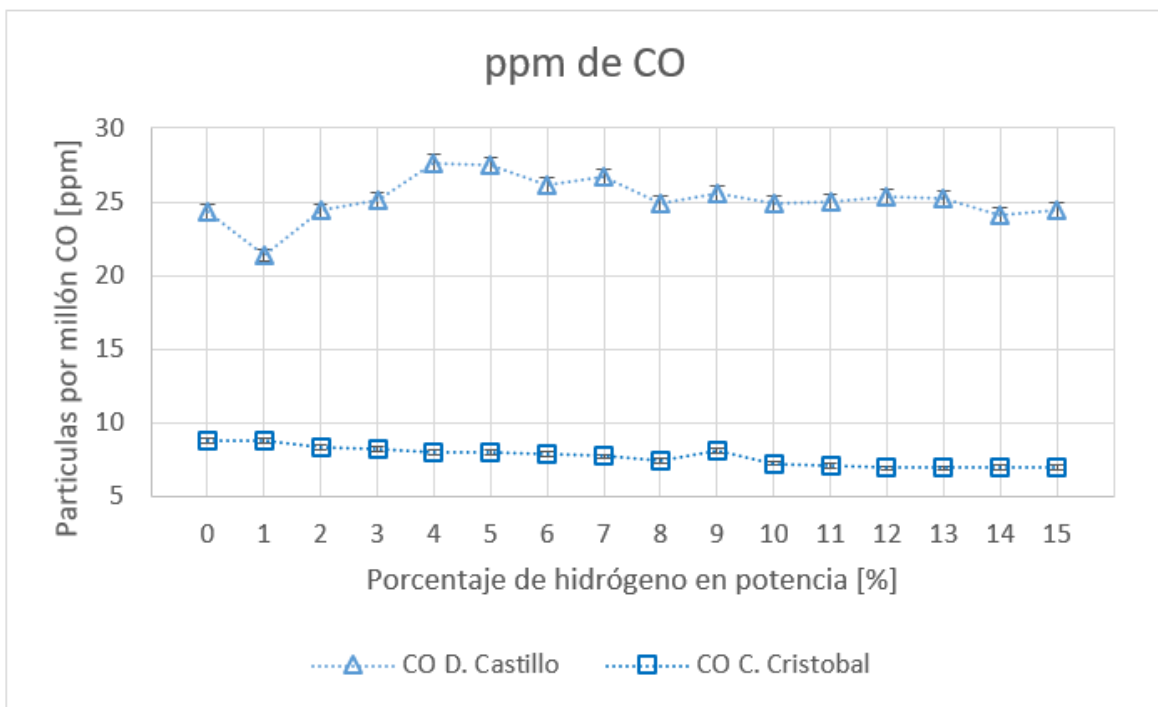
A continuación, se comparará gráficamente los datos mostrados recientemente de los gases productos con los obtenidos en el trabajo de Cristóbal Monzó. Los datos correspondientes son mostrados desde el Gráfico 5.33 hasta el Gráfico 5.37. Cabe destacar que el trabajo de Monzó sí registró datos de  $\text{NO}_x$ , sin embargo, no registró datos de hidrocarburos (HC), los cuales se muestran sin comparación en el Gráfico 5.37.



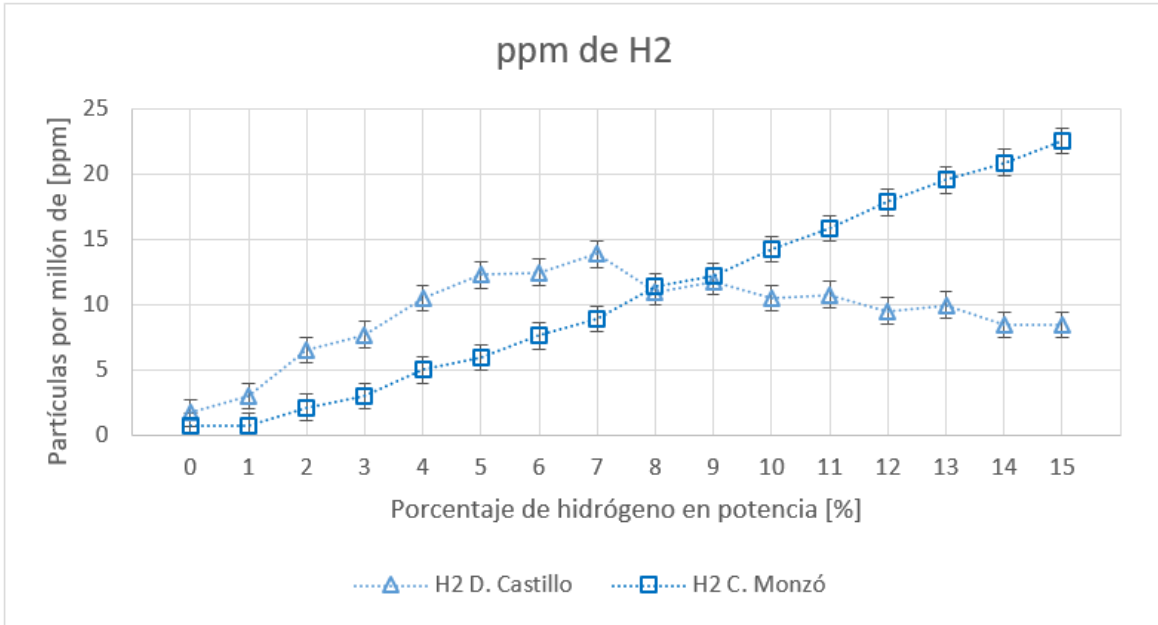
**Gráfico 5.33** Porcentajes de  $\text{O}_2$  para composiciones de 0% a 15% de  $\text{H}_2$  en potencia.



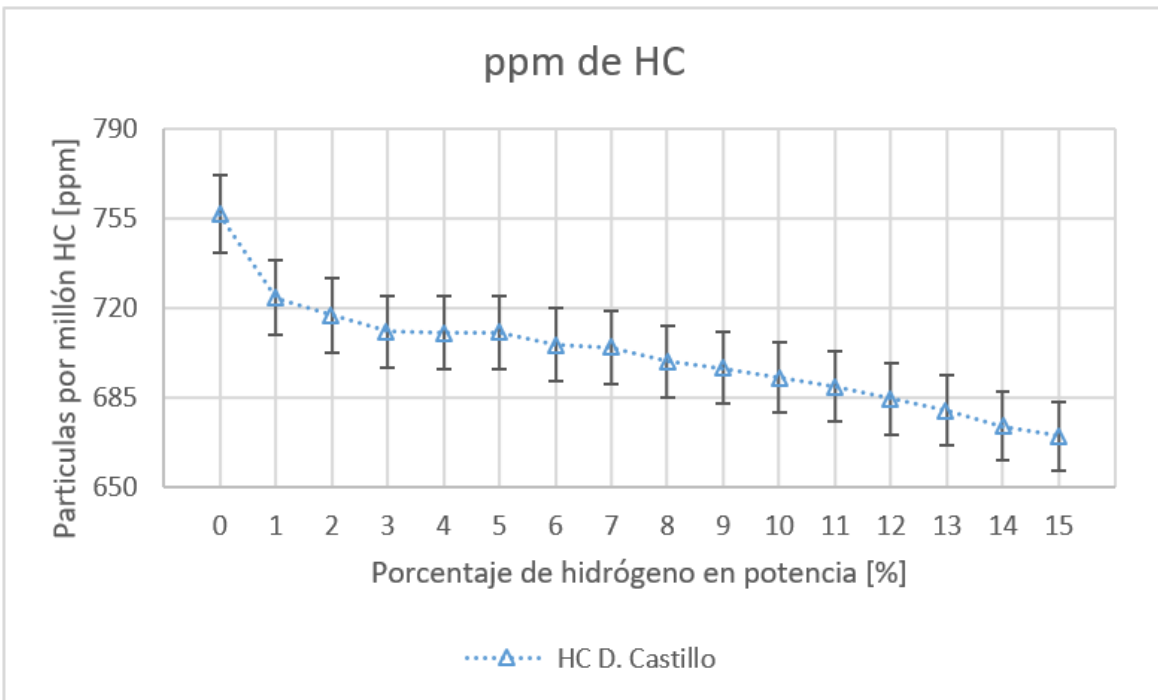
**Gráfico 5.34** Porcentajes de CO<sub>2</sub> infrarrojo para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.35** Variación de ppm de CO para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.36** Variación de ppm de H<sub>2</sub> para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.



**Gráfico 5.37** Variación de ppm de HC para composiciones de 0% a 15% de H<sub>2</sub> en potencia.

### 5.2.2 Análisis de mediciones de gases productos

En cuanto al  $O_2$ , se observa en el Gráfico 5.33 que en ambos trabajos tuvieron como resultado un aumento en el porcentaje de  $O_2$  a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumentaba. Para este trabajo, se obtuvo un aumento de 20,77% de  $O_2$  para el caso de 0% de  $H_2$  en la mezcla hasta un valor de 20,92% de  $O_2$  para el caso de 15% de  $H_2$  en función potencia en la mezcla. Este aumento se puede explicar dado que la campana tiene una zona abierta considerablemente amplia para que los pirómetros puedan ser apuntados y dirigidos hacia la superficie del quemador MPI. Por lo tanto, cuando la campana extrae los gases, genera una aceleración en los gases productos, los cuales al aumentar su velocidad generan una zona de baja presión, lo cual provoca un efecto de succión del aire circundante más frío de la zona abierta de la campana (Efecto Bernoulli). Sin embargo, el valor de 20,77% de  $O_2$  para el caso de 0% de  $H_2$  en función potencia en la mezcla se encuentra dentro del margen de error del valor de 20,92% de  $O_2$  para el caso de 15% de  $H_2$  en función potencia en la mezcla y viceversa, por lo cual se podría suponer que la cantidad de  $O_2$  se mantiene constante. Cabe precisar, como se mencionó en el Ítem 4.4, que la relación de equivalencia no se pudo mantener constante experimentalmente puesto que, al momento de realizar las pruebas, el controlador de flujo del aire presentó problemas, por lo que no se pudo ingresar exactamente el flujo volumétrico de aire calculado en el Ítem 3.2 para mantener la relación de equivalencia constante, y producto de ello, la cantidad de oxígeno de los gases productos también se ve afectada.

En relación al  $CO_2$ , es posible ver en el Gráfico 5.34, en primer lugar, que la concentración de  $CO_2$  es mucho mayor en todo momento en el trabajo de Monzó que en éste. Aquello se explica debido a que Monzó utilizó GLP, con una composición de 60% de propano ( $C_3H_8$ ) y 38% de butano ( $C_4H_{10}$ ), en lugar de GN, cuya composición en este caso es prácticamente 100% metano ( $CH_4$ ). Por lo tanto, es bastante evidente que una combustión de GLP tiene muchos más átomos de carbono en los reactivos que puedan combinarse con oxígeno para formar  $CO_2$  en los productos, que una combustión de GN. En segundo lugar, en el Gráfico 5.34 también se observa que tanto en el trabajo de Monzó como en éste, disminuye la proporción de  $CO_2$  a medida que el porcentaje de hidrógeno aumenta en la mezcla, lo cual guarda relación con lo mencionado anteriormente, puesto que al disminuir la proporción de

un hidrocarburo y reemplazarlo con hidrógeno, disminuye la cantidad de carbono en los reactivos que puedan reaccionar con oxígeno para formar  $\text{CO}_2$ . Este resultado de disminución de  $\text{CO}_2$  a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta, coincide con el trabajo realizado por Chung-jen Tseng [35]. Ahora bien, el hecho de que se tenga una disminución de  $\text{CO}_2$  es importante puesto que una de las maneras más directas de mitigar el cambio climático es reducir la cantidad de dióxido de carbono que se libera a la atmósfera, ya que es el principal gas de efecto invernadero.

En relación al  $\text{CO}$ , se puede observar en el Gráfico 5.35 que en este trabajo el  $\text{CO}$  tiene un comportamiento en el que aumenta para los primeros porcentajes de  $\text{H}_2$  en función potencia de la mezcla, y luego se mantiene relativamente constante para los siguientes porcentajes de  $\text{H}_2$  en función potencia de la mezcla. En cambio, en el trabajo de Monzó existe una disminución a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Resulta curioso que la concentración de  $\text{CO}$  haya resultado mayor en este trabajo que en el de Monzó, ya que, como se mencionó anteriormente, el combustible GLP tiene una cantidad muchísimo mayor de átomos de carbono en los reactivos que puedan reaccionar con oxígeno de manera incompleta para formar  $\text{CO}$ , que en el caso del combustible GN. No obstante, en el Gráfico 5.34 se puede observar que el trabajo de Monzó obtuvo como concentración de  $\text{CO}_2$  una cantidad notoriamente mayor que en la obtenida en este trabajo. Por lo tanto, se puede explicar que en el trabajo de Monzó, gran parte del carbono de los reactivos pasó de la primera reacción  $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$  a la segunda reacción de  $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ , mientras que en este trabajo se produjo lo inverso, es decir, la gran mayoría del carbono no logró llegar a la segunda reacción. Este resultado es contradictorio puesto que en este trabajo se utilizó una relación de equivalencia menor y, en consecuencia, un mayor flujo de aire, lo que trae consigo una mayor cantidad de moléculas de oxígeno que permiten tener una combustión completa. Por lo tanto, se puede afirmar que una combustión con exceso de aire es una condición necesaria pero no suficiente para tener combustión completa. Otro factor indispensable para tener combustión completa es que los gases se mezclen eficientemente con el aire, de hecho, se debe promover turbulencia intensa para que las moléculas de oxígeno en el aire se encuentren con todo el carbono y el hidrógeno de los reactivos para producir solo dióxido de carbono y vapor de agua en los productos respectivamente. No obstante,

resulta curioso también que no se haya generado una mezcla eficiente dado que un quemador de medios porosos inertes propicia precisamente aquello [27].

Con respecto al  $H_2$ , es posible ver en el Gráfico 5.36 que, tanto en este trabajo como en el de Monzó, a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta, la cantidad en ppm de  $H_2$  también aumenta (aunque en el trabajo de Monzó, el aumento en ppm de  $H_2$  es mucho más lineal que el resultado de este trabajo). Una explicación a este fenómeno puede deberse a una filtración de hidrógeno sin quemar por los bordes del quemador, puesto que no existe una muy buena hermeticidad en la zona de la unión en la que se encuentra el aislante térmico. Esto ocurre también porque no se tuvo el tiempo suficiente para que las moléculas de oxígeno del aire se mezclaran correctamente con el hidrógeno para producir vapor de agua como resultado de combustión en los productos.

Por último, en lo que respecta a los hidrocarburos (HC), se puede observar en el Gráfico 5.37 que los HC disminuyen a medida que el porcentaje de  $H_2$  en la mezcla aumenta. Para explicar la aparición de estos componentes se debe entender primeramente que la reacción de combustión completa del metano con hidrógeno y aire, la cual produce únicamente en los productos  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  y  $O_2$  (en caso de tener exceso de aire) es simplemente una reacción global, esto quiere decir que previamente a ese resultado, se generan una gran cantidad de reacciones intermedias en cadena (que duran milisegundos), las cuales se caracterizan por tener una gran cantidad de radicales libres. Por lo tanto, si no se dan las condiciones propicias para tener combustión completa, dichas reacciones intermedias en cadena no se completan y se termina obteniendo hidrocarburos y otros componentes como productos de combustión incompleta. Como ya se ha señalado, incluso usando una relación de equivalencia baja, es decir, usando un flujo de aire alto, aun así, se obtuvo resultados de combustión incompleta, en donde se produjeron una cantidad considerablemente alta de HC. Por lo tanto, pudo haber ocurrido que en estas reacciones intermedias no se produjo el calor (energía de activación) suficiente para seguir desarrollándose las reacciones en cadena, o que, debido a un mezclado insuficiente, los radicales de hidrocarburos no lograron encontrarse con el oxígeno para que la reacción en cadena pudiese seguir desarrollándose hasta llegar a la reacción global. No obstante, este resultado contradice un poco las propiedades de un MPI, ya que un quemador de este tipo produce temperaturas superadiabáticas debido al efecto del exceso de entalpía y también se caracterizan por propiciar mezclas eficientes entre el combustible y el oxidante.

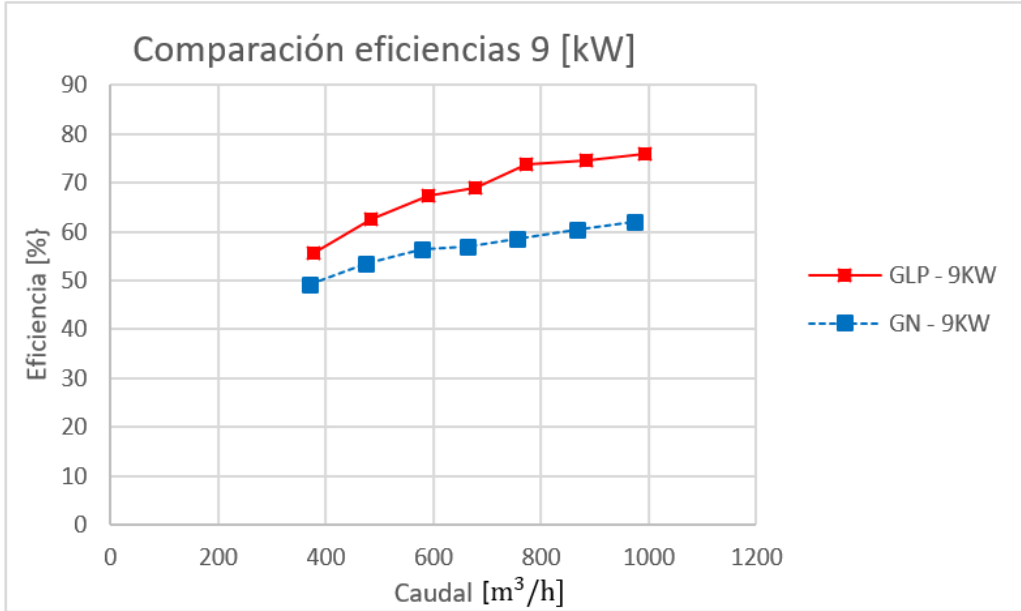
### 5.3 Análisis teórico de adición de hidrógeno a GAC (modo directo)

En este apartado se analizará teóricamente el efecto que tendría la adición de hidrógeno en la eficiencia térmica de un generador de aire caliente de modalidad directa en cuyo interior posee un quemador MPI.

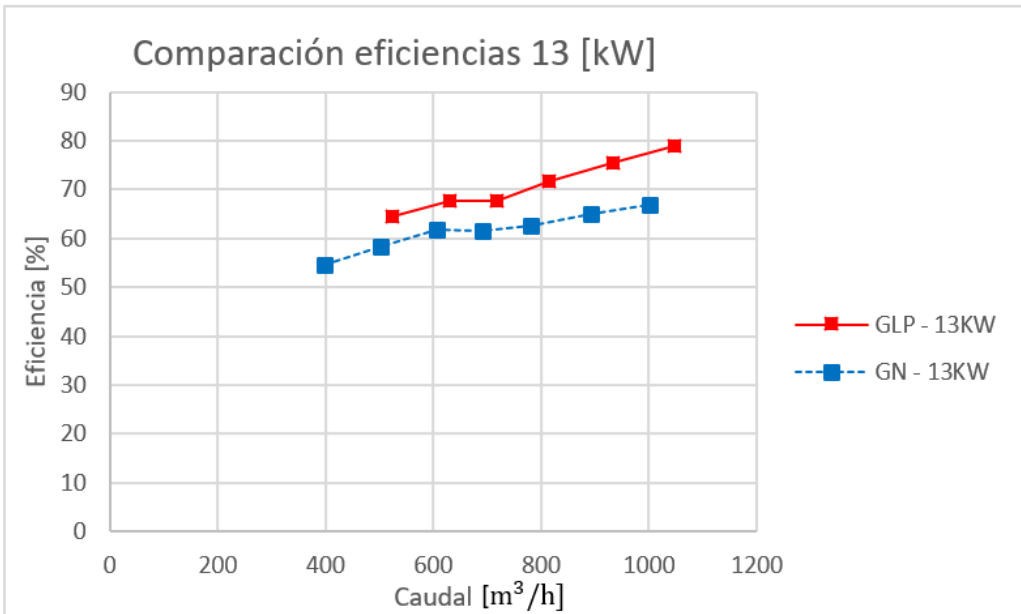
Hasta el momento existen dos investigaciones efectuadas con el equipo: una operando con gas licuado de petróleo y la otra operando con gas natural. Por lo tanto, los Gráficos 5.38, 5.39 y 5.40 presentan una comparación entre la eficiencia térmica del equipo obtenida operando con GLP y GN a una potencia fija de 9 [kW], 13 [kW] y 18 [kW] respectivamente. Es bastante evidente que el equipo consigue mayores eficiencias operando con GLP que con el GN para las tres potencias trabajadas. Por lo tanto, surge la pregunta de qué sucedería con las eficiencias térmicas del equipo si se le añade hidrógeno tanto al GN como al GLP por separado.

La información obtenida en este trabajo y en el de Monzó resultó en que añadir hidrógeno en un quemador MPI usando GN y GLP por separado provoca un aumento generalizado de la temperatura del quemador incluso manteniendo la potencia fija, que en el caso de este trabajo fue de 3 [kW] y en el de Monzó fue de 6 [kW].

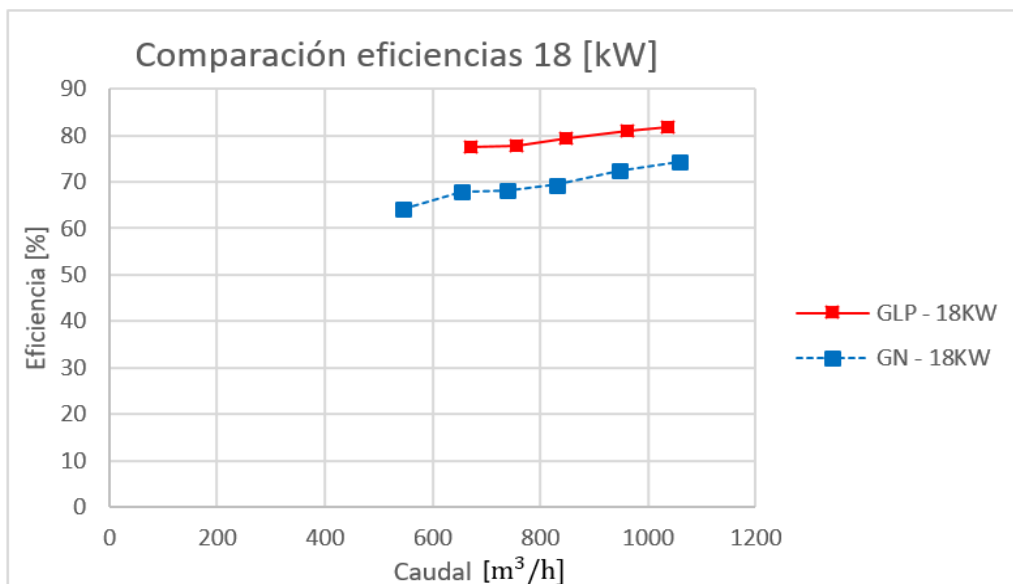
Como lo señala la ecuación (13), si la potencia es fija y se usa el mismo flujo de aire de secado, la eficiencia solo dependería de la diferencia de temperatura entre el flujo de aire de secado a la salida ( $T_s$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), lo que se conoce como salto térmico. Ahora bien, las mediciones de temperaturas que se realizaron en este trabajo y en el de Monzó, corresponden a temperaturas superficiales del quemador MPI (medición pirómetros) y de los gases productos de combustión (termocuplas) a una distancia muy cercana al MPI. Por consiguiente, no se puede concluir directamente que este aumento de temperatura del quemador MPI generaría un aumento de la temperatura del flujo de aire de secado a la salida, lo cual generaría un mayor salto térmico y, por lo tanto, una mayor eficiencia térmica, puesto que aquello depende de qué tan bien se transfiere el calor de los gases de combustión al flujo de aire de secado, lo que lo convierte en un asunto de qué tan bien está diseñado el equipo para optimizar al máximo dicha transferencia de calor.



**Gráfico 5.38** Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 9 [kW] de potencia.



**Gráfico 5.39** Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 13 [kW] de potencia.



**Gráfico 5.40** Comparativa de eficiencia térmica en GAC (Directo) operando con GLP y GN a 18 [kW] de potencia.

A continuación, se realizará una comparación del índice de Wobbe para cuatro casos de configuraciones de combustible distintas; correspondientes a las dos investigaciones que se han hecho con el GAC, la investigación de Cristóbal Monzó y la investigación efectuada en este trabajo. Se utilizará exactamente la misma composición en volumen de combustible que se usó en cada investigación.

Se puede ver desde la Tabla 5.18 a la Tabla 5.21, el resultado del índice de Wobbe para las cuatro configuraciones de combustible en análisis. Lo primero que se puede observar es que el índice de Wobbe disminuye al agregar hidrógeno a un combustible, tal como lo señala la investigación de Klaus Altfeld y Dave Pinchbeck [32]. También se observa que el caso de operación solo con GN y el caso de operación de GN + H<sub>2</sub>, ambos se encuentran en la segunda familia del índice de Wobbe, por lo cual estos combustibles son intercambiables. Para el caso de operación con GLP, se tiene un valor de índice de Wobbe que lo sitúa en la tercera familia, y para el caso de operación con GLP + H<sub>2</sub>, se tiene un valor que lo sitúa entre la segunda y tercera familia.

Resulta curioso que exista una considerable diferencia entre el índice de Wobbe del gas natural y el del gas licuado de petróleo, pero que aun así el equipo generador de aire caliente haya podido operar con normalidad con ambos combustibles, lo cual indica que es un equipo con una gran versatilidad.

**Tabla 5.18** Índice de Wobbe caso solo con gas natural.

1° Caso	GN	
Composición (CH4)	100%	[%]
H_sup_GN	39.744	[kJ/Nm3]
Densidad_rel_GN	0,55	[-]
Wobbe_GN	53,4	[MJ/Nm3]

**Tabla 5.19** Índice de Wobbe caso mezcla de gas natural con hidrógeno.

2° Caso	GN + H2	
Composición (GN) (CH4)	63,2%	[%]
Composición (H2)	36,8%	[%]
H_sup_GN+H2	29.811	[kJ/Nm3]
Densidad_rel_GN+H2	0,38	[-]
Wobbe_GN+H2	48,6	[MJ/Nm3]

**Tabla 5.20** Índice de Wobbe caso solo con gas licuado de petróleo.

3° Caso	GLP	
Composición (C3H8)	40%	[%]
Composición (C4H10)	60%	[%]
H_sup_GLP	116.073	[kJ/Nm3]
Densidad_rel_GLP	1,81	[-]
Wobbe_GLP	86,2	[MJ/Nm3]

**Tabla 5.21** Índice de Wobbe caso mezcla de gas licuado de petróleo con hidrógeno.

4° Caso	GLP+ H2	
Composición (GLP)	42,1%	[%]
Composición (GLP) (C3H8)	60%	[%]
Composición (GLP) (C4H10)	38%	[%]
Composición (H2)	57,9%	[%]
H <sub>sup</sub> _GLP+H2	52.784	[kJ/Nm3]
Densidad <sub>rel</sub> _GLP+H2	0,75	[-]
Wobbe <sub>GLP+H2</sub>	61,1	[MJ/Nm3]

## 6. Conclusiones

Se lleva cabo una investigación experimental de gas natural con hidrógeno en un quemador de medio poroso inerte, analizando temperaturas, gases de combustión y eficiencia del proceso.

A través de la investigación efectuada en el marco teórico de este trabajo, fue posible constatar que la tecnología de los quemadores de medios porosos inertes (MPI) tiene una extendida lista de ventajas, donde las primordiales son: reducir emisiones contaminantes, propiciar mejores mezclas entre aire-combustible y mejorar la eficiencia térmica. Además, esta tecnología se caracteriza por tener una gran diversidad de aplicaciones, tales como en quemadores de cocina, en síntesis de hidrógeno, en celdas de combustible, en turbinas, etc. Por otro lado, también se indagó y se presentó en el marco teórico las propiedades más importantes de los dos combustibles utilizados experimentalmente en este trabajo (hidrógeno y gas natural), así como su uso en el mundo y su uso en Chile. También, se expuso el estado del arte de la mezcla entre hidrógeno con gas natural. Por último, se presentó un equipo generador de aire caliente y sus principales características.

Fue posible llevar a cabo la implementación de un sistema de medición y control de gas natural, hidrógeno y aire, en donde las líneas de combustible contaron con un suministro en tanques cilíndricos y la línea del aire contó con un compresor de aire. Además, cada línea contó con un controlador de flujo digital para poder ingresar los flujos volumétricos (caudales) calculados previamente en el Ítem 3.2. Asimismo, fue posible llevar a cabo un registro de temperatura usando dos instrumentos: termocuplas y pirómetros. Las termocuplas permitieron medir la temperatura de los gases productos de combustión, y con ello poder posteriormente calcular el calor generado por convección. Los pirómetros permitieron medir la temperatura superficial del quemador MPI, y con ello poder posteriormente calcular el calor generado por radiación. Y en cuanto al registro de gases contaminantes, fue posible contar con un analizador de gases TESTO-350, en donde se enfatizó en el registro de gases como el CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC y H<sub>2</sub>.

Las pruebas en el laboratorio se desarrollaron manteniendo fija la potencia del quemador en un valor de 3 [kW], ya que este valor se acomodó al rango de trabajo del compresor de aire. También se mantuvo la relación de equivalencia ( $\phi$ ) en un valor cercano a 0,65, ya que en

dicho valor fue posible obtener una llama confinada en el quemador MPI, lo que demuestra la característica de esta tecnología de poder operar con mezclas pobres debido a la intensa transferencia de calor que se genera dentro de sí mismo [30]. Primeramente, se efectuaron mediciones con el quemador operando 100% con gas natural y 0% de hidrógeno. Luego, se fue aumentando gradualmente la concentración de hidrógeno en función potencia, en donde se llegó a un máximo de 15% de hidrógeno en potencia, lo que equivale a un 36.8% de hidrógeno en volumen. Se optó por esta metodología de trabajo para poder hacer comparaciones con el trabajo de Monzó, quien operó el mismo quemador, pero en lugar de utilizar una mezcla de gas natural con hidrógeno, utilizó una mezcla de gas licuado de petróleo con hidrógeno. No obstante, cabe mencionar que Monzó operó con una potencia de 6 [kW] y una relación de equivalencia ( $\phi$ ) cercana a un valor de 0,8.

En relación al efecto de la adición de hidrógeno en la temperatura del quemador, se pudo constatar una subida de temperatura en tres de los cinco puntos medidos. En los otros dos puntos, uno de ellos tuvo una disminución de temperatura y el otro permaneció relativamente constante. En el trabajo de Monzó se presentó un aumento de temperatura en los cinco puntos medidos. Por lo tanto, se podría concluir que, en un quemador MPI, al aumentar la concentración de hidrógeno en una mezcla, se tiene un aumento generalizado en su temperatura. Por otra parte, tanto el calor por radiación como el calor por convección calculado demostraron ser constantes a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta. Y en relación a la eficiencia térmica del quemador MPI, también se obtuvo un comportamiento constante a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumenta y, además, se obtuvieron valores sobre 87% de eficiencia para todas las composiciones.

Con respecto a los gases productos, primeramente, es preciso mencionar que se tuvo una disminución en la concentración de  $\text{CO}_2$  a medida que se aumenta la concentración de hidrógeno en la mezcla, lo cual es un resultado esperado puesto que el uso de la tecnología de los MPI y el reemplazo de un hidrocarburo por hidrógeno apuntan a una disminución de los gases productos como el  $\text{CO}_2$ . Aun así, se obtuvo un resultado sumamente bajo, lo cual podría explicarse debido a la distancia del sensor del analizador de gases con respecto a la superficie del quemador. Por lo tanto, para futuros experimentos, se recomienda posicionar al sensor a una distancia más próxima del quemador MPI. En cuanto al  $\text{CO}$ , se obtuvo un resultado inesperado, ya que se obtuvo una concentración considerable incluso operando con

una relación de equivalencia ( $\phi$ ) baja, es decir, con un gran exceso de aire, lo cual favorece la combustión completa y la ausencia de este contaminante. Además, los otros factores que promueven tener combustión completa es tener una mezcla eficiente de aire-combustible y temperaturas altas, donde un MPI precisamente propicia ambos factores mencionados. Asimismo, la aparición de una cantidad considerablemente alta de hidrocarburos no quemados, se explica también por la presencia de una combustión incompleta, lo cual, como se mencionó, resulta ser inusual dado las condiciones favorables a una combustión completa en la que se trabajó. Una explicación a este fenómeno puede deberse a que el quemador MPI ya ha perdido parte de su vida útil con los experimentos previos realizados con éste y, por consiguiente, se generan resultados inusuales e inesperados. En lo que respecta al  $H_2$ , se produjo un aumento y luego una pequeña caída tras aumentar la concentración de hidrógeno en la mezcla, lo que se explica debido a filtraciones de combustible en el conjunto del quemador MPI producto de carecer de una hermeticidad perfecta en la zona de la unión con el aislante térmico. Por último, con respecto al  $O_2$ , se produjo un ligero aumento a medida que el porcentaje de hidrógeno en la mezcla aumentaba, lo cual se puede explicar mediante el efecto Bernoulli que ocurrió en la campana al tener ésta un espacio abierto para que los pirómetros puedan ser apuntados directamente a la superficie del quemador MPI, sin embargo, los valores obtenidos se encasillan dentro del margen de error, por lo que la explicación del comportamiento obtenido podría ser inválida.

Por último, con los datos obtenidos experimentalmente en este trabajo, no fue posible llevar a cabo una evaluación teórica sobre qué ocurriría con la eficiencia de un generador de aire caliente (que funciona con un MPI) al añadirle hidrógeno a su operación con gas natural, ya que los datos obtenidos de temperatura no son directamente aplicables en el equipo en cuestión.

## 7. Bibliografía

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability,» 2022.
- [2] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «Climate Nasa,» 14 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://climate.nasa.gov/causes/>.
- [3] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «Climate Nasa,» 14 Abril 2023. [En línea]. Available: [https://climate.nasa.gov/climate\\_resources/24/graphic-the-relentless-rise-of-carbon-dioxide/](https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/graphic-the-relentless-rise-of-carbon-dioxide/).
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Cambio climático 2021 Bases físicas,» 2021.
- [5] H. Ritchie, M. Roser y P. Rosado, «Our World in Data,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>.
- [6] W. L. Jolly, «Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrogen/Production-and-applications-of-hydrogen>.
- [7] World Energy Council, «World Energy,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEInsights-Brief-New-Hydrogen-economy-Hype-or-Hope-ExecSum.pdf>.
- [8] International Energy Agency (IEA), «The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities,» 2019.
- [9] Y. A Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, McGraw-Hill, 2011.

- [10] L. Pérez, «SinerHy Hydrogen Experts,» 10 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>.
- [11] M. Cimenti y J. M. Hill, «Direct Utilization of Liquid Fuels in SOFC for Portable Applications: Challenges for the Selection of Alternative Anodes,» *Energies*, pp. 377-410, 2009.
- [12] International Energy Agency (IEA), «Global Hydrogen Review 2022,» 2022.
- [13] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green Hydrogen For Industry: A guide to policy making,» Abu Dhabi, 2022.
- [14] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable Power Generation Costs in 2021,» Abu Dhabi, 2022.
- [15] Generadoras de Chile, «Generadoras de Chile,» 2022. [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>.
- [16] R. Rondanelli, A. Molina y M. Falvey, «The Atacama Surface Solar Maximum,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 405-418, 2015.
- [17] C. Vilches, «Biblioteca Digital CIREN,» mayo 2020. [En línea]. Available: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/33019>.
- [18] Ministerio de Eenergía, Gobierno de Chile, «Estrategia Nacional Hidrógeno Verde,» 2020.
- [19] L. H. Solomon, G. I. Atwater y J. E. Carruthers, «Britannica,» 17 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/natural-gas>.
- [20] W. W. Abu Bakar y R. Ali, «Natural Gas,» *IntechOpen*, 2010.

- [21] S. Mokhatab, W. A. Poe y J. Y. Mak, *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices*, Elsevier.
- [22] Sapphire Gas Solutions, «Sapphire Gas Solutions,» 15 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.sapphiregassolutions.com/blog/fuel-comparisons/cng-vs-lng-understanding-two-common-types-of-natural-gas/>.
- [23] International Energy Agency, «Gas Market Report, Q3-2022,» 2022.
- [24] Fundación Gasco, «GascoEduca,» [En línea]. Available: [http://www.gascoeduca.cl/Maqueta/gas\\_04.html](http://www.gascoeduca.cl/Maqueta/gas_04.html).
- [25] Generadoras de Chile, «generadoras,» 13 marzo 2022. [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/prensa/ataque-ruso-los-efectos-de-la-fuerte-alza-global-del-gas-para-chile-y-la-oportunidad-que-abre-la-crisis-energetica-europea>.
- [26] N. G. Bernal, *Antecedentes del mercado de gas residencial en Chile*, 2021.
- [27] A. Banerjee y D. Paul, «Developments and applications of porous medium combustion: A recent review,» *Energy*, vol. 221, 2021.
- [28] P. Bouma y L. de Goey, «Premixed combustion on ceramic foam burners,» *Combustion and Flame*, vol. 119, pp. 133-143, 1999.
- [29] W. M. Mathis y J. L. Ellzey, «Flame Stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner,» *Combustion Science and Technology*, vol. 175, pp. 825-839, 2010.
- [30] M. M. Kamal y A. A. Mohamad, «Combustion in porous media,» *Institution of MECHANICAL ENGINEERS*, vol. 220, 2006.

- [31] T. Takeno, K. Sato y K. Hase, «A theoretical study on an excess enthalpy flame,» *Symposium (International) on Combustion*, vol. 18, n° 1, pp. 465-472, 1981.
- [32] K. Altfeld y D. Pinchbeck, «Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems,» *gwf Gas+Energie*, 2013.
- [33] C. Tung Chong y J.-H. Ng, «Chapter 4 - Combustion performance of biojet fuels,» de *Biojet Fuel in Aviation Applications*, Elsevier, 2021, pp. 175-230.
- [34] R. Vásquez Torres, P. Tello Guerra, J. Fuster Justiniano, R. Farías Hermosilla, E. Espinoza Cáceres y N. Machuca Lazo, «Inyección de hidrógeno en redes de gas natural,» Santiago de Chile, 2021.
- [35] C.-j. Tseng, «Effects of hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner,» Elsevier, 2002.
- [36] C. Hernández Recabarren, C. Rosson Alegría y M. Toledo Torres, «Diseño y análisis de rendimiento de un innovador generador de aire caliente de tipo dual que incorpora un quemador de medio poroso inerte,» de *Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madrid, 2022.
- [37] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), «United Nations Climate Change,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.
- [38] M. Kanoglu, Y. Cengel y J. Cimbala, *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*, Mc Graw Hill, 2020.

## **8. Anexos**

1. [Planilla de cálculo previo a experimentos](#)
2. [Planilla de resultado de mediciones](#)
3. [Planilla de cálculo de flujos de calor](#)
4. [Planillas de resultados en bruto](#)
5. [Bitácora](#)
6. [Planilla de cálculo de índice de Wobbe](#)
7. [Especificaciones técnicas del gas natural utilizado](#)
8. [Ficha técnica analizador de gases TESTO-350](#)