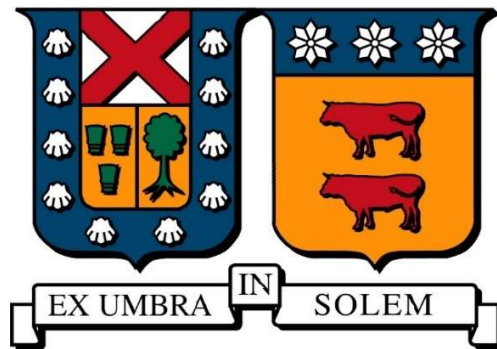


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



“AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE QUEMADOR RADIATIVO PARA USO EN HORNOS INDUSTRIALES”

MATÍAS HERNÁN PÉREZ VEGA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES

PROFESOR CO-REFERENTE: DR. RER NAT HERNÁN OLGUÍN ASTUDILLO

VALPARAÍSO

OCTUBRE 2022



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Automatización y control de quemador radiativo para uso en hornos industriales

Nombre del candidato(a): Matías Hernán Pérez Vega

Carrera / Grado: Ingeniería Mecánica Industrial

Campus: ; Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario Toledo Torres, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 29/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/09/2025

; Firma:

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

BIB-FG2385_01

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia que estuvo siempre a mi lado apoyándome en todo momento. Mis padres Urbano y María, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida entregándome la educación y valores necesarios para llegar a ser la persona que soy hoy en día.

Agradezco al profesor Mario Toledo por darme la oportunidad y la confianza para terminar mi trabajo de título.

Finalmente, gracias a QUEMPIN, a cada uno de ustedes, por su apoyo durante estos años de trabajo, por la oportunidad de poder aportar al desarrollo de nuevas tecnologías más limpias y eficientes y ponerlas al servicio de la gente.

Resumen

El presente trabajo de investigación desarrolla la automatización, control e implementación de un quemador radiativo a gas en la cámara de combustión de un horno industrial usando la tecnología de combustión en medios porosos inertes (MPI), con el objetivo de cumplir con la normativa requerida para su certificación.

Para desarrollar la implementación se cuenta con un horno industrial MAIGAS tipo Siam, el cual corresponde a un horno de tubos anulares de 5 m² con una cámara de combustión de 3,06 m³ (0,9 x 2,2 x 1,55 m) y una superficie de colección mediante “techos activos” de 35 m², ubicado en almacén Villa Monte, calle Los Guindos n° 10, en el sector de Agua Santa, Viña Del Mar.

Se estudian las características del horno para estimar el aporte térmico necesario en el proceso. Con esto, se diseña y fabrica un quemador de medios porosos de potencia máxima 60 kW, dimensionado para operación a 45 kW, el cual es caracterizado mediante pruebas experimentales de laboratorio donde se evalúa la tasa radiativa, temperatura del MPI y emisiones de gases en un rango de operación entre 12 y 48 kW, equivalente a tasas de quemado entre 500 y 2000 kW/m² aproximadamente. Dichas pruebas buscan verificar que el desempeño del quemador es el adecuado para una implementación segura. Posteriormente, se desarrolla la automatización del quemador de acuerdo a los requerimientos especificados en la Norma chilena NCh3111 (Of. 2007) “Quemadores de aire forzado que utilizan combustible gaseoso”, cuyo cumplimiento hace accesible la certificación del equipo ante la SEC, lo cual permite su comercialización y uso. Para la automatización del quemador, se incorpora, entre otros sistemas, una llama piloto, detector de llama por ionización, chispero de ignición, electroválvulas monobloc y piloto, presóstatos de gas y aire, y un dispositivo controlador de llama electrónico comercial.

Glosario

Abreviaturas

EPP Elementos de protección personal.

ERC Energía renovable convencional.

GLP Gas licuado de petróleo.

MPI Medio poroso inerte.

Ppm Partes por millón.

Sub índices y super índices

aire Aire.

comb Combustible.

e Condición estequiométrica.

Especies Químicas

Al_2O_3 Óxido de aluminio o alúmina.

C_3H_8 Propano.

C_4H_{10} Butano.

CO Monóxido de carbono.

.....

CO_2 Dióxido de carbono.

N_2 Nitrógeno.

NO_x Óxidos de nitrógeno, corresponde a combinación de NO y NO^2 .

O_2 Oxígeno.

Nomenclatura

A	Área.
C_p	Calor específico.
K	Coeficiente de conductividad térmica.
α	Coeficiente lineal de dilatación térmica.
ρ	Densidad
η	Eficiencia.
γ	Fracción volumétrica de un elemento.
l	Longitud.
m	Masa.
MP	Material particulado.
n	Número de moles.
Pe	Número de Peclet.
p	Perímetro.
PM	Peso molecular.
ϵ	Porosidad.
$\dot{W}$	Potencia.
P	Presión.
FR	Tasa de quemado (“firing rate”).
T	Temperatura del elemento o componente i-ésimo.
S_L	Velocidad de llama laminar (“laminar speed”).
V	Volumen.

Índice General

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Glosario	3
Índice General	5
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	8
Índice de gráficos.....	9
1 Introducción y objetivos	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Objetivo general	11
1.3 Objetivos específicos	11
2 Marco teórico.....	12
2.1 Combustión en medios porosos inertes	12
2.2 Principio de funcionamiento	12
2.2.1 Zonas características.....	12
2.2.2 MPI versus Llama libre	14
2.2.3 Condiciones de operación	14
2.2.3.1 Parámetros.....	14
2.2.4 Modos de operación	15
2.3 Quemador radiante.....	18
2.3.1 Descripción.....	18
2.3.2 Parámetros de operación	19
2.3.3 Componentes.....	20
2.3.4 Marco legal.....	20
3 Diseño	21
3.1 Horno industrial	21
3.1.1 Características del Horno	21
3.2 Quemador radiante.....	23

3.2.1 Dimensionamiento previo	23
3.2.2 Diseño del quemador.....	23
3.2.3 Componentes del Quemador	24
3.2.4 Características componentes quemador	26
3.2.5 Automatización y control.....	34
3.2.6 Instrumentos de medición.....	43
3.2.7 Determinación de parámetros de operación	49
3.3 Configuración y funcionamiento automatizado	52
3.4 Caracterización del quemador.....	54
3.4.1 Pruebas de desempeño	54
3.5 Pruebas en terreno	56
3.5.1 Prueba de reconocimiento	56
3.5.2 Pruebas quemador	57
3.5.3 Análisis de gases	59
3.5.4 Cocción de pan.....	60
4 Procedimiento experimental.....	61
4.1 Procedimientos generales	61
4.1.1 Elementos de seguridad	61
4.1.2 Detección de fugas	61
4.1.3 Puesta en marcha del quemador.....	62
4.1.4 Detención del quemador	63
4.2 Caracterización del quemador.....	63
4.2.1 Pruebas de desempeño	63
4.3 Pruebas en terreno	65
4.3.1 Prueba de reconocimiento	65
5 Resultados	66
5.1 Caracterización del quemador.....	66
5.1.1 Pruebas de desempeño	66
5.2 Pruebas en terreno	73
5.2.1 Temperatura horno.....	73
5.2.2 Análisis de gases	75

6	Análisis y conclusiones.....	76
6.1	Quemador radiante.....	76
7	Referencias.....	78
8	Anexos	79
8.1	Anexo1: Matriz de pruebas – Desempeño del quemador	79
8.2	Anexo1: Matriz de pruebas – Análisis de gases.....	79

Índice de Figuras

Figura 1:	Estructura del medio poroso.....	12
Figura 2:	Zonas en proceso de combustión MPI.....	13
Figura 3:	Esquema fenómeno exceso de entalpia.	13
Figura 4:	Esquema modo de operación en MPI.	16
Figura 5:	Esquema modo de operación inestable en MPI.	17
Figura 6:	Dimensiones horno tubos anulares	22
Figura 7:	Vista frontal horno.....	22
Figura 8:	Dimensiones Quemador MPI.	23
Figura 9:	Esquema componentes quemador.....	25
Figura 10:	MPI del quemador	26
Figura 11:	Trampa de llama + medio poroso	27
Figura 12:	Trampa de llama mas MPI.....	27
Figura 13:	Aislante contorno trampa de llama	28
Figura 14:	Cabezal de combustión.....	30
Figura 15:	Montaje cabezales al manifold.	30
Figura 16:	Ventilador de premezcla.....	31
Figura 17:	Venturi de inyección.....	31
Figura 18:	Regulador de presión.....	32
Figura 19:	Manifold distribución flujo de aire	33
Figura 20:	Controlador de llama siemens.....	35
Figura 21:	Diagrama de conexiones controlador de llama.....	35
Figura 22:	Válvula piloto solenoide.....	36
Figura 23:	Tubo piloto	37
Figura 24:	Electrodo de ignición.....	38
Figura 25:	Transformador y cables de alta tensión.	39
Figura 26:	Válvula monobloc Dungs	40
Figura 27:	Presostato de aire Dungs.....	41
Figura 28:	Electrodo de ionización.....	42

Figura 29: Control de velocidad del ventilador.....	43
Figura 30: Rotámetro itron.....	44
Figura 31: Pirómetro Impac	45
Figura 32: Voltímetro digital.....	46
Figura 33: Termocupla tipo K.....	47
Figura 34: Analizador de gases Boston.....	47
Figura 35: Detector de fugas.....	48
Figura 36: Medición flujo de aire.....	51
Figura 37: Medición RPM ventilador.....	51
Figura 38: Secuencia de trabajo del quemador, desempeñada por el controlador Siemens.....	53
Figura 39: Pruebas de desempeño en laboratorio.....	55
Figura 40: Instalación termocuplas cámara de cocción.....	56
Figura 41: Instalación termocuplas cámara de combustión.....	57
Figura 42: Implementación quemador cámara de combustión.....	58
Figura 43: Medición de gases.....	60

Índice de Tablas

Tabla 1: Especificaciones horno.....	21
Tabla 2: Dimensiones Quemador MPI.....	24
Tabla 3: Sistemas principales quemador.....	24
Tabla 4: Características MPI.....	27
Tabla 5: características trampa de llama	28
Tabla 6: Características papel aislante	29
Tabla 7: Características del ventilador de premezcla.....	32
Tabla 8: Características regulador.....	33
Tabla 9: Características Válvula Brahma para llama piloto.....	36
Tabla 10: Características Válvula monobloc.....	40
Tabla 11: Características presostato Dungs	41
Tabla 12: Especificaciones técnicas rotámetro.....	44
Tabla 13: Especificaciones técnicas Datalogger omega.....	45
Tabla 14: Especificaciones voltímetro.....	46
Tabla 15: Especificaciones técnicas termocupla tipo K.....	47
Tabla 16: Especificaciones técnicas analizador de gases	48
Tabla 17: Propiedades del GLP.....	49
Tabla 18: Propiedades del aire de combustión.....	50
Tabla 19: Especificaciones secuencia de trabajo.....	53
Tabla 20: Resultados prueba laboratorio.....	67
Tabla 21: Emisiones GP obtenidas en la medición	75

Índice de gráficos

Gráfico 1: Temperatura y exceso de aire a 500 kW/m ²	68
Gráfico 2: Temperatura y exceso de aire a 1000 kW/m ²	68
Gráfico 3: Temperatura y exceso de aire a 1500 kW/m ²	69
Gráfico 4: Temperatura y exceso de aire a 2000 kW/m ²	69
Gráfico 5: Tasa radiativa vs relación de aire a 500 kW/m ²	70
Gráfico 6: Tasa radiativa vs relación de aire a 1000 kW/m ²	70
Gráfico 7: Tasa de radiativa vs relación de aire a 1500 kW/m ²	71
Gráfico 8: Tasa radiativa vs relación de aire a 2000 kW/m ²	71
Gráfico 9: Punto de operaciones estudiados.....	72
Gráfico 10: Tasa radiativa vs relación de aire a diferentes tasas de quemado	72
Gráfico 11: Perfil temperaturas pisos de horno.....	73
Gráfico 12: Temperaturas cámara de cocción.....	74

1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Chile es el mayor consumidor de pan en latinoamérica y el segundo a nivel mundial después de Alemania. En promedio, el chileno come 250 gramos al día, lo que equivale a más de 90 kilos anuales. Esto representa cerca del 2 por ciento de la canasta familiar del Índice de Precios al Consumidor (IPC), siendo preferido principalmente por los estratos socioeconómicos bajos y medios-bajos del país (SERNAC, 2015). Las panaderías tradicionales chilenas suelen utilizar la combustión de leña mayoritariamente para su producción. Es justamente esta modalidad de cocción, de bajo costo versus el uso de gas o petróleo, la que permite mantener los niveles productivos para dar abasto a la alta demanda nacional. No obstante, este sistema es poco eficiente y provoca altos niveles de contaminación atmosférica ya que, generalmente, la leña se encuentra húmeda, lo cual provoca pérdidas de temperatura al evaporarse el agua, el cual dependerá del tipo de madera que se utilice. Para quemar los gases y humos que son perjudiciales para la salud, es importante que la combustión de la leña alcance sobre los 800°C (Celsius) [1]. Por ejemplo, un árbol recién cortado y que contiene una importante cantidad de agua, el porcentaje de humedad varía dependiendo de la época del año, la región de procedencia y la especie forestal. En consecuencia, su poder calorífico, es decir la cantidad de energía que se aprovecha en la combustión de la leña, va depender de la suma entre la cantidad de agua contenida y la densidad de su madera (Ministerio de Energía, 2013). Ante esto, la Federación Chilena de Industriales Panaderos (FECHIPAN) firmaron un Acuerdo de Producción Limpia (APL) con el Gobierno el año 2015, con el objetivo de lograr cinco grandes cambios para mejorar la industria del pan en un plazo de 24 meses. Ellos se comprometieron a reducir el uso de la sal (10%), agua (5%), el consumo energético (3%), los vertidos en rellenos sanitarios (20%) y los contaminantes atmosféricos en un (5%). Esto, según el Consejo Nacional de Producción Limpia, le permitiría a la industria panadera ahorrar más de 100 millones de pesos en costos de producción (Acuerdo de Producción Limpia, 2015)

1.2 Objetivo general

En el marco del proyecto Impacta Energía denominada “Quemadores de medios poroso para panaderías eficientes”, el presente trabajo tiene como objetivo general la automatización y control de quemador radiativo para su uso en hornos industriales.

1.3 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema de automatización y control para un quemador radiativo que considere el control de flujos y temperaturas, y la normativa de seguridad.
2. Fabricar componentes requeridos, y caracterizar parámetros de operación.
3. Implementar y poner en marcha el sistema diseñado y quemador en cámara de combustión de horno industrial.
4. Realizar pruebas en terreno, y verificar el cumplimiento de normativa para su certificación.

2 Marco teórico

2.1 Combustión en medios porosos inertes

La combustión en medios porosos inertes (MPI), también conocida como combustión filtrada, es un proceso en donde se inserta un medio sólido poroso químicamente inerte en la zona de combustión. El flujo de la mezcla aire-combustible es conducido a través de los poros del material, cómo se ilustra en la figura 1.

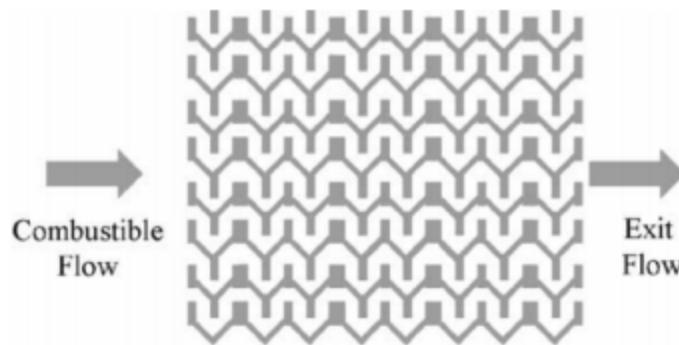


Figura 1: Estructura del medio poroso.

2.2 Principio de funcionamiento

2.2.1 Zonas características

Durante un proceso de combustión en medios porosos, podemos identificar tres zonas características. Primero, tenemos la zona aguas arriba del frente de llama (antes del frente, siguiendo la dirección del flujo), donde la mezcla aire-combustible es precalentada por el medio poroso a alta temperatura [3].

Luego, se encuentra la zona donde se desarrolla la reacción de combustión y se ubica el frente de llama, lugar donde se libera una gran cantidad de energía, la cual es absorbida por el medio poroso mediante convección. Este calor es transferido mediante radiación y convección hacia la mezcla fresca, precalentándola y generando un fenómeno conocido como exceso de entalpía, caracterizado por permitir alcanzar temperaturas superiores a la temperatura adiabática en la zona de combustión.

Finalmente, se encuentra la zona de postcombustión, en la cual los gases producto de la combustión fluyen hacia el exterior y transfieren calor por convección al medio poroso, generando una recirculación de calor [4].

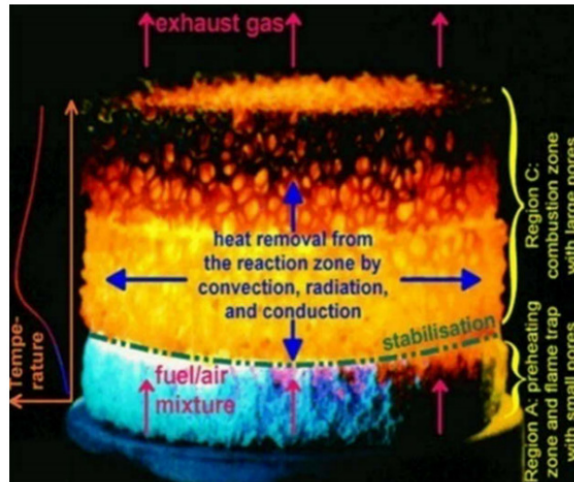


Figura 2: Zonas en proceso de combustión MPI.

Debido a la eficiencia ocasionada por la recirculación de calor y el precalentamiento de la mezcla aire-combustible, se logra alcanzar temperaturas superadiabáticas en la zona de combustión, lo que permite sustentar altas tasas de reacción. Esto se traduce en que los quemadores de MPI pueden trabajar con mezclas excesivamente ricas y/o pobres en combustible, mejorando la estabilidad de la llama e incrementando el rango de inflamabilidad.

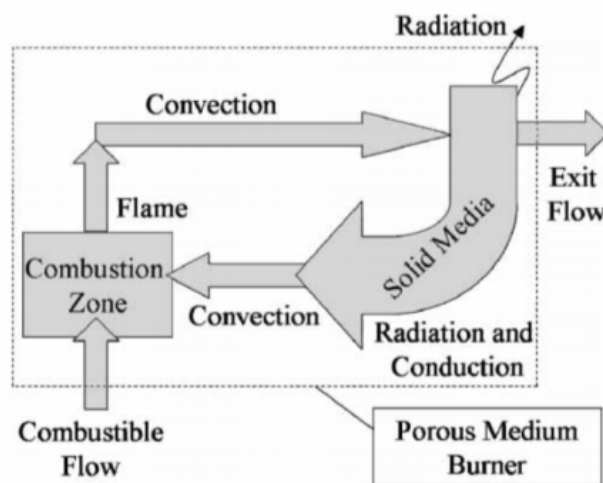


Figura 3: Esquema fenómeno exceso de entalpía.

2.2.2 MPI versus Llama libre

La combustión en MPI ofrece una gama de ventajas en comparación con la combustión convencional de llama libre principalmente gracias a la mejora en la eficiencia de la combustión y la reducción de emisiones de NOx.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor predominante en la combustión de llama libre, en donde la conductividad térmica de los gases es muy baja. Al incorporar un sólido en la zona de combustión, los cuales poseen una excelente conductividad térmica, se mejora la transferencia de calor global mediante radiación y conducción.

Las principales ventajas de combustión en MPI en comparación a llama libre son:

- Existe un control de la temperatura del frente de combustión provocando una disminución en la formación de NOx y CO.
- Alta capacidad térmica gracias al exceso de entalpía, propiciando una alta estabilidad térmica. De esta manera es posible quemar mezclas en un rango extenso $\phi=0,5-2,5$ para mezclas metano-aire.
- La alta estabilidad térmica permite amplios rangos de modulación (1:30) [5].
- Alta densidad de energía (cargas de energía sobre $3[\text{MW}/\text{m}^2]$) [6].

2.2.3 Condiciones de operación

Durante un proceso de combustión en MPI es fundamental reconocer los parámetros de operación y los diferentes modos de operación posibles.

2.2.3.1 Parámetros

Los parámetros que establecen y condicionan la combustión en MPI son:

- **Relación de equivalencia(ϕ):** Relación entre la cantidad de aire estequiométrica (teórica) y aire utilizado en la combustión.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

Se denominan condiciones estequiométricas ($\phi = 1$) cuando la cantidad de aire es igual al aire teórico necesario. Si la cantidad de aire es menor a la estequiométrica se habla de mezclas ricas o con exceso de aire ($\phi > 1$). Cuando la cantidad de aire es mayor a la estequiométrica se habla de mezclas pobres o falta de combustible ($\phi < 1$).

- **Velocidad de filtración premezcla:** La velocidad de filtración es la velocidad a la cual la mezcla combustible-oxidante circula por los poros del material dentro de la matriz. Se determina por la siguiente ecuación:

$$u = \frac{v}{\varepsilon} \quad (2)$$

- **Velocidad del frente de combustión:** Es la velocidad asociada a la propagación del frente de combustión a través de la matriz porosa y sus valores oscilan entre 10^{-5} y 10^{-4} [m/s] [4].
- **Material de la matriz porosa:** El material a utilizar en la combustión de MPI determina y condiciona en gran manera la combustión en función de sus distintas propiedades físicas y químicas tales como conductividad térmica, emisividad, tamaño del poro, porosidad, temperatura fusión, entre otras.

2.2.4 Modos de operación

Los modos de operación de la combustión de MPI son transiente o estacionario.

- a) **Estacionario:** En este régimen de combustión el frente de llama se estabiliza en una zona específica dentro de la estructura del material poroso, tal como se muestra en la figura 4. Las aplicaciones más utilizadas son quemadores radiantes y calentadores de superficie debido a la alta emisividad de radiación por parte del sólido.

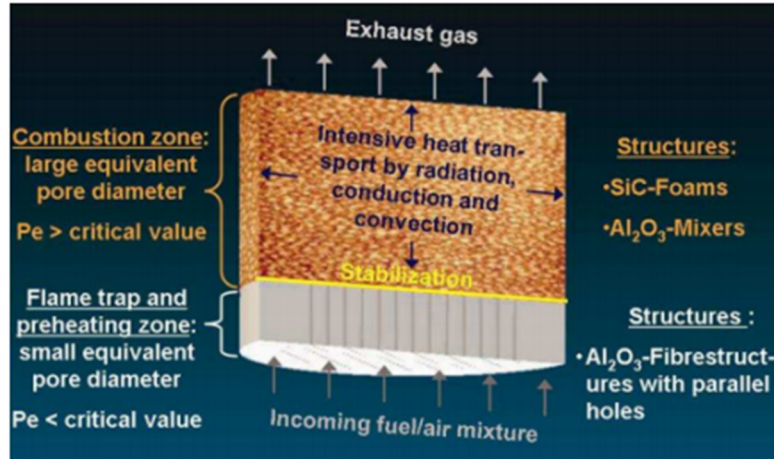


Figura 4: Esquema modo de operación en MPI.

La estabilidad de la llama dentro de la matriz porosa puede ser alcanzada bajo las siguientes técnicas:

- Enfriar cierta zona específica de la matriz en donde la propagación de la llama no es deseable o está prohibida.
- Numero de Peclet (Pe): Determina la zona de estabilización del frente de llama entre dos zonas: la de extinción de la llama que posee un diámetro de porosidad pequeño ($Pe < 65$) y la zona de combustión la cual posee un diámetro de porosidad mayor ($Pe > 65$). Para la oxidación de metano en MPI, $Pe=65$. La fórmula del número de Peclet es:

$$Pe = \frac{S_l * d_m * C_p * \rho}{k} \quad (3)$$

En donde

- S_l : Velocidad laminar de la llama.
- d_m : Diámetro equivalente del poro en material poroso.
- C_p : Calor específico de la mezcla de gas.
- ρ : Densidad de la mezcla gaseosa.
- k : Coeficiente de conductividad térmica de la mezcla.

b) **Transiente:** En este tipo de operación, el frente de combustión se propaga libremente a través del reactor como se observa en la figura 5. La dirección de propagación del frente de combustión puede ser aguas arriba (contrario a la dirección del flujo de combustible) o aguas abajo (misma dirección del flujo de combustible).

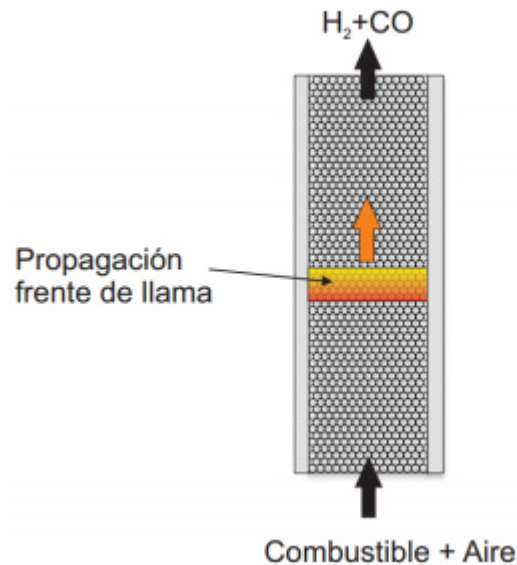


Figura 5: Esquema modo de operación inestable en MPI.

Los parámetros que determinan la velocidad de propagación del frente de combustión son

- Radio de equivalencia (ϕ)
- Tipo de Combustible
- Temperatura
- Presión del combustible
- Propiedades físicas y térmicas del material poroso inerte.

En este modo de operación, la cantidad de transferencia de calor para precalentar la premezcla que ingresara al reactor es mayor que en el estado estacionario alcanzado un efecto super adiabático.

2.3 Quemador radiante

2.3.1 Descripción

Los quemadores de superficie radiante es una aplicación particular del proceso de combustión en MPI, donde se estabiliza el frente de combustión en una matriz porosa, la cual es calentada a altas temperaturas debido a la liberación de entalpía producto de la combustión, emitiendo una alta radiación térmica.

El calor liberado es utilizado para algún tipo de aplicación o proceso térmico.

En estos equipos se obtiene una alta estabilidad en el proceso de combustión y en un rango de operación amplio, logrando una distribución homogénea de temperatura en la zona de combustión, una alta tasa de transferencia de calor por radiación, alta eficiencia de combustión y bajas emisiones de CO y NO_x debido a las bajas temperaturas a las que se desarrolla la combustión.

Los quemadores radiantes son desarrollados para utilizar el beneficio del calor infrarrojo por medio de la radiación, proceso ampliamente utilizado en la industria de procesos de manufactura. La transferencia de calor por radiación está determinada por la temperatura alcanzada en el quemador. Un beneficio importante del calentamiento por radiación es que puede proporcionar tiempos de calentamiento mucho más rápidos que el entregado por convección. Estas ventajas de este tipo de quemadores son transferibles a aplicaciones industriales como es este caso en donde se diseñará un quemador compacto que se pueden acomodar en la cámara del horno en cuestión. Esta flexibilidad permite llevar a cabo aplicaciones bastante específicas en donde técnicas de combustión convencionales no se pueden desarrollar.

2.3.2 Parámetros de operación

En un quemador radiante se reconocen los siguientes parámetros de operación fundamentales:

- Consumo calorífico ($\dot{m}_f$) Flujo másico de combustible combustionado en el quemador. Se asocia al flujo volumétrico de combustible de la siguiente forma:

$$\dot{m}_f = \rho_f \dot{V}_f \quad (4)$$

- Flujo de mezcla ($\dot{V}_m$): Flujo volumétrico de la mezcla aire-combustible quemada, equivalente a la suma entre el flujo de aire ($\dot{V}_a$) y de combustible ($\dot{V}_f$).

$$\dot{V}_m = \dot{V}_a + \dot{V}_f \quad (5)$$

- Potencia (P): Corresponde a la potencia térmica asociada al consumo combustible mediante su poder calorífico inferior (H_{inf}) según la siguiente ecuación:

$$P = \dot{m}_f H_{inf} \quad (6)$$

- Tasa de quemado (FR): Derivado de la sigla en inglés de “firing rate”. Corresponde a la potencia térmica quemada por unidad de área transversal de material poroso.

$$FR = P/A \quad (7)$$

- Tasa radiativa (RR): Fracción de la potencia del quemador que es emitida en forma de radiación térmica.

$$RR = P_{rad}/P \quad (8)$$

2.3.3 Componentes

Un quemador de superficie radiante con tecnología de combustión en MPI posee, en términos generales, los siguientes sistemas básicos:

- Medio poroso: Matriz porosa de material cerámico resistente a altas temperaturas y con alta emisividad térmica, en cuyas porosidades se desarrolla la combustión.
- Trampa de llama: Elemento encargado de limitar la propagación de la llama, obligándola a estabilizarse en el medio poroso.
- Aislación: Necesaria para proteger las estructuras del quemador de las altas temperaturas alcanzadas en el MPI.
- Cabezal: Estructura que soporta el MPI y la trampa de llama formando un conjunto donde se desarrolla el trabajo del quemador.
- Sistema de mezcla: Se encarga de mezclar el oxidante y carburante de trabajo (generalmente aire y gas combustible).
- Sistema de impulsión: Sistema que permite forzar el flujo de mezcla.
- Sistema de distribución: Sistema encargado de conducir la mezcla aire-combustible hacia el cabezal del quemador.
- Estructura: Soporta todos los sistemas del quemador en un conjunto.

2.3.4 Marco legal

En Chile, cualquier artefacto o equipo que trabaje con electricidad y/o combustibles se encuentra regulado y bajo las disposiciones de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). En particular, un quemador radiante de combustión en MPI se rige bajo la Norma chilena NCh3111 (Of. 2007) “Quemadores de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos”, según lo establecido en la Ley N° 18.418 del año 1985 y el D.S. N° 298 del año 2005, por Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.

En esta norma se establece la terminología, requisitos generales constructivos y el funcionamiento de este tipo de artefactos para autorizar su comercialización y uso. Esta autorización se obtiene aprobando el Protocolo PC96 ante un organismo certificador autorizado por la SEC, la cual emite una certificación.

Si bien, para efectos de este trabajo, se exige el cumplimiento de esta normativa, por ende, se considerar las especificaciones y requisitos establecidos en ella, con objeto de validar técnica y comercialmente la aplicación de un quemador de MPI tanto en hornos industriales como en otros procesos.

3 Diseño

3.1 Horno industrial

3.1.1 Características del Horno

3.1.1.1 Características generales

El horno empleado para la puesta en marcha de este trabajo posee las características técnicas especificadas en la Tabla 1. Como se mencionó, corresponde a un horno de tubos anulares, donde la cámara de combustión está separada de la cámara de cocción, en el cual la transferencia de calor se produce a través del calentamiento de tubos anulares (en los que circula por lo general agua destilada), los cuales rodean la cámara cocción como la de combustión.

Tabla 1: Especificaciones horno.

MODELO	SIAM 5 m ²	
Dimensión Externa [cm]		
Frente	Fondo	Alto
240	310	220
Dimensión Cámara [cm]		
Ancho	Fondo	Alto
100	250	17
Nº de puertas	4	-
Producción	80	[kg/h]
Tº de Funcionamiento	0 a 250	°C
C. Térmico Nominal	22/38	[kW]
C. Nominal GLP	8,6	[m³/h]
C. GN	4,5	[m³/h]
C. Petróleo	4	[Lt/h]
Consumo eléctrico	0.5	[kW]
Peso aproximado	2.250	[kg]

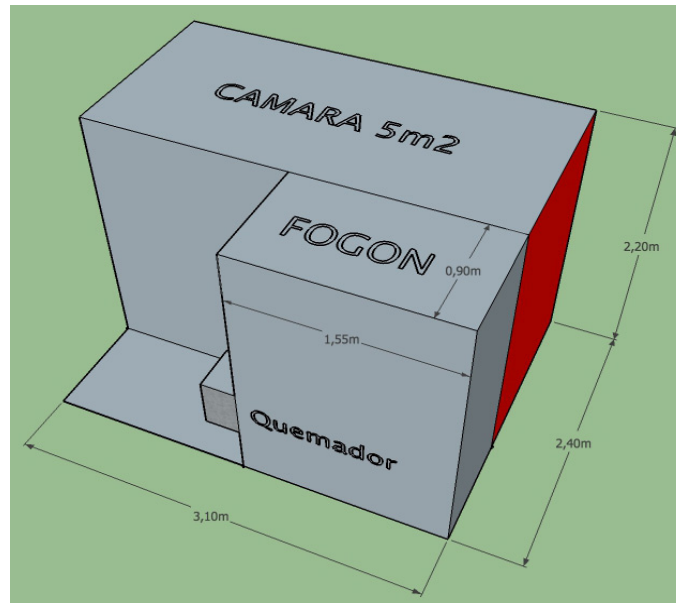


Figura 6: Dimensiones horno tubos anulares



Figura 7: Vista frontal horno

3.2 Quemador radiante

3.2.1 Dimensionamiento previo

Previo al diseño del quemador, es necesario estimar la potencia requerida para lograr las condiciones de temperatura deseadas en la cámara de cocción. Para esto, se utilizaron los datos obtenidos en el informe de eficiencia energética línea base gas realizados al horno SIAM de 5 m² con un quemador de gas licuado de petróleo (GLP) marca Joannes, instalado en el hogar de combustión, que operó a una potencia de 58 [kW].

3.2.1.1 Estimación de potencia requerida

Teniendo en cuenta las características de la tecnología de los MPI y los datos obtenidos línea base gas, se determina que la potencia requerida en el quemador es de aproximadamente 45 kW, por ende, se utilizaran 3 MPI con una potencia nominal de 60 kW.

3.2.2 Diseño del quemador

El diseño conceptual del quemador sigue la configuración representada en el diagrama de la Fig. 8. En los siguientes diagramas se muestran las dimensiones y los elementos principales que componen el quemador. A continuación, se describe en detalle las características de cada uno.

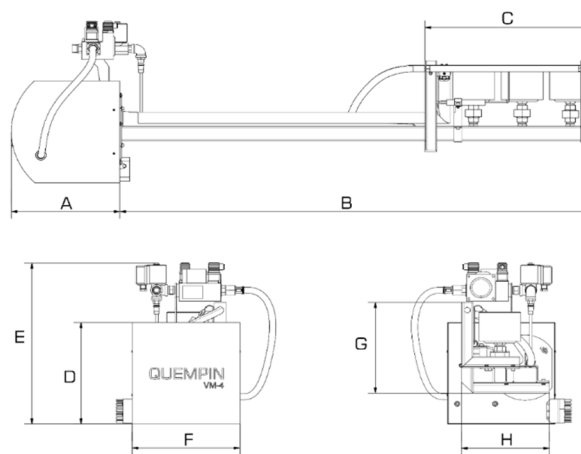


Figura 8: Dimensiones Quemador MPI.

Tabla 2: Dimensiones Quemador MPI

MODELO	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	F mm	G mm	H mm
VM4-03A81	280	1217	432	280	444	280	250	227

3.2.3 Componentes del Quemador

El quemador consta de cuatro sistemas principales, descritos en la tabla 3. Los componentes principales del equipo se indican en el diagrama fig.9.

Tabla 3: Sistemas principales quemador.

Sistema	
Cabezal de combustión	03 unidades radiativas coplanares en línea
Sistema de encendido	Llama piloto lineal, chispero de ignición
Sistema de distribución	Ventilador de premezcla, manifold 3 salidas verticales
Sistema de control	Controlador de llama, sensor por ionización, presóstatos de gas y aire, electroválvulas de gas principal y piloto

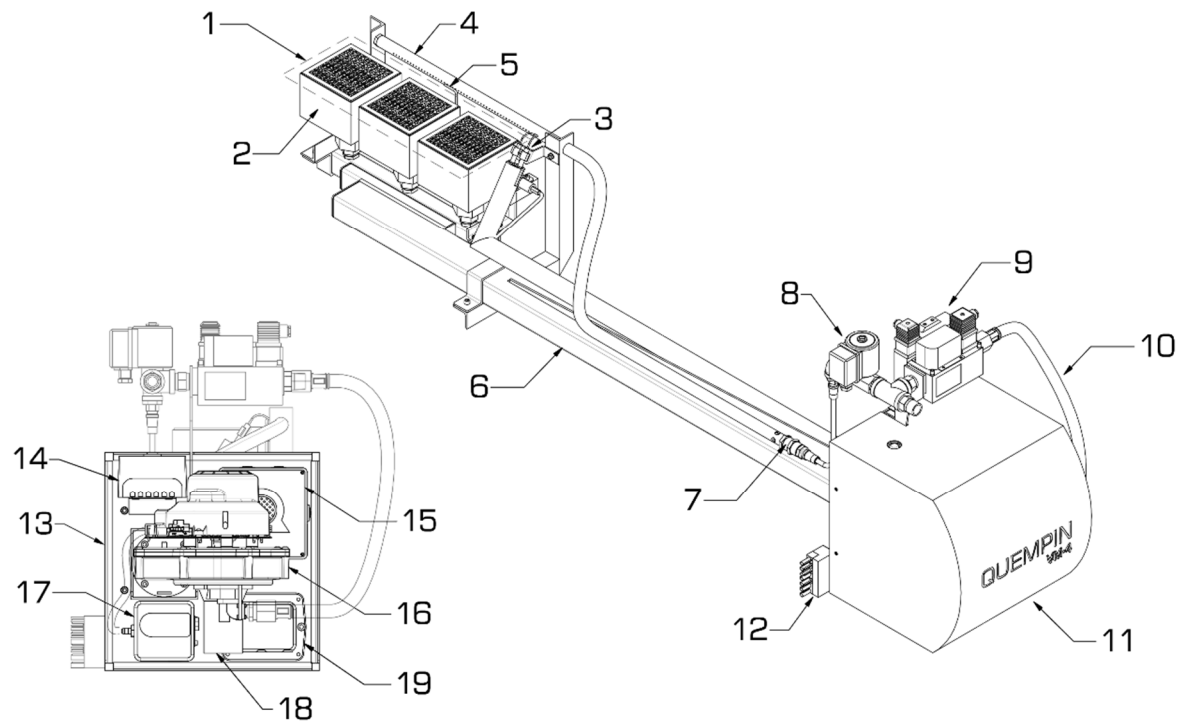


Figura 9: Esquema componentes quemador

En donde:

- | | | | |
|----|-------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Cabezal de combustión | 11 | Carcasa |
| 2 | Unidad radiativa | 12 | Enchufe (7 pines) |
| 3 | Electrodos de ignición | 13 | Placa de componentes |
| 4 | Llama piloto | 14 | Controlador de llama |
| 5 | Electrodo de ionización | 15 | Caja de control |
| 6 | Manifold | 16 | Ventilador de premezcla |
| 7 | Tobera piloto | 17 | Presostato de aire |
| 8 | Válvula piloto | 18 | Venturi de inyección de gas |
| 9 | Válvula monobloque | 19 | Transformador |
| 10 | Flexible de gas | | |

3.2.4 Características componentes quemador

3.2.4.1 Medio poroso

De acuerdo al dimensionamiento previo, se necesitan como mínimo 45 kW de potencia térmica en el quemador para mantener las condiciones requeridas en la cámara de cocción. Por ende, se utilizarán 3 MPI de 90x90 mm para alcanzar la potencia requerida, dado que el MPI es el elemento crítico que define la potencia límite del quemador, se decide sobredimensionarlo para dar un margen de respaldo ante eventuales inconvenientes. Esto no impide trabajar a potencias bajas, ya que, como se ha mencionado, un quemador de MPI posee, entre sus cualidades, un alto rango de modulación. Las características del MPI utilizado se indican en la Tabla 4.

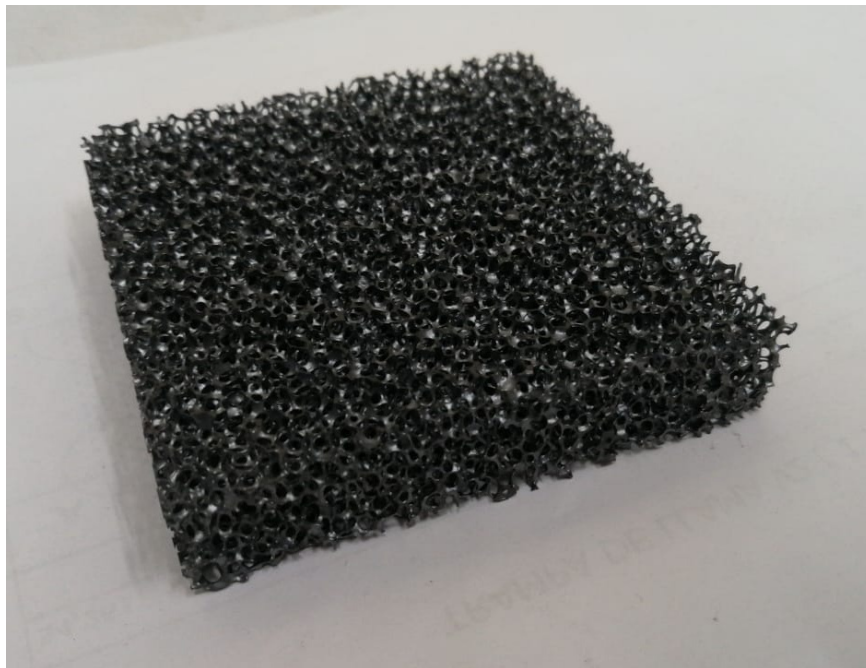


Figura 10: MPI del quemador

Tabla 4: Características MPI.

Material	Si – SiC
Geometría	Cuadrado
Perímetro	360mm
Porosidad	20 ppi
Espesor	22mm
FR máximo	2500 kW/m ²
Potencia admisible	20,25 kW

3.2.4.2 Trampa de llama

Este componente es crítico en cuanto a la seguridad en la operación del quemador, ya que es el encargado de mantener estable el frente de combustión en el MPI y evitar un retroceso de la llama, por lo que se utiliza un material de alta calidad, cuyas características se indican en la Tabla 5.

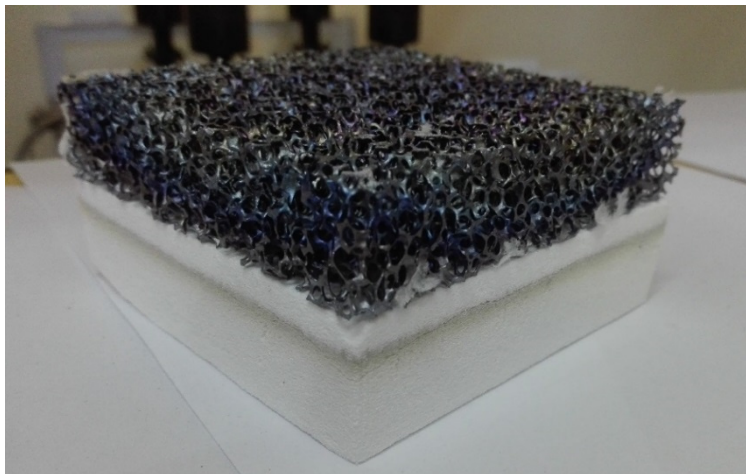


Figura 11: Trampa de llama + medio poroso

Tabla 5: características trampa de llama

Fabricante	Duotherm-Stark
Composición	75% Al_2O_3 , 25% SiO_2
Geometría	Cuadrada
Perímetro	360 mm
Diam. perforación	1 mm
Espesor	25 mm
Separación Perf.	5 mm
Conductividad térmica a 1100 °C	0,16 W/m K
Temperatura de servicio	1750 °C
Densidad	400 kg/m ³

3.2.4.3 Aislación

Se requiere aislar térmicamente el conjunto MPI – trampa de llama, para evitar que las altas temperaturas alcanzadas dañen el cabezal. Para esto, se consideran tres capas de papel aislante de fibras de silica – magnesio, con las características indicadas a continuación en la tabla 6.

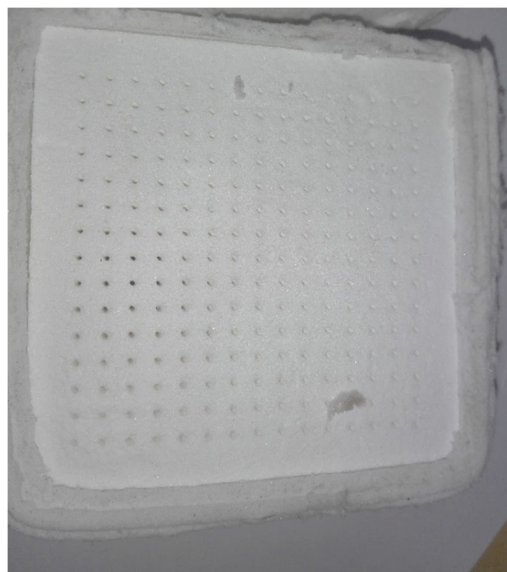


Figura 12: Aislante contorno trampa de llama

Tabla 6: Características papel aislante

Material	Si – Mg
Temperatura de fusión	>1500 °C
Temperatura de servicio	1175 °C
Espesor	3 mm
Densidad	160 kg/m ³

3.2.4.4 Cabezales de combustión

Los cabezales de combustión corresponden al conjunto funcional donde se desarrolla la combustión, los cuales debe considerar los siguientes criterios:

- Distribución de mezcla: La mezcla entrante a los cabezales debe distribuirse de forma homogénea en toda la sección transversal.
- Aislación térmica: Debe proveer suficiente aislación térmica para que las altas temperaturas alcanzadas en el MPI no dañen las paredes de los cabezales.
- Ajuste: Debe dar soporte al conjunto MPI–trampa de llama, evitando que estos se desmonten durante la operación o que existan fugas de mezcla.

Para este, caso, dado que se utiliza un MPI y trampa de llama cuadrados, el cabezal posee una geometría similar, considerando un bushing de ¾” y una unión americana para conectar con el manifold de distribución, más una tapa difusora, encargada de distribuir el flujo entrante a cada cabezal hacia toda la superficie. La Fig. 13 esquematiza el cabezal de combustión e indica su funcionamiento. El material de fabricación de esta pieza es plancha comercial de acero al carbono de espesor 2 mm. La Fig. 14 muestra los cabezales de combustión ya fabricado y ensamblado al manifold de distribución de flujo, se puede apreciar las uniones americanas que conectan ambos.

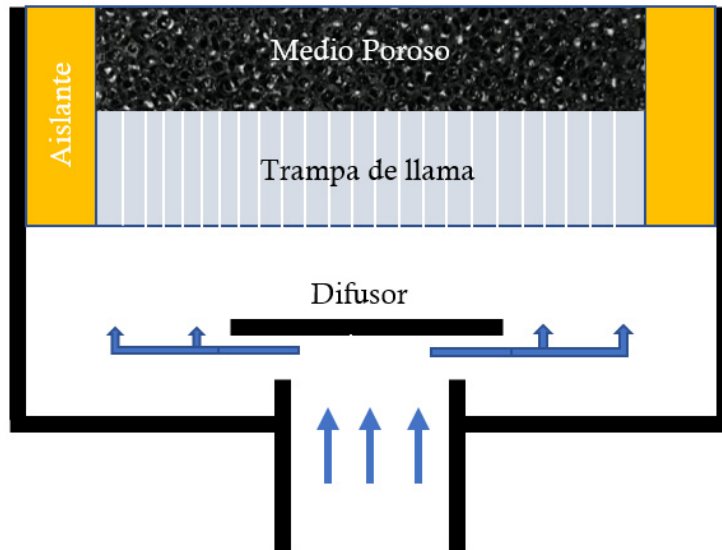


Figura 13: Cabezal de combustión

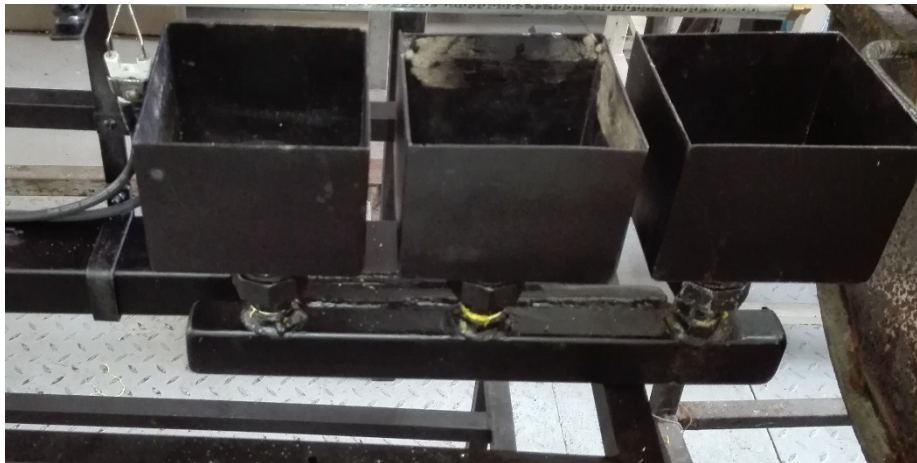


Figura 14: Montaje cabezales al manifold.

3.2.4.5 Sistema de mezcla e impulsión

Tanto el mezclado de aire-combustible como la impulsión de esta mezcla se realizan mediante el ventilador de premezcla EBM-Papst® mostrado en la Fig. 15, diseñado especialmente para aplicación en quemadores, al cual se acopla un sistema de inyección de gas en la admisión del ventilador (tubo venturi marca Honeywell® mostrado en la Fig. 16, expulsando una mezcla homogénea gracias a la turbulencia generada en el rotor. Este ventilador posee una entrada de alimentación eléctrica y una entrada de control, la cual permite regular la velocidad de rotación mediante modulación por ancho de pulso (PWM) a través de un circuito electrónico integrado en su estructura. Las características del ventilador utilizado se indican en la Tabla 7.



Figura 15: Ventilador de premezcla.



Figura 16: Venturi de inyección.

Tabla 7: Características del ventilador de premezcla

Marca	EBM-Papst
Modelo	RG148/1200-3633
Alimentación	230 VAC, 50 Hz
Potencia	135 W
Velocidad máxima	8500 rpm
Flujo de aire máximo	190 m ³ /h
Presión estática	3200 Pa

3.2.4.6 Alimentación de gas

Para la alimentación de gas del quemador, se usará GLP en cilindros de 45 kg. Para esto, la línea de alimentación requiere un regulador de presión de 29 mbar, el cual se conecta a la descarga de los cilindros, más un flexible con salida en rosca de ½" HI. Este es un elemento comercial típico en aplicaciones domésticas e industriales (Fig. 17).



Figura 17: Regulador de presión.

Tabla 8: Características regulador

Clasificación	Regulador para cilindros de 45 kg
Presión mínima de entrada	0,30 bar
Presión máxima de entrada	16 bar
Presión de salida nominal	28 mbar
Dispositivo de seguridad	Válvula de alivio de sobrepresión
Conexión de entrada	G-14
Conexión de salida	H-7

3.2.4.7 Sistema de distribución

La distribución de mezcla se realiza mediante un perfil de sección rectangular, la cual posee en su entrada un frange que se conecta a la descarga del ventilador, y en la salida se conecta a otro perfil rectangular que distribuye el flujo para una salida homogénea de los tres cabezales. El detalle de esta pieza se aprecia en la Fig. 18. La fabricación es en base a perfil comercial cuadrado 50x30x2 mm de acero estructural ASTM A-36.

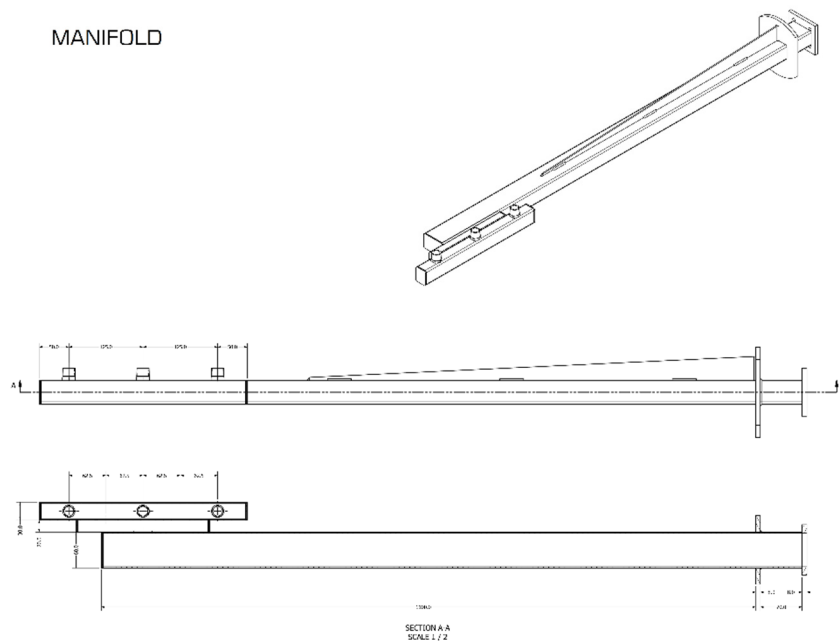


Figura 18: Manifold distribución flujo de aire

3.2.5 Automatización y control

Los elementos mencionados en la sección 3.2.4 corresponden a componentes básicos del quemador (sistema cabezal y distribución). Sin embargo, no son suficientes para la operación segura del equipo, ya que no entregan control inmediato sobre el actuar de los diferentes elementos ante eventuales condiciones inseguras. A continuación, se describen los elementos de automatización y control incorporados al diseño para una operación segura, considerando el cumplimiento de lo establecido en la Norma NCh3111 “Quemadores de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos”, donde se señala una serie de requisitos que exigen el funcionamiento automático del quemador, permitiendo un encendido seguro y detención inmediata ante eventuales fallas o condiciones de peligro.

3.2.5.1 Controlador de llama

La Norma NCh3111 establece una secuencia lógica de funcionamiento para el quemador, donde la puesta en marcha debe iniciar con una etapa de “Pre-ventilación” para eliminar gases de los ductos y de la cámara de combustión, luego una etapa de “Encendido”, donde se inicia el trabajo del quemador de manera segura, y finalmente la etapa de “Operación”, donde monitorean permanentemente las condiciones de seguridad del equipo (detección llama y de flujo aire).

Para poder desempeñar este funcionamiento, se utiliza un controlador de llama Siemens® de la serie LME21, dispositivo electrónico comercial especialmente diseñado para el control de quemadores de dos etapas. Este componente consiste en una caja con un riel de terminales eléctricos, donde se conectan los siguientes elementos en la configuración mostrada en la Fig. 19:

- Motor del ventilador (M).
- Transformador de alta tensión para electrodos de ignición (Z).
- Válvula solenoide para alimentación de llama piloto (V1).
- Válvula monobloc para alimentación del cabezal (V2).
- Presóstato de aire (Pa).
- Presóstato de gas integrado en monobloc (GP).
- Electrodo de ionización (ION)

Internamente, este dispositivo posee un circuito que gestiona las señales provenientes de sensores, y mediante relés, activa o desactiva los diferentes actuadores de acuerdo a la secuencia de trabajo. Además, posee un botón para la puesta en marcha, el cual posee luces para la indicación de fallas y otras funciones. El funcionamiento de este dispositivo se describe más adelante en la sección 3.3 “Configuración y funcionamiento automatizado”.



Figura 19: Controlador de llama siemens.

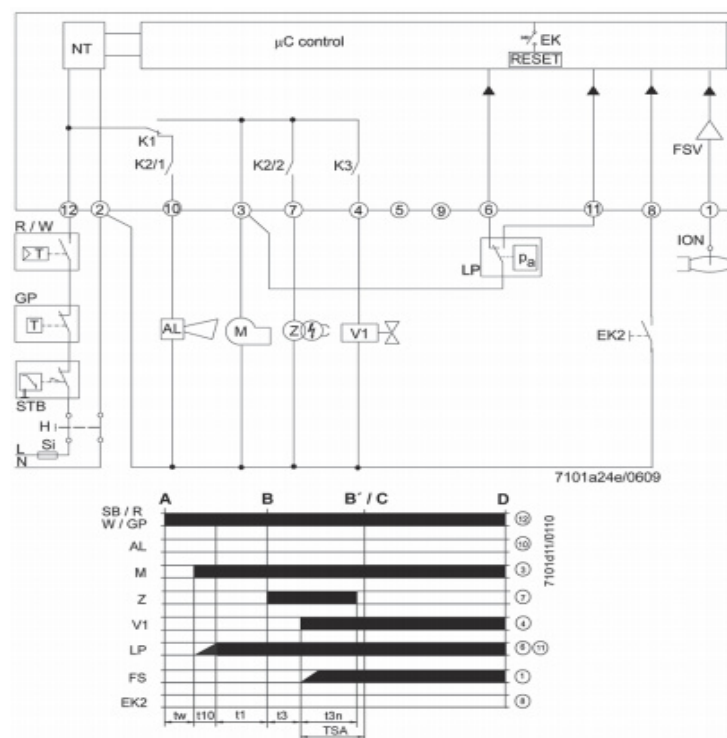


Figura 20: Diagrama de conexiones controlador de llama.

3.2.5.2 Válvula piloto

Válvula solenoide NC con regulación de caudal, encargada de abrir el paso de gas para el encendido de la llama piloto. En este caso se utiliza una válvula marca Brahma®, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 9. La alimentación del solenoide se conecta a la salida número 4 del controlador. Notar que, según el diagrama de conexiones en la Fig. 21, el pin 4 se conecta a “V1”, lo que indica que se trata de la válvula de apertura en la primera etapa (válvula piloto).



Figura 21: Válvula piloto solenoide.

Tabla 9: Características Válvula Brahma para llama piloto.

Marca	Brahma
Modelo	E6G SR8 3/8 GMO
Alimentación	230 VAC, 50 Hz
Clase/Grupo	A/2
Tiempo de cierre	< 1 s
Tiempo de apertura	< 1 s
Montaje	Vertical y horizontal
Cuerpo	Fundición de bronce

3.2.5.3 Llama piloto

La condición de seguridad principal en el funcionamiento de un quemador es la detección de llama, lo que permite detener el funcionamiento si no se detecta la llama mientras existe alimentación de gas, evitando la acumulación de combustible no quemado.

En un quemador convencional, esto se realiza mediante un sensor de ionización o un detector UV, dispositivos que entregan una señal digital ante la presencia de una llama, la cual debe ser detectada en un tiempo inferior a 3 s desde el momento en que se abre el paso de gas por primera vez, según lo establecido en la Norma. Sin embargo, en un quemador de MPI, no existe una llama directamente detectable por estos dispositivos, por lo que se incorpora una llama piloto, la cual sí es detectable, a modo de “quemador de encendido” en una primera etapa, la cual comanda el encendido del quemador principal (cabezales) en una segunda etapa.

La llama piloto utilizada corresponde a un tubo con una serie de perforaciones de 2 mm y una tobera al inicio, como el elemento mostrado en la figura 22.

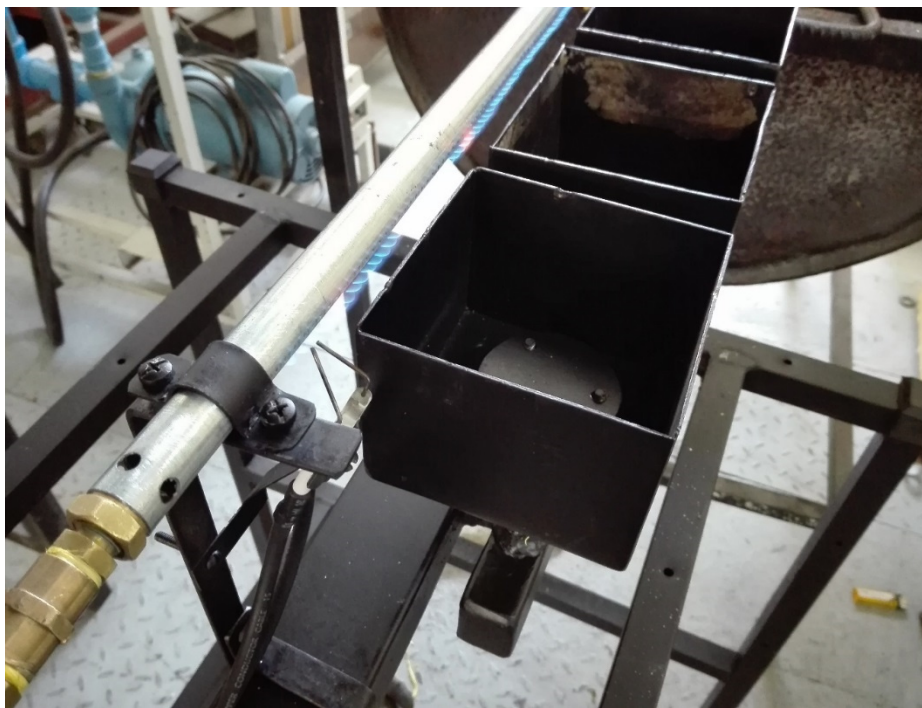


Figura 22: Tubo piloto

3.2.5.4 Electrodos de ignición

Electrodos de kanthal que generan un arco eléctrico al aplicar alta tensión entre sus terminales, el cual permite el encendido de la llama piloto. Este elemento se encuentra disponible en el comercio en múltiples formatos. En este caso se utiliza el mostrado en la Fig. 23, cuyos terminales se conectan a los bornes de salida de un transformador de alta tensión (Fig. 24).

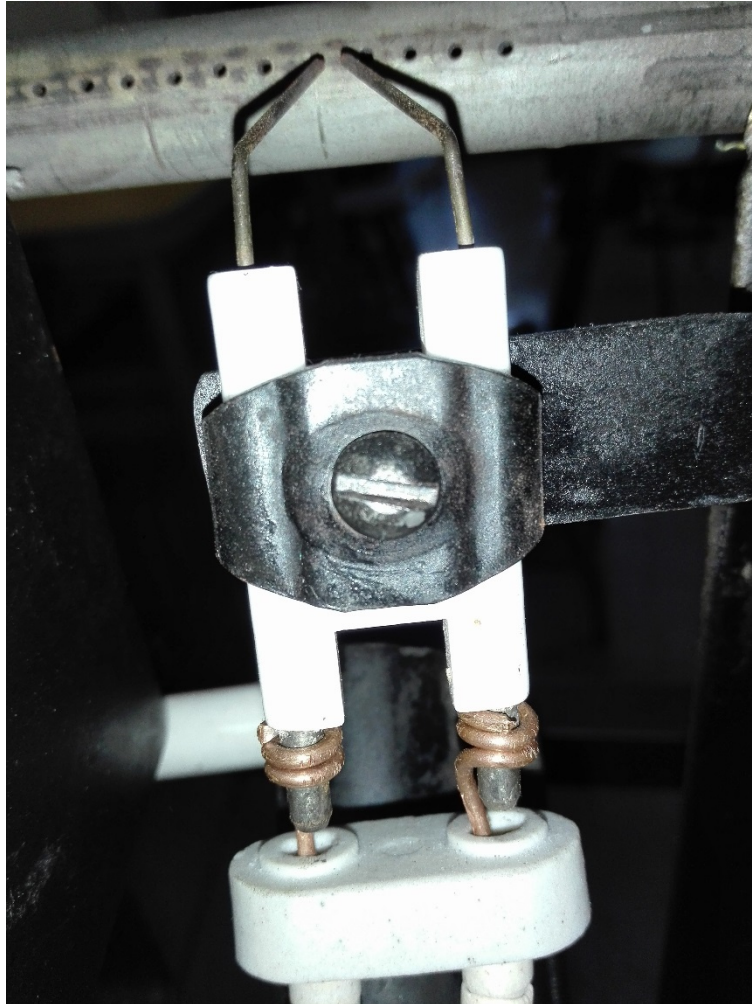


Figura 23: Electrodo de ignición.

3.2.5.5 Transformador de alta tensión

Transformador con salida de alta tensión a 12 kV que permite generar el arco eléctrico en los electrodos de ignición para el encendido automático de la llama piloto. La alimentación de este transformador se conecta a la salida número 7 del controlador, y la salida a los terminales de ignición mediante cables de alta tensión

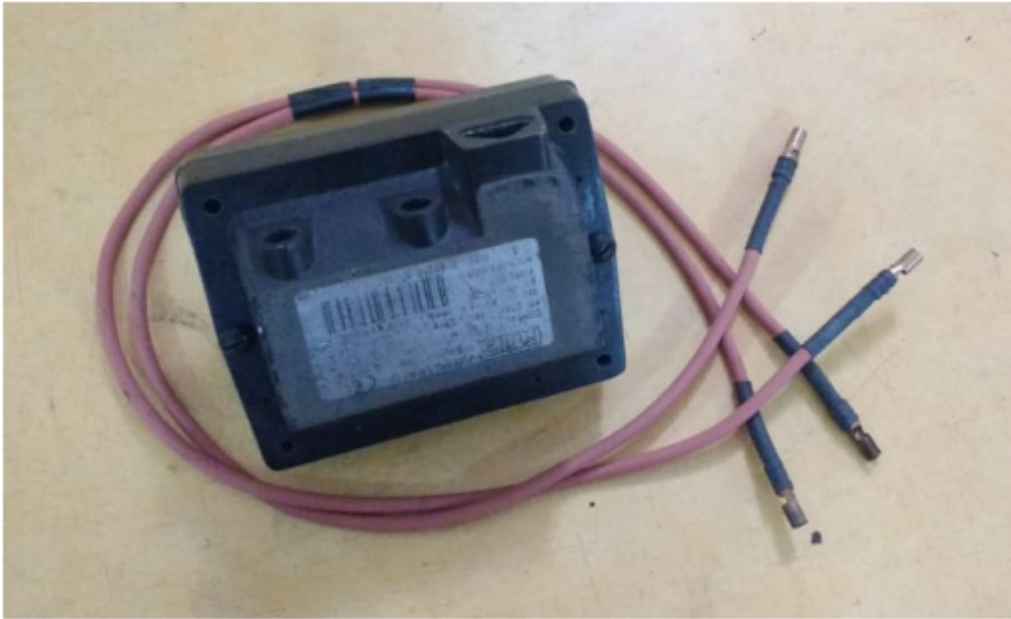


Figura 24: Transformador y cables de alta tensión.

3.2.5.6 Válvula monobloc

Este componente consiste en un presóstato de gas, un regulador de presión y dos válvulas solenoide NC en serie con un regulador de caudal, todo esto integrado en un bloque. El presóstato de gas se conecta al controlador, energizando el sistema únicamente si hay alimentación de combustible (hay una presión de gas en la entrada de la válvula superior a un valor ajustable). El regulador de presión integrado permite ajustar la presión de descarga. Las válvulas solenoide se encargan de abrir o cerrar el paso de gas hacia el quemador, permitiendo además regular el flujo de forma manual. La Fig. 25 muestra la válvula monobloc utilizada en el quemador. El presóstato de gas se conecta al controlador interrumpiendo la alimentación en el pin 12, mientras que la alimentación de los solenoides se conecta

a la salida número 5. Notar que, según el diagrama de conexiones en la Fig. 21, el pin 5 se conecta a “V2”, lo que indica que corresponde a la válvula de apertura durante la segunda etapa. Las especificaciones de este componente se indican en la Tabla 10



Figura 25: Válvula monobloc Dungs

Tabla 10: Características Válvula monobloc

Marca	Dungs
Modelo	MB-D(LE) 405-412 B01
Alimentación	230 VAC, 50 Hz
Presión de operación	Hasta 360 mbar
Temperatura de operación	-15 °C a 70 °C
Clase/Grupo	A/2
Cuerpo	Fundición de aluminio
Montaje	Vertical y horizontal

3.2.5.7 Presóstato de aire

Este dispositivo consiste en un contacto eléctrico doble NA/NC que cambia de posición debido a la presión en una entrada neumática. Dicha entrada se conecta mediante una manguera a la descarga del ventilador, de modo que, al accionar el ventilador y generarse flujo de aire, aumenta la presión cerrando el contacto NA y abriendo el NC. Los contactos de este componente se conectan en los terminales 3, 6 y 11 del controlador, como se muestra en la Fig 20. El presóstato de aire cumple la función de un detector de flujo, que entrega una señal digital al controlador cuando el flujo de aire es efectivo. La presión de disparo que activa el switch del presóstato se puede regular desde un tornillo en la carátula del dispositivo. La Tabla 11 detalla las especificaciones de este componente, el cual se muestra en la Fig. 26.



Figura 26: Presostato de aire Dungs.

Tabla 11: Características presostato Dungs

Marca	Dungs
Modelo	AA-A2
Presión de operación	Hasta 500 mbar
Temperatura de operación	-40 °C a 60 °C
Rango de voltaje	Desde 24 a 250 VAC
Rango de corriente	5 A resistivo, 3 A inductivo
Montaje	Sin restricción

3.2.5.8 Electrodo de ionización

El controlador utilizado posee internamente un circuito detector de llama por ionización. El terminal 1 del controlador está destinado a conectar un electrodo de ionización, que no es más que un conductor resistente a altas temperaturas (kanthal), el cual se debe posicionar de tal manera que haga contacto con la llama a detectar. Para el correcto funcionamiento de este sensor, es importante conectar apropiadamente la masa (tierra) del quemador con la de todos los demás elementos.

Al electrodo de ionización se aplica un voltaje alterno, de modo que cuando existe una llama, cuyo comportamiento eléctrico es similar al de un diodo, se cierra un circuito con la masa del quemador, generándose una pequeña corriente rectificada que es detectada por el controlador.



Figura 27: Electrodo de ionización.

3.2.5.9 Controlador de velocidad

Como se mencionó previamente, el ventilador de premezcla posee integrada una placa electrónica destinada a la regulación de la velocidad de rotación la cual requiere una señal PWM (onda cuadrada) de amplitud entre 20 y 40 V, con una frecuencia entre 2 y 6 kHz, cuyo ciclo de trabajo sea regulable entre el 5% y 95% para el ajuste de velocidad. Para esto, se utiliza una placa Arduino Mega, la cual permite implementar esta función de manera sencilla y controlar el ventilador desde un computador. Adicionalmente, se fabrica un circuito de acondicionamiento para adaptar la señal de salida del Arduino y obtener lo requerido por la placa del ventilador. El conjunto desarrollado se muestra en la Fig. 28. El conjunto incluye además un sensor de temperatura MAX6675, que permite conectar una

termocupla tipo K y comunicar la lectura desde la placa Arduino hacia un computador, y un módulo de bluetooth, que permite realizar todo el control y la comunicación desde el computador de manera inalámbrica.



Figura 28: Control de velocidad del ventilador.

3.2.6 Instrumentos de medición

Ya definido cada uno de los elementos que componen el quemador, es necesario incorporar la instrumentación necesaria para medir los diferentes parámetros de operación. A continuación, se nombran los instrumentos utilizados para este trabajo, tanto para las pruebas de caracterización en el laboratorio, como para las pruebas del quemador en la cámara de combustión.

Vale mencionar que algunas de las mediciones realizadas son de tipo indirectas, cuyo procedimiento se describe en detalle más adelante.

3.2.6.1 Rotámetro Itrón, modelo Gallus 2000

Utilizado para medir la cantidad de flujo de combustible y determinar potencia durante la operación del quemador.

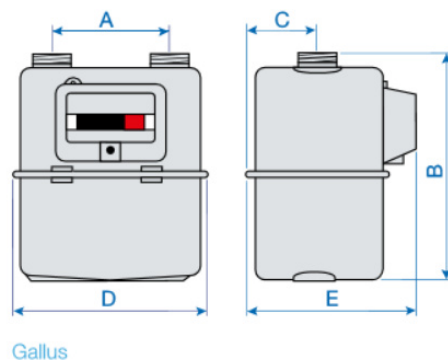


Figura 29: Rotámetro itron.

Tabla 12: Especificaciones técnicas rotámetro.

MODELO	GALLUS 2000-110-G4	
Tipo de gas	Gas natural, GLP y todo gas no corrosivo	
Volumen clásico	1,2 dm ³	
Rango de temperatura	Operativa -25°C a +55°C Almacenamiento -30°C a +70°C	
Presión operativa max	0,2 bar	
Rango de medida	Qmin	0,04 m ³ /h
	Qmax	6 m ³ /h
Precisión	Clase 1,5	
Certificación	MID (4/22/EC) módulo H1	
Totalizador	IP54	
Conexiones	Conexiones de tubería simple o doble Diferentes roscados de conexión disponibles (norma ISO 228-1)	
Velocidad de transmisión	0,01 m ³ /rotación	

3.2.6.2 Datalogger Omega, modelo OM-DAQ-USB-2401

Utilizado para adquirir datos de las termocuplas instaladas en las tapas, tolva y medio poroso del quemador, también se utilizaron en terreno para medir las temperaturas en la cámara de cocción y combustión.

Tabla 13: Especificaciones técnicas Datalogger omega

tipo	OM-DAQ-USB-2401
Aislamiento	500 V desde el PC
Salida de excitación externa Tensión	12 Vcc regulada, salida de corriente total máx. 67 mA
Requisitos de alimentación	Alimentación directamente desde puerto USB, máx. 500 mA o de 7,5 a 12 Vcc externa
Entorno	0 a 50°C (0 a 122°F) 95% de HR (sin condensado)
T° de funcionamiento	0 a 50°C (32 a 122°F), 0 a 95% de HR, sin condensado
T° de almacenamiento	-40 a 85°C (-40 a 185 °F)
Peso	0,23 kg (0,5 libras)
Dimensiones	107 de ancho x 128 de largo x 39 mm de alto (4,2 x 5,1 x 1,5")

3.2.6.3 Pirómetro dos colores

Utilizado para medir la temperatura en la superficie del MPI y potencia radiativa.



Figura 30: Pirómetro Impac

Marca	Impac IS3
Rango	700 – 1800 °C

3.2.6.4 Multímetro Digital

Utilizado para medición de la corriente proporcional que entrega el pirómetro.



Figura 31: Voltímetro digital.

Tabla 14: Especificaciones voltímetro.

Marca	THOKET
Voltaje de CC	200 V/1000 V
Voltaje de CA	200 V/750 V
DC Corriente	2 A/20 A
Corriente de CA	2 A/20 A

3.2.6.5 Termocuplas tipo K

Utilizados como sensores de temperatura en el cuerpo del cabezal, cámara de combustión y cocción.



Figura 32: Termocupla tipo K.

Tabla 15: Especificaciones técnicas termocupla tipo K

TIPO	K
Aleación Cable +	Níquel / Cromo
Aleación Cable -	Níquel / Aluminio
Rango de temperatura	mín. -200
[°C]	máx. 1372
Sensibilidad	41 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

3.2.6.6 Analizador de gases BOSTON, modelo HD BST 311

Utilizado para el análisis de la composición de gases producto de la combustión y de diferencias de presión en ducto de escape de horno.



Figura 33: Analizador de gases Boston.

Tabla 16: Especificaciones técnicas analizador de gases

Parámetro	Tipo de Sensor	Rango de medida	Resolución
O_2	Electroquímico	0 ~ 21%	0,1 % vol
$CO-2000$	Electroquímico	0 ~ 2000 [ppm]	1 [ppm]
NO	Electroquímico	0 ~ 1000 [ppm]	1 [ppm]
SO_2	Electroquímico	0 ~ 2000 [ppm]	1 [ppm]
CO_2	Calculado	0 ~ 100% vol	0,1 % vol
NO_x	Calculado	0 ~ 1500 [ppm]	1 [ppm]
T° Gases de combustión	Tc K	0 ~ 1000 [°C]	1 [°C]
Presión	Semiconductor	-50 ~ 11000 [Pa]	1 [Pa]

3.2.6.7 Detector de fugas

Utilizador para la detección de posibles fugas en la operación del quemador.

Marca	Inficon
Modelo	Gas-Mat



Figura 34: Detector de fugas.

3.2.7 Determinación de parámetros de operación

Al momento de poner en marcha el quemador, es necesario determinar los parámetros de operación, los cuales son, fundamentalmente, potencia y relación de aire. Para esto, es necesario conocer las propiedades del aire de combustión y del gas quemado, además de los flujos másicos de cada uno.

3.2.5.1 Propiedades del combustible

Si bien un quemador radiante de MPI puede trabajar con cualquier gas combustible, para esta aplicación se utilizará GLP. La Tabla 17 indica las propiedades de este combustible consideradas para los cálculos. Cabe mencionar que existen muchas proporciones de mezcla propano butano disponibles en el mercado de GLP, que van desde 90-10% hasta 50-50% comúnmente, cuyo valor exacto es protegido por las empresas proveedoras, por lo que se ha considerado GLP 70-30% como valor intermedio.

Tabla 17: Propiedades del GLP.

Fracción molar propano	70%
Fracción molar butano	30%
Poder calorífico inferior	49.400 kJ/kg
Densidad	2,156 kg/m ³
Masa molar propano	44,097 kg/kmol
Masa molar butano	50,124 kg/kmol
Masa molar GLP	48,302 kg/kmol
Fracción másica propano	63,9%
Fracción másica butano	36,1%
Volumen aire esteq.	25,95 m ³ por m ³ de GLP

3.2.5.2 Propiedades del aire de combustión

El aire de combustión utilizado en el quemador es en todo momento aire ambiental succionado directamente por la admisión del ventilador de premezcla. Para estandarizar los cálculos, se consideran las propiedades del aire a 20 °C indicadas en la Tabla 18.

Tabla 18: Propiedades del aire de combustión.

Temperatura	20 °C
Presión	101,3 kPa
Viscosidad cinemática	1,5E-05 m ² /s
Densidad	1,21 kg/m ³

3.2.5.3 Determinación de la potencia quemador

Para determinar la potencia térmica desempeñada por el quemador, es necesario conocer el consumo de combustible. Para esto, se utiliza un rotámetro de marca Gallus 2000. Este instrumento se conecta en la línea de alimentación de gas y permite conocer el flujo de combustible utilizado en un tiempo determinado.

Con esto, es posible medir el flujo volumétrico de GLP que ingresa al quemador, determinar el consumo calorífico mediante la Ec. 4 y obtener la potencia térmica asociada con la Ec. 6 utilizando los datos de la Tabla 17.

3.2.5.4 Determinación de la relación de aire

Para obtener la relación de aire con que trabaja el quemador, es necesario conocer, además del flujo de combustible, el flujo de aire de combustión. Es posible determinar este flujo midiendo la velocidad con que el ingresa el aire a través de un conducto a la admisión del ventilador. Para esta medición, se incorpora una cañería de PVC, la cual se conecta al venturi de inyección obligando a circular el aire de admisión a través de este conducto. Se realiza una perforación radial de 5 mm en esta cañería distanciada 200 mm de la admisión del ventilador, por donde se introduce el sensor de un anemómetro de hilo caliente cuidando que este quede posicionado en el centro de la sección transversal del tubo. De esta manera, se mide la velocidad máxima del perfil generado por el flujo de aire, asegurando que este se encuentre totalmente desarrollado. Para determinar el caudal asociado a partir de esta velocidad, se asume un perfil de velocidad de flujo de Poiseuille. De acuerdo a este supuesto, la velocidad promedio corresponde a la mitad de la velocidad máxima (en el centro del perfil), por lo que el caudal queda determinado por la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_a = \bar{v} A = \frac{v_{max}}{2} \frac{\pi D^2}{4}$$

Es importante señalar que este supuesto es válido para flujos laminares, por lo que es necesario evaluar el número de Reynolds, verificando en cada medición que $Re < 4000$.

La configuración experimental descrita para la medición del flujo de aire se muestra en la Fig. 35, donde se aprecia el anemómetro de hilo caliente con la sonda de medición instalada en el interior de la cañería de PVC conectada a la succión del ventilador.

También se miden las RPM del ventilador fig. 36, y se genera una tabla de las RPM en relación al flujo entregado, con esos datos se programa el control de velocidad del ventilador sección 3.2.5.9 para la prueba en terreno.

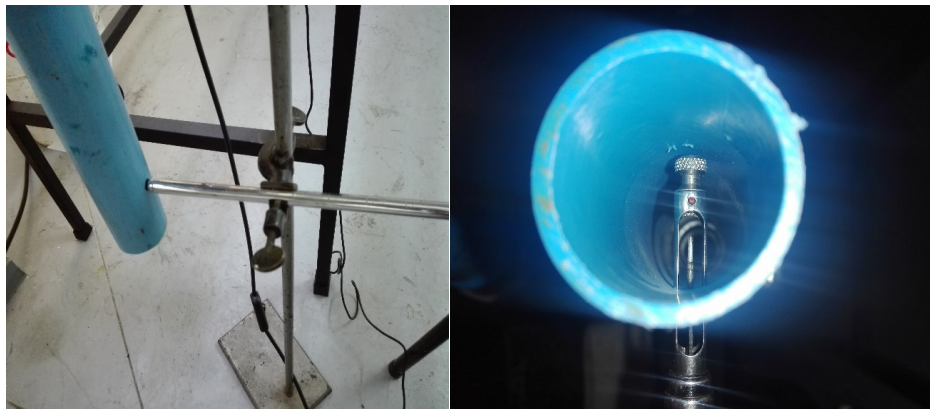


Figura 35: Medición flujo de aire.



Figura 36: Medición RPM ventilador.

Una vez determinados los flujos volumétricos de aire y combustible en las mismas unidades, se puede determinar la relación de aire, introduciendo el volumen de aire estequiométrico, mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_{GLP} V_{a,e}}$$

3.3 Configuración y funcionamiento automatizado

La configuración del quemador para su operación automatizada se dispone cumpliendo con las exigencias establecidas en la Norma NCh3111, para quemadores automáticos de aire forzado que utilizan aire gaseoso, y la certificación del equipo ante la SEC[9].

En el funcionamiento, la puesta en marcha, la detención se desempeña de forma automática, y adicionalmente, se efectúa la detención ante ciertas condiciones de seguridad.

En la Fig. 37 se muestra la secuencia de trabajo desempeñada por el controlador de llama Siemens LME21. Al abrir la alimentación de gas, se activa el presóstato de gas (GP), energizando el dispositivo, el cual indica que el quemador se encuentra detenido con una luz roja. Al pulsar el botón de puesta en marcha, se inicia la secuencia con una fase de pre-ventilación, donde se verifica que existe flujo de aire mediante el presóstato de aire (LP). Luego de esto, inicia la fase de encendido, donde se activa la chispa de ignición (Z) y posteriormente se abre la válvula de llama piloto (V1). Existe un tiempo de seguridad de 2,5 s dentro del cual se debe detectar la llama en el electrodo de ionización (FS), generándose la detención en caso contrario. Tras detectarse la llama, se produce la apertura de la válvula principal (V2) y el encendido del cabezal gracias a la llama piloto, iniciando la fase de operación del quemador. Permanentemente se monitorean las señales de llama y aire, por lo que, si cualquiera de ellas cesa durante el trabajo, se produce la detención del quemador.

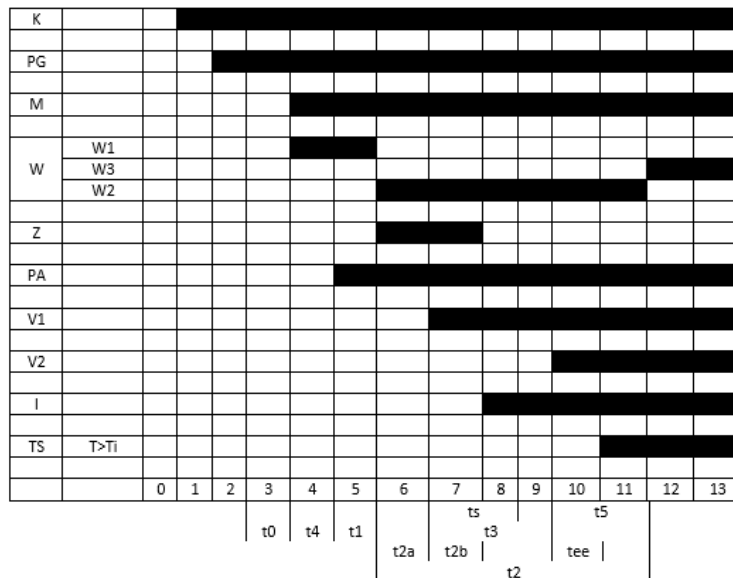


Figura 37: Secuencia de trabajo del quemador, desempeñada por el controlador Siemens

Tabla 19: Especificaciones secuencia de trabajo.

COMPONENTES		PARÁMETROS		
PG	Presostato de gas	t0	Tiempo de verificación de arranque	2,5 s
PA	Presostato de aire	t1	Tiempo de pre-ventilación	30 s
M	Motor del ventilador	t2	Tiempo total de encendido	57,5 s
W	Variador de velocidad	t2a	Tiempo de pre-encendido	2 s
Z	Transformador de ignición	t2b	Tiempo de post-encendido	2,5 s
I	Electrodo de ionización	tee	Tiempo de encendido exitoso	30 s
K	Alimentación eléctrica	ts	Tiempo de seguridad de encendido	3 s
V1	Válvula de llama piloto	t3	Tiempo entre aperturas V1 y V2	10,5 s
V2	Válvula del cabezal	t4	Tiempo para señal del P/A	<180 s
TS	Termostato de seguridad	t5	Tiempo de estabilización cabezal	45 s
		W1	Velocidad de Pre-ventilación	
		W2	Velocidad de Encendido	
		W3	Velocidad de Trabajo	
		Ti	Temperatura de incandescencia	

3.4 Caracterización del quemador

Antes de ir directamente a la implementación del quemador en la cámara de combustión del horno Siam, se realizan pruebas de laboratorio para su caracterización en cuanto al desempeño global del quemador.

Para esto, se dispone de las instalaciones en el Módulo 3 dentro del Laboratorio de Termo fluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Esta instalación cuenta con todo el equipamiento y la indumentaria de seguridad necesaria para la realización de pruebas con el quemador.

3.4.1 Pruebas de desempeño

Estas pruebas contemplan evaluar el comportamiento del quemador en cuanto a:

- Estabilidad y rango de operación: Evaluación de diferentes combinaciones de potencia y relación de aire en las cuales el quemador opera de manera estable. Determinación de límites mínimo y máximo donde existen problemas de operación.
- Potencia y tasa radiativa: Evaluación de la potencia radiativa y la tasa radiativa desempeñada por el quemador. Estudio del comportamiento de estos parámetros en función de la relación de aire.
- Temperaturas de operación: Evaluación de las temperaturas de trabajo del MPI y superficies de los cabezales de combustión durante la operación. Definición de límites de seguridad.

Para estas pruebas consideran los siguientes elementos en la disposición mostrada en la Fig. 38:

1. Quemador radiante: En configuración para operación automática, con objeto de tener manejo directo de las condiciones de operación.
2. Campana de extracción de gases: Para la eliminación de las emisiones generadas durante las pruebas a realizar.
3. Pirómetro: sobre un pedestal, apuntando a la matriz porosa del quemador durante las mediciones.

4. Multímetro digital: En función de corriente en mA, necesario para leer las mediciones obtenidas con el pirómetro.
5. Termocuplas: Medir las temperaturas del cabezal y la zona de premezcla.
6. Datalogger Omega: Es necesario para la adquisición de los datos que entregan las termocuplas.
7. Tubo para admisión de aire: Para medición de flujo de aire laminar y desarrollado con anemómetro de hilo caliente.
8. Anemómetro: Sonda de medición posicionada mediante pedestal y pinza en la perforación del tubo de admisión de aire para corroboración del flujo de aire seteado por el controlador de velocidad.
9. Rotámetro: determinar el consumo de combustible.

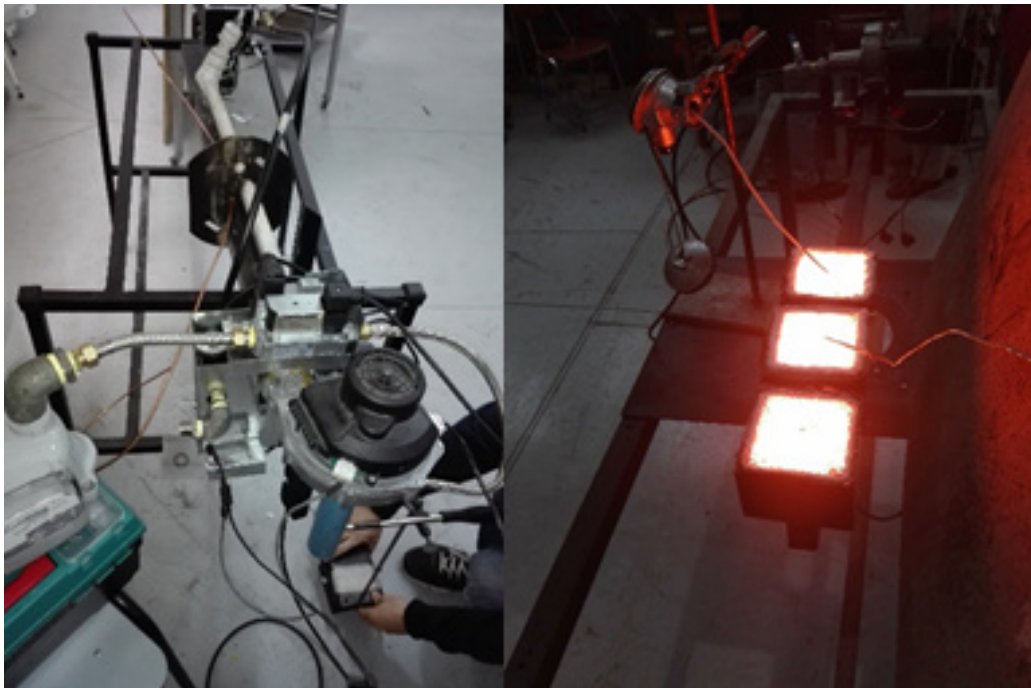


Figura 38: Pruebas de desempeño en laboratorio.

3.5 Pruebas en terreno

3.5.1 Prueba de reconocimiento

Previo a las pruebas de en el horno del almacén Villa Monte, se realiza una visita de reconocimiento, con objeto de familiarizarse con las instalaciones, realizar mediciones, levantar información y preparar la visita definitiva para la instalación y operación del quemador.

Durante esta prueba se instalan los cilindros, línea y sistema de medición de flujo de gas, también se instalan termocuplas en la cámara de cocción fig. 39 y combustión fig. 40. Los objetivos de esta prueba son:

- Reconocimiento cámara de combustión y cocción.
- Verificar y/o definir la propuesta de la instalación del quemador.
- Analizar y prever posibles inconvenientes durante las pruebas quemado.
- Planificar con mayor sustento las pruebas definitivas.



Figura 39: Instalación termocuplas cámara de cocción.



Figura 40: Instalación termocuplas cámara de combustión.

3.5.2 Pruebas quemador

Con la información recopilada durante la jornada de reconocimiento, se procede a las pruebas de operación del quemador en la cámara de combustión. Para esto se coordina una visita de 1 días a la instalación, donde se opera el quemador durante 8 horas, en condiciones de operación fijas (potencia y exceso de aire), implementando sistemas para la medición de:

- Flujo de aire de combustión.
- Flujo de combustible.
- Temperatura cabezal.
- Temperatura cámara de combustión.
- Temperatura cámara de cocción.

El quemador se instala en la cámara de combustión. Allí mismo se montan los instrumentos de medición necesarios,

Los elementos considerados para estas pruebas son:

1. Elementos de seguridad.
2. Herramientas varias.
3. Quemador radiante.
4. Anemómetro.
5. Tubo para admisión de aire.
6. Rotámetro.
7. Datalogger
8. Termocuplas



Figura 41: Implementación quemador cámara de combustión.

3.5.3 Análisis de gases

Estas pruebas buscan determinar la composición de los gases producto del quemador a las condiciones de operación estimadas para el quemador. Particularmente se enfoca el interés en:

- Emisión de CO.
- Emisión de NO_x.

En ambos casos, se trata de gases altamente tóxicos para el ser humano, por lo que, como mínimo, se espera cumplir con lo establecido en la normativa respecto a estas emisiones. Yendo más allá, se espera verificar que la tecnología de combustión en MPI es ventajosa en cuanto a la reducción de emisiones contaminantes. Para la medición se realiza una perforación de muestreo en el tubo de salida de la cámara de combustión para el ingreso de la sonda del analizador de gases, conforme a lo sugerido en el método CH-3 de la Metodología para Medición de Emisiones de Fuentes Estacionarias del Ministerio de Salud (1996).

Para el análisis de gases del quemador se utilizan los siguientes elementos.

1. Quemador radiante: En configuración para operación automática, con objeto de tener manejo directo de las condiciones de operación.
2. Cámara de combustión: Para aislar los gases de combustión del aire ambiental circundante y obtener correctamente las muestras requeridas.
3. Analizador de gases: Sonda de medición a través de perforación de muestreo en el tramo superior de la cámara de combustión.
4. rotámetro: Fijo sobre la superficie para facilitar la lectura.

. Se ha escogido analizar dos condiciones de operación representativas de lo que, se espera, sean las condiciones de operación reales durante las pruebas de en el horno.



Figura 42: Medición de gases

3.5.4 Cocción de pan

Dentro de las pruebas en terreno se agregó la cocción de pan, no solo se implementó y verificó que el quemador cumplirá las normativas para su certificación, sino que también lograra su objetivo en el horno.

Una vez llegada a la temperatura de operación es posible realizar la cocción de la masa de pan dentro del horno. Como se trabajó con el tipo de pan “hallulla”, es necesario tener un rango de temperatura de trabajo de 210 ± 10 [°C] en la cámara de cocción para resultados óptimos; una vez ingresado el pan se midió la composición, presión y temperatura de gases de escape, temperatura de las paredes críticas del horno.

4 Procedimiento experimental

4.1 Procedimientos generales

A continuación, se detallan procedimientos recurrentes durante todo el trabajo experimental realizado, los cuales son ejecutados de forma sistemática cada vez que es requerido.

4.1.1 Elementos de seguridad

Antes de cualquier operación con el quemador es necesario asegurar que se dispone de los elementos de seguridad necesarios. Estos son:

1. Extintor de incendios.
2. Overol.
3. Zapatos de seguridad
4. Guantes de soldador.
5. Lentes o máscara de seguridad.
6. Válvula de cierre y acceso rápido a la alimentación de gas.

4.1.2 Detección de fugas

Este procedimiento se debe realizar cada vez que se va a operar el quemador por primera vez en una misma jornada o en una instalación que ha sufrido cualquier tipo de intervención en la línea de gas.

El protocolo consiste en:

1. Verificar que todas las piezas de la línea de gas se encuentran bien ajustadas y que todas las válvulas se encuentran cerradas.
2. Con el quemador desenergizado, abrir el paso principal de gas, procurando que la última válvula de la línea se mantenga cerrada.
3. Con el detector de fugas, inspeccionar cada elemento de la línea de gas: juntas, fittings, válvulas, acoplamientos, etc.

4. En caso de haber fugas de gas, identificar el punto problemático y corregir el problema.
5. Si la fuga persiste, detener el procedimiento hasta eliminarla completamente.
6. Si no se detectan fugas, poner en marcha el quemador.
7. Con el quemador encendido, inspeccionar el tramo de la línea de gas faltante (posterior a la última válvula)

4.1.3 Puesta en marcha del quemador

Para poner en marcha el quemador, se requiere haber verificado previamente los elementos de seguridad y alcanzar el punto 6 del procedimiento de detección de fugas, salvo que se trate de una puesta en marcha en una instalación ya inspeccionada. Los pasos a seguir son:

1. Conectar el quemador y sus componentes a la alimentación eléctrica.
2. Conectar el quemador a la línea de alimentación de gas.
3. Definir la velocidad del aire de combustión y caudal de gas necesarios para el encendido del quemador a una potencia de 45 kW y relación de aire 1,4.
4. Definir la velocidad del aire de combustión y caudal de gas necesarios para la operación del quemador a la potencia y relación de aire de trabajo deseada.
 - a. Abrir el paso de alimentación de gas hacia el quemador
5. Verificar que se ha energizado el controlador de llama.
6. Pulsar el botón de puesta en marcha en el controlador de llama.
7. Mientras se ejecuta la pre-ventilación, ajustar la velocidad del ventilador hasta obtener el flujo de aire definido.
8. Esperar hasta que se complete la secuencia de encendido.
 - Si no se logra el encendido de la llama piloto, reintentar pulsando el botón nuevamente.
 - Si el problema persiste, inspeccionar el correcto funcionamiento de la llama piloto.
 - Si se logra el encendido de la llama piloto, pero inmediatamente se detiene la secuencia de encendido, verificar el correcto funcionamiento de la sonda de ionización y/o invertir la polaridad de la alimentación eléctrica al controlador de llama y reintentar.
9. Tras el encendido exitoso de la llama piloto, esperar la apertura de la válvula monobloc y regular el flujo de gas en el controlador de flujo hasta el valor definido.

10. Inspeccionar el encendido y la estabilización del cabezal hasta lograr la incandescencia del medio poroso. En caso de apagado de la llama, reintentar desde el punto 6.
11. Si el encendido es exitoso y estable, regular lentamente los flujos de gas y de aire de combustión hasta los valores definidos, en pasos de 13,9 L/min en el rotámetro de gas y 477 L/min, correspondientes a 2450 RPM en el ventilador.
12. Monitorear permanentemente los cabezales del quemador, verificando que este trabaje correctamente:
 - Ante indicios de apagado del medio poroso o inestabilidad de operación, ajustar regular los flujos de aire y/o combustible para un reencendido.
 - Ante apagado del medio poroso, detener el quemador cerrando el paso de gas.

4.1.4 Detención del quemador

En caso de operar el quemador, la detención se realiza cerrando el paso de la alimentación de gas. Con esto, el controlador de llama detendrá todos los sistemas restantes de manera automática o también se puede cortar el suministro eléctrico.

4.2 Caracterización del quemador

A continuación, se detallan los procedimientos realizados durante el trabajo experimental para la caracterización del quemador, desarrollada en pruebas de desempeño.

4.2.1 Pruebas de desempeño

4.2.1.1 Montaje experimental

Antes de comenzar con la evaluación de desempeño del quemador, es necesario realizar el montaje de la configuración experimental descrita en la sección 3.4.1. Para esto, los pasos a seguir son:

1. Montar el quemador sobre un mesón para tener mejor acceso a sus componentes.

2. Configurar el quemador para su operación automática.
3. Posicionar el conjunto bajo la campana de extracción de gases.
4. Montar y fijar el anemómetro con soporte y pinza en su posición de medición.
5. Posicionar el pedestal que soporta el pirómetro y las termocuplas.
6. Conectar pirómetro y termocuplas.
7. Encender la campana de extracción.
8. Realizar la puesta en marcha del quemador para operación en condiciones de encendido.
9. Con el quemador encendido, verificar que el pirómetro y las termocuplas estén en su posición.
10. Verificar que todos tanto el quemador como los sistemas de medición se encuentran correctamente instalados y operativos.

4.2.1.2 Registro de datos

Tras efectuar el montaje experimental, se procede al registro de datos de las pruebas de desempeño.

Para esto, el procedimiento desarrollado es:

1. Llevar el quemador al nivel de potencia más alto de la matriz de pruebas de desempeño,
2. Una vez estabilizado el quemador a la potencia definida en el punto anterior, disminuir el flujo de aire hasta el desprendimiento de una pequeña llama en el cabezal.
3. Lentamente, incrementar el flujo de aire hasta que el desprendimiento de llama desaparezca.
4. Registrar la lectura del anemómetro, rotámetro y multímetro en el punto de operación anterior. Este constituye el punto límite de inestabilidad por déficit de aire para esa potencia.
5. Incrementar el flujo de aire en pequeños pasos de entre 0,05 m/s y 0,1 m/s y registrar las lecturas en cada punto. Realizar a lo más una medición por minuto.
6. Continuar incrementando el flujo de aire hasta que el cabezal se vuelva inestable o se apague. El último punto de operación estable constituye el punto límite de inestabilidad por exceso de aire para esa potencia.
7. Repetir el procedimiento desde el paso 2 para el siguiente nivel de potencia en la matriz de pruebas de desempeño, hasta completar el registro. Finalmente, detener el quemador.

4.3 Pruebas en terreno

4.3.1 Prueba de reconocimiento

4.3.1.1 Montaje

Tras la llegada y descarga de los implementos en el sector de pruebas, se procede a la instalación del quemador y montaje de los diferentes instrumentos, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Disposición de los elementos de seguridad y de protección personal.
2. Ubicar extintor de incendios cerca de la cámara de combustión, en un lugar seguro y de fácil acceso.
3. Sacar e instalar nueva escotilla ingreso cámara de combustión.
4. Ingresar el quemador y ubicarlo al fondo de la cámara.
5. Conectar el quemador a la alimentación de gas, manteniendo cerrado el paso desde el regulador de presión.
6. Verificar que tanto el quemador como los sistemas de medición se encuentran correctamente instalados y operativos.

4.3.1.2 Operación y registro de datos

1. Abrir templador cámara de combustión.
2. Realizar la puesta en marcha del quemador para llevarlo a las condiciones de operación predefinidas en las pruebas de laboratorio.
3. Verificar que el quemador opera de forma correcta y estable.
4. Desde afuera, monitorear permanentemente la incandescencia del quemador a través de las mirillas de la cámara.
5. Al finalizar el tiempo de prueba, detener el quemador.
6. Guardar el registro de las temperaturas y emisiones obtenidas.
7. Desmontar el quemador y todos los implementos para efectuar el retiro.

5 Resultados

5.1 Caracterización del quemador

5.1.1 Pruebas de desempeño

Se realizaron mediciones en el quemador de superficie radiante. En primera instancia midió la temperatura en la superficie donde se utilizó un pirómetro infrarojo. Además se utilizaron termocuplas tipo K o para medir la temperatura de del cuerpo del cabezal y manifold.

En las mediciones se utilizaron tasas de quemado de 500; 1000; 1500 y 2000 [kW/m²] para la misma potencia y diferentes relaciones de aire.

La tabla 20 resume los resultados obtenidos durante las pruebas de desempeño. Los Gráficos 1 al 8 muestran el comportamiento del quemador en cada nivel de potencia estudiado. En el Gráfico 9 se muestran los diferentes puntos de operación analizados en cuanto a potencia y relación de aire. Por último, el Gráfico 10 compara el desempeño del quemador entre las diferentes condiciones de operación estudiadas.

Tabla 20: Resultados prueba laboratorio

Tasa de quemado	Potencia	Relancio de aire λ	Temperatura del MPI	Potencia Radiativa	Tasa radiativa
500 kW/m ²	12,15 kW	1,12	1195 °C	5,95 kW	49%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,19	1150 °C	5,59 kW	74%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,40	1132 °C	5,22 kW	78%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,65	1102 °C	4,86 kW	75%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,72	1080 °C	5,10 kW	67%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,80	1044 °C	4,50 kW	88%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,85	990 °C	4,50 kW	74%
500 kW/m ²	12,15 kW	1,89	985 °C	4,98 kW	64%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1	1225 °C	14,09 kW	58%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,15	1215 °C	14,82 kW	61%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,22	1180 °C	17,01 kW	70%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,35	1155 °C	13,61 kW	56%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,4	1130 °C	12,64 kW	52%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,51	1110 °C	12,15 kW	50%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,62	1060 °C	9,72 kW	40%
1000 kW/m ²	24,3 kW	1,7	1010 °C	11,66 kW	48%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,08	1315 °C	17,50 kW	48%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,12	1310 °C	22,60 kW	62%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,19	1270 °C	22,60 kW	59%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,31	1230 °C	19,68 kW	54%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,42	1190 °C	23,69 kW	50%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,49	1135 °C	22,23 kW	45%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,61	1095 °C	20,41 kW	35%
1500 kW/m ²	36,45 kW	1,71	1050 °C	20,05 kW	55%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,11	1320 °C	23,33 kW	48%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,18	1301 °C	24,79 kW	51%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,23	1275 °C	35,96 kW	46%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,38	1235 °C	37,91 kW	43%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,41	1205 °C	36,45 kW	42%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,48	1170 °C	36,92 kW	40%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,62	1110 °C	31,10 kW	27%
2000 kW/m ²	48,6 kW	1,74	980 °C	32,95 kW	24%

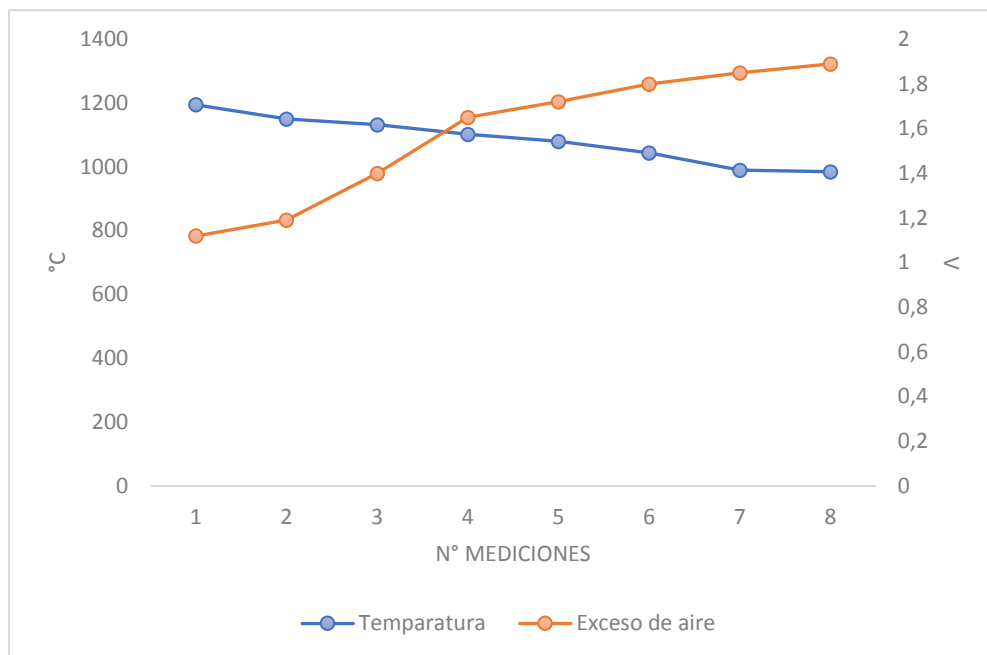


Gráfico 1: Temperatura y exceso de aire a 500 kW/m²

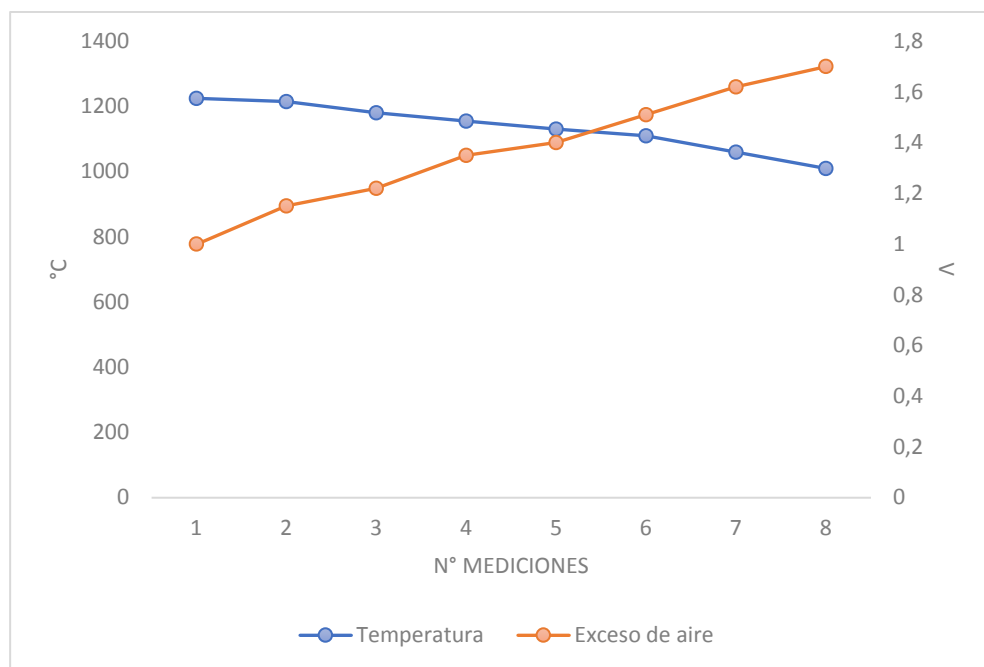


Gráfico 2: Temperatura y exceso de aire a 1000 kW/m²

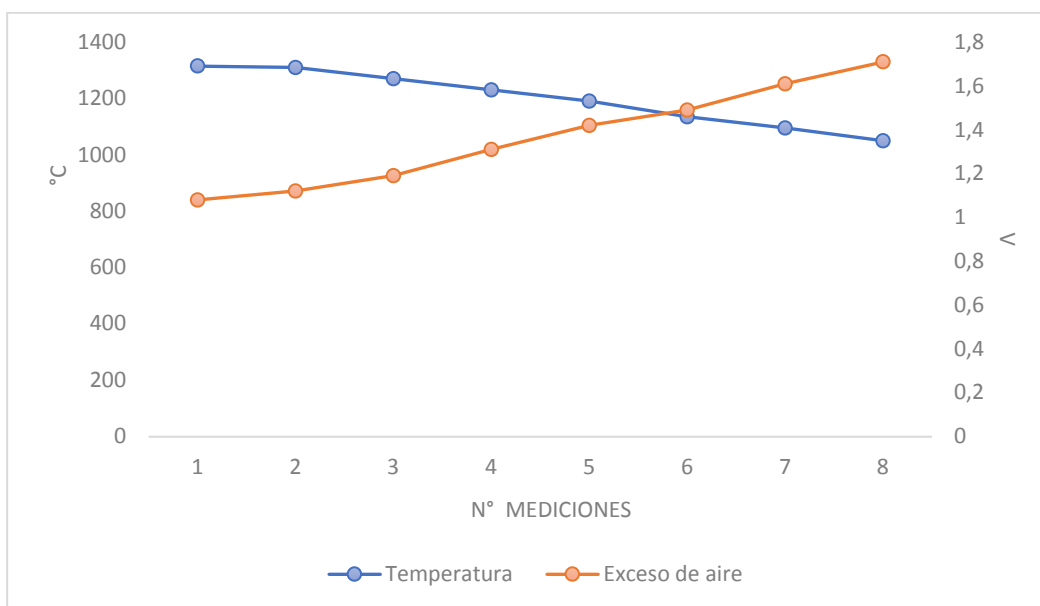


Gráfico 3: Temperatura y exceso de aire a 1500 kW/m²

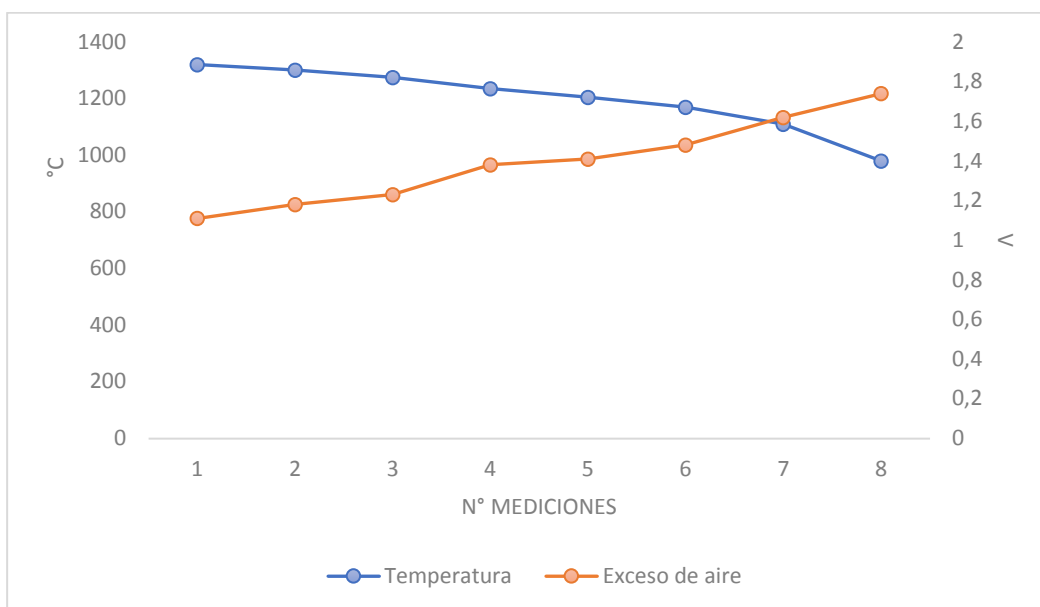


Gráfico 4: Temperatura y exceso de aire a 2000 kW/m²

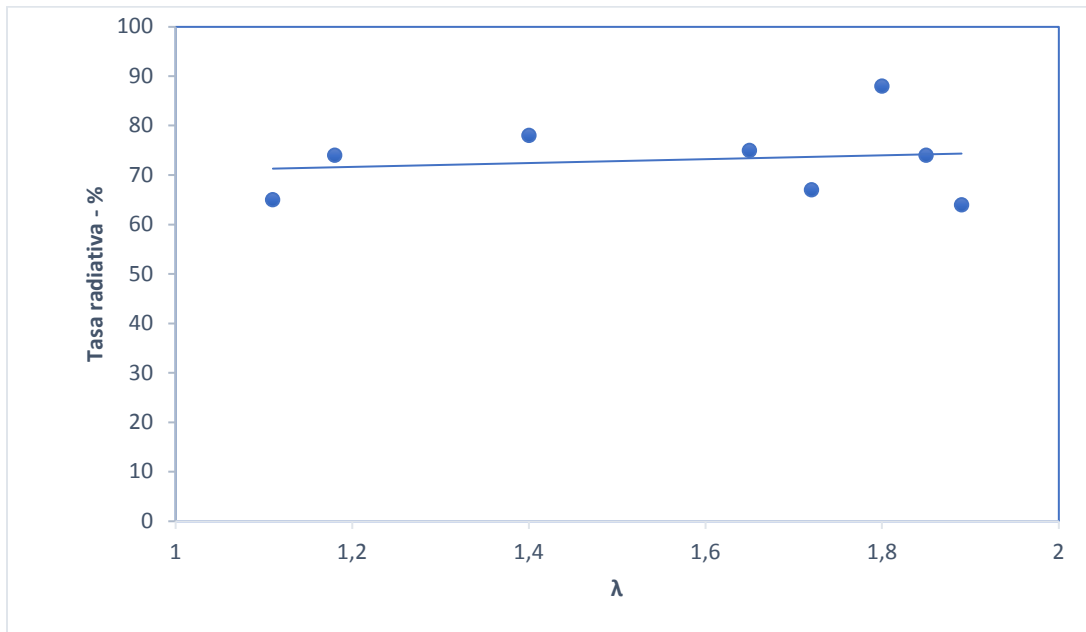


Gráfico 5: Tasa radiativa vs relación de aire a 500 kW/m²

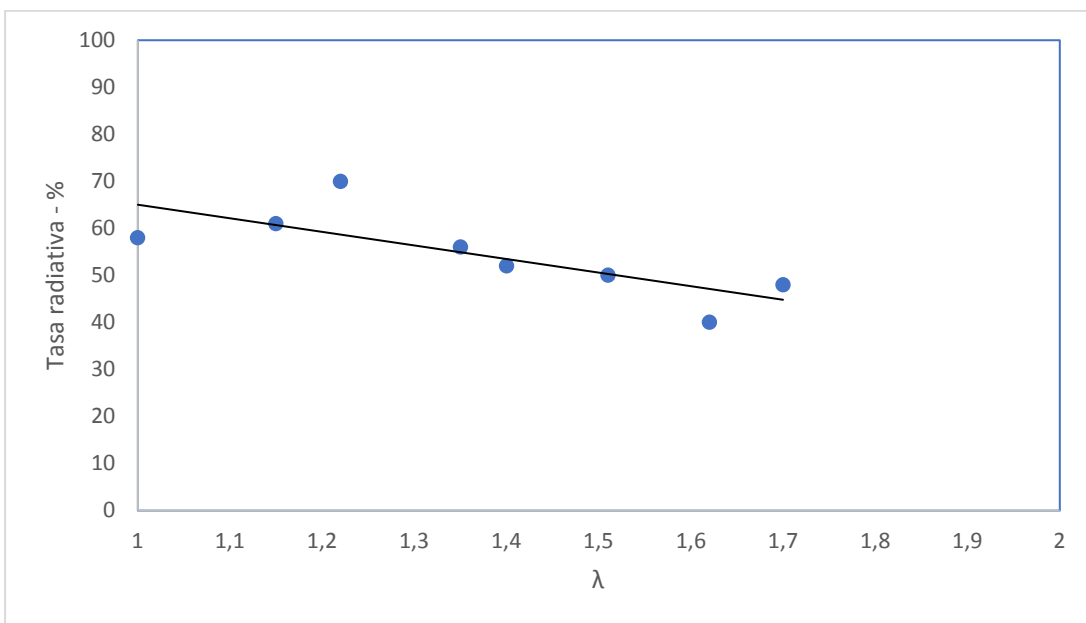


Gráfico 6: Tasa radiativa vs relación de aire a 1000 kW/m²

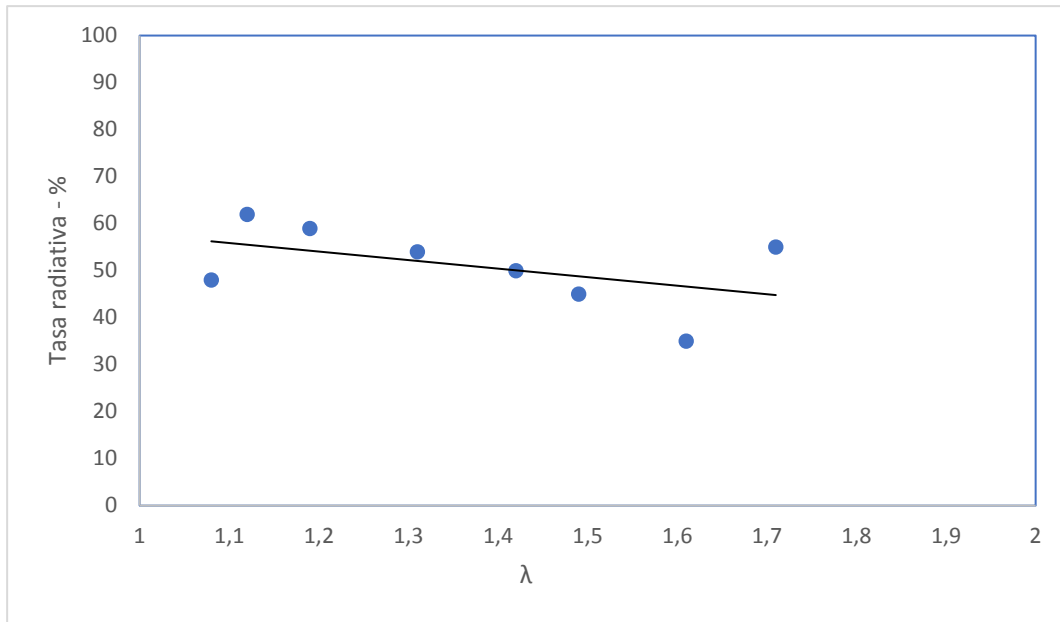


Gráfico 7: Tasa de radiativa vs relación de aire a 1500 kW/m²

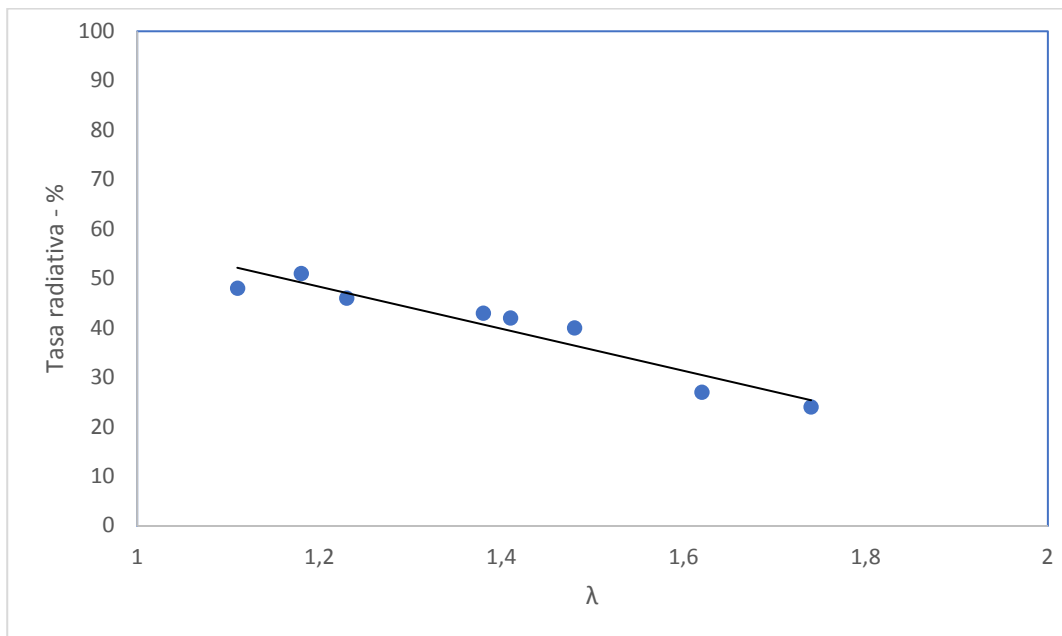


Gráfico 8: Tasa radiativa vs relación de aire a 2000 kW/m²

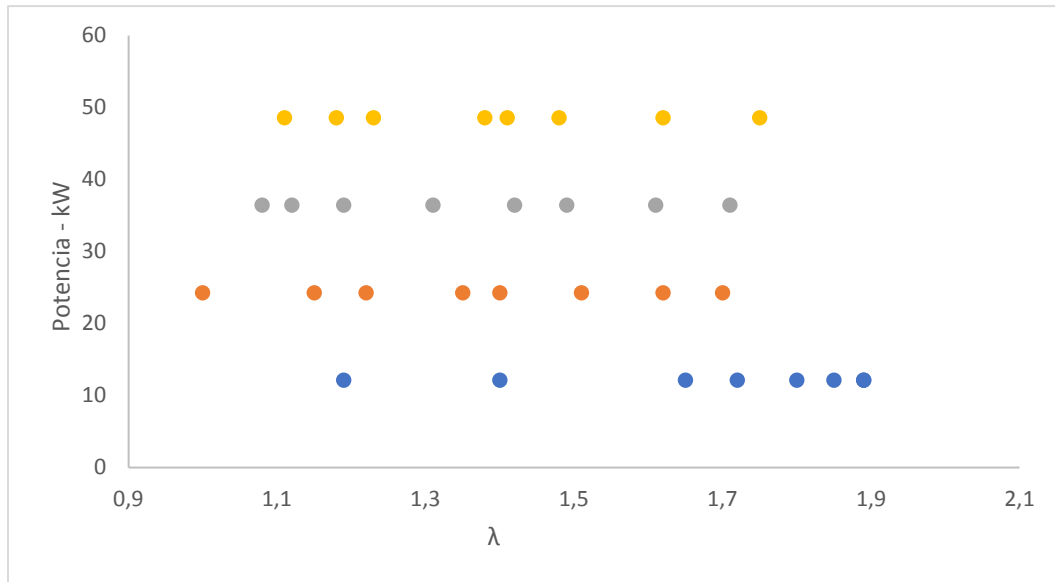


Gráfico 9: Punto de operaciones estudiados

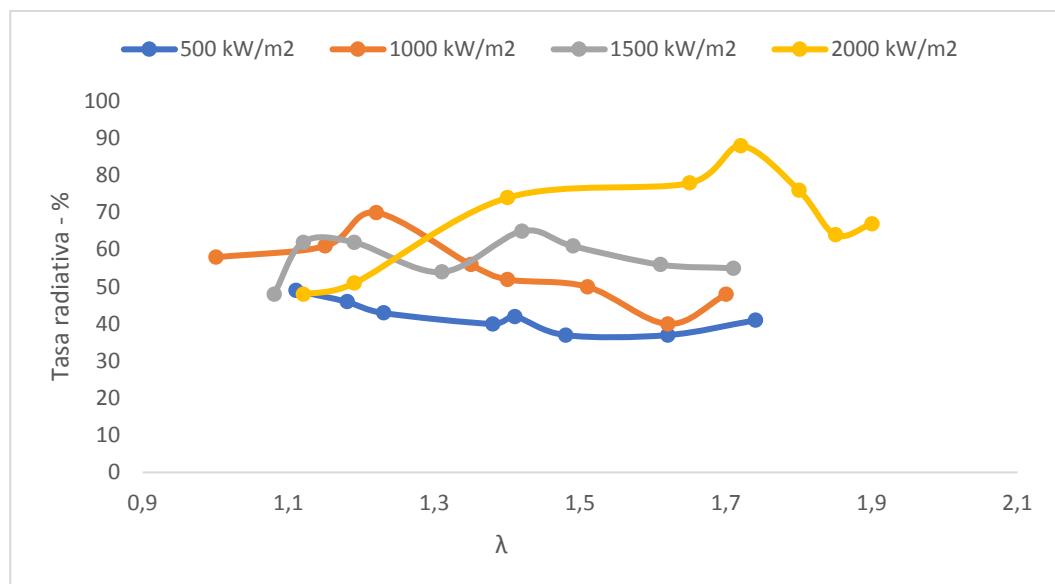


Gráfico 10: Tasa radiativa vs relación de aire a diferentes tasas de quemado

5.2 Pruebas en terreno

5.2.1 Temperatura horno

La siguiente gráfica representa el registro de temperaturas entregadas por el termómetro del horno, durante toda la jornada de medición, siendo “P 1” el piso superior del horno y “P 2” el inferior.

El perfil de temperaturas obtenido es el siguiente:

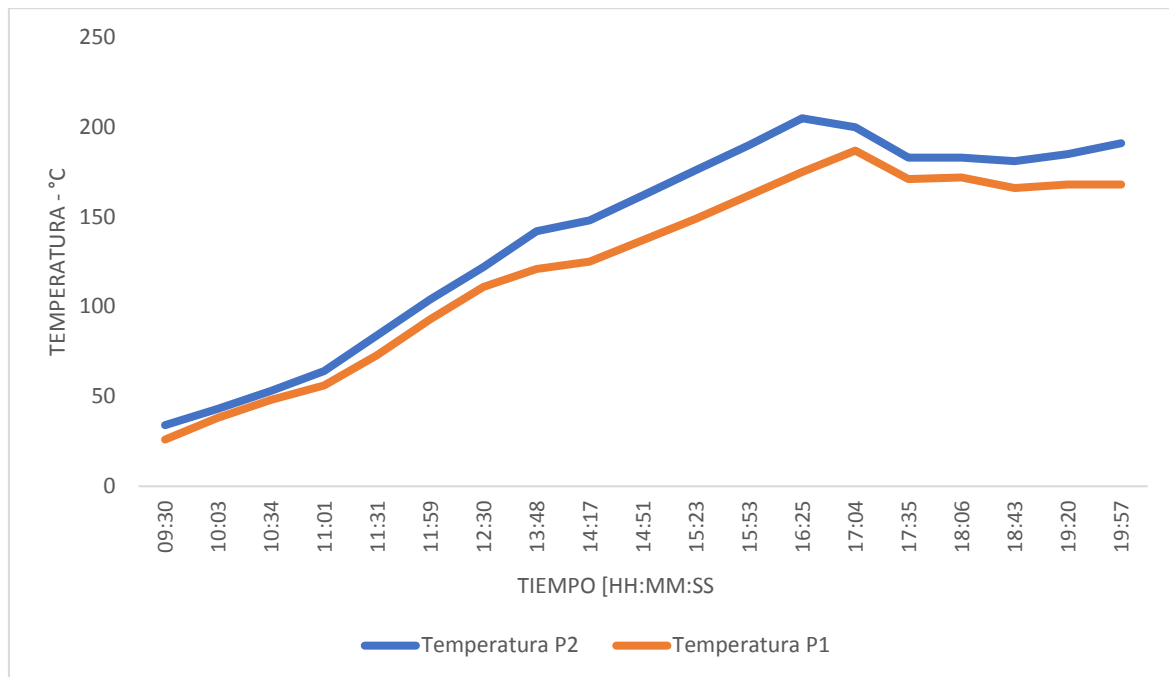


Gráfico 11: Perfil temperaturas pisos de horno

El periodo inicial entre el encendido del quemador hasta la temperatura de cocción se denomina como “transiente inicial”, el cual partió a las 09:30 horas y tuvo una duración de 7 horas y 28 minutos aproximadamente (con una interrupción de 1 hora y 4 minutos con el quemador apagado). Luego, se pasa al periodo de cocción de pan, en el cual las mayores temperaturas registradas fueron 205°C en el piso superior y 187°C en el inferior; mientras que las menores temperaturas fueron 181°C en el piso superior y 166°C en el inferior.

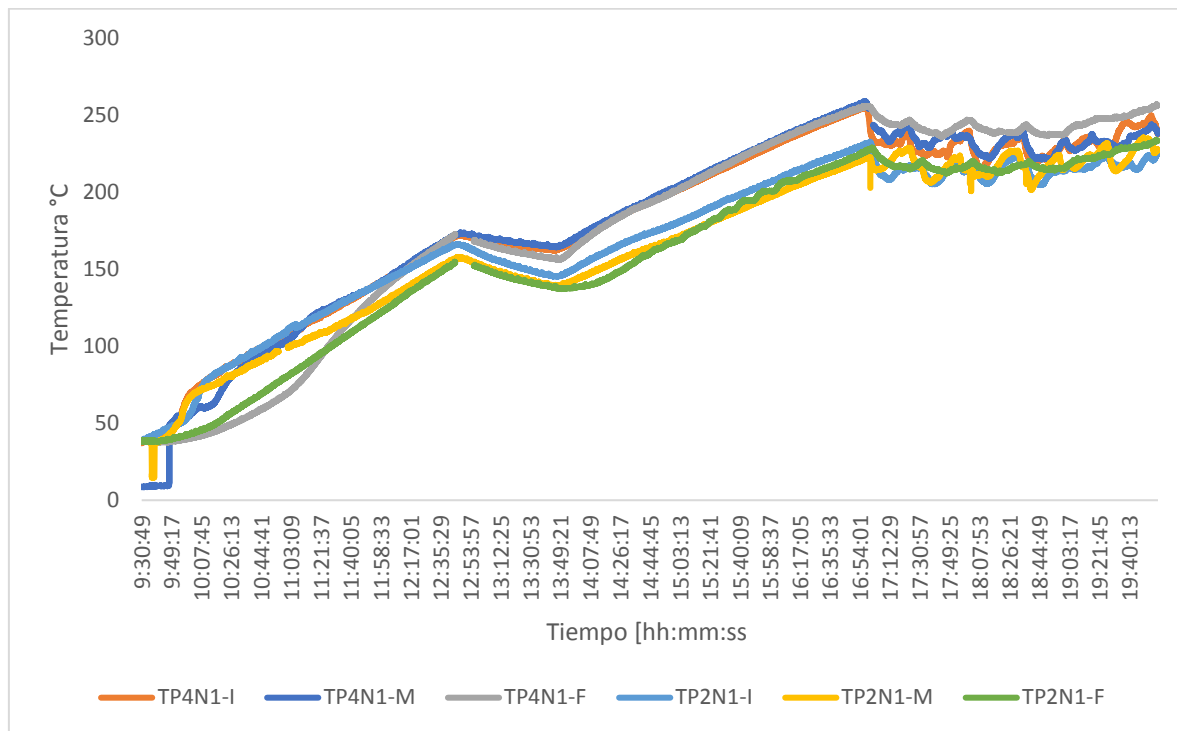


Gráfico 12: Temperaturas cámara de cocción

Donde:

- **TP4N1-I:** termopar instalado en el piso 4 de los tubos, nivel 1 (abajo), al inicio de la cámara de cocción.
- **TP4N1-M:** termopar instalado en el piso 4 de los tubos, nivel 1 (abajo), al medio de la cámara de cocción.
- **TP4N1-F:** termopar instalado en el piso 4 de los tubos, nivel 1 (abajo), al fondo de la cámara de cocción.
- **TP2N1-I:** termopar instalado en el piso 2 de los tubos, nivel 1 (abajo), al inicio de la cámara de cocción.
- **TP2N1-M:** termopar instalado en el piso 2 de los tubos, nivel 1 (abajo), al medio de la cámara de cocción.
- **TP2N1-F:** termopar instalado en el piso 2 de los tubos, nivel 1 (abajo), al fondo de la cámara de cocción.

5.2.2 Análisis de gases

5.2.2.1 Emisiones

Concentraciones de emisiones promedio

Durante el proceso se llevaron a cabo mediciones de la composición de los gases producto de la combustión y, por ende, de la concentración de cada una de las especies. En promedio, las concentraciones calculadas arrojaron las siguientes cifras las que cumplen la normativa medioambiental.

Tabla 21: Emisiones GP obtenidas en la medición

Especie	Cantidad	Unidad
<i>CO₂</i>	3,12	[%]
<i>O₂</i>	16,85	[%]
<i>SO₂</i>	-	[ppm]
<i>CO</i>	35,5	[ppm]
<i>NO_x</i>	-	[ppm]

6 Análisis y conclusiones

6.1 Quemador radiante

Las pruebas de caracterización del quemador entregan información relevante del comportamiento y funcionamiento de la tecnología. Los resultados evidencian que, efectivamente, un quemador de medios porosos inertes es de carácter “radiativo”, ya que, tal como se aprecia en el Gráfico 10, para las tasas de quemado evaluadas, más del 50% de la potencia térmica del quemador es emitida en forma de radiación, alcanzando incluso valores por sobre el 80%. Esto, teóricamente, es la clave para conseguir una alta eficiencia en aplicaciones térmicas, ya que la transferencia de calor por radiación es mucho más directa y manejable que la transferencia de calor por convección. Gracias a esto, es posible desarrollar un mismo trabajo consumiendo menos combustible, debido a la reducción de las pérdidas de calor en los gases de combustión.

Respecto a la tasa radiativa (RR), en el Gráfico 10 se observa que esta presenta una relación inversa con la tasa de quemado (FR) y la relación de aire (I). Es posible apreciar que, en la medida que se incrementa la potencia del quemador, y junto a ella la tasa de quemado, el nivel medio de la tasa radiativa desciende. Se obtienen niveles de tasa radiativa entre un 25% y un 50% para una tasa de quemado de 2000 kW/m², mientras que para 500 kW/m² la tasa radiativa fluctúa entre un 50% y un 80%. Con esto, es de esperar que, si se incrementa aún más la tasa de quemado, no se consigue una ganancia respecto a la tasa radiativa, sino más bien, se incrementa la potencia convectiva, lo cual no es el objeto para este tipo de quemador.

Sin embargo, al analizar los Gráficos 1 al 4, es posible determinar que, si bien, el incremento en la tasa de quemado no eleva la tasa radiativa, si permite alcanzar mayores temperaturas, lo que se traduce en una mayor potencia radiativa en términos absolutos. Este análisis sugiere que es posible hallar un punto de operación, según cual sea el propósito buscado en la aplicación, que permita optimizar el desempeño del quemador. Por ejemplo, para esta aplicación (horno industrial) que demanda una alta temperatura, es necesario trabajar a tasas de quemado más altas, optimizando el consumo de combustible para maximizar la temperatura del MPI y la potencia radiativa. Por otro lado, para una aplicación de mediana o baja temperatura, es preferible trabajar con un quemador de gran superficie radiante a tasas de quemado muy bajas, optimizando así el consumo de combustible para maximizar la tasa radiativa.

Por otro lado, en términos generales, se observa una relación inversa entre la tasa radiativa y la relación de aire. Este resultado es bastante lógico, ya que, al aumentar la relación de aire, en términos simples, se está agregando más flujo de aire frío a la combustión, por lo que la temperatura del medio poroso, la potencia radiativa y la tasa radiativa decrecen. Esta tendencia se hace más visible en los Gráficos 7 y 8 que en los demás. Una posible explicación a este fenómeno es que, a menores tasas radiativas, existe una menor estabilidad en la combustión, lo que produce mayores fluctuaciones y heterogeneidad de condiciones en la matriz porosa, que se refleja en los gráficos. En este punto es importante mencionar que la medición de temperatura y potencia radiativa realizada con el pirómetro sólo capta una pequeña porción de la superficie total del medio poroso, la cual representa un pequeño porcentaje de su totalidad, por lo que cualquier perturbación local puede afectar la medición indicando valores no representativos.

Finalmente, las pruebas de análisis de gases verifican que el quemador desempeña una combustión apropiada y cumple la normativa de emisiones en las condiciones evaluadas, no superando las 70 ppm de CO (valor límite normativo) y con nulas emisiones de NO_x, lo cual verifica el beneficio de la tecnología en cuanto a la reducción de emisiones.

7 Referencias

- [1] QUEMPIN, “Informe final fase piloto: QUEMPIN”, Octubre 2017, Valparaíso, Chile.
- [2] Maigas, “Catálogo Maigas”. Sitio: <https://www.maigas.cl/maigas/fichas/panaderia/5%20m2.pdf>
- [3] Khamal, M. M. & Mohamad, A. A. (2006). Combustion in porous media. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 220(5):487-508.
- [4] Khriscia Utria, Freddy González, and Mario Toledo. Combustión de mezclas ricas de etano aire en medios porosos inertes. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 21(1):159–166,2013
- [5] Dimosthenis Trimis, Olaf Pickenacker, and Klemens Wawrzinek. Porous Burners, pages 484–508. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [6] Friedrich-Alexander University Institute of FluidMechanics (LSTM). Combustion in porousinert media.
- [7] Manual Usuario Quemador Joannes Sitio: http://atcsat.es/Tar16/JOA/Man_Jm_3_6_9.pdf
- [8] QUEMPIN, “Informe de evaluación de eficiencia energética línea base gas”
- [9] Norma Chilena Oficial NCh 3111.of2007

8 Anexos

8.1 Anexo1: Matriz de pruebas – Desempeño del quemador

Condiciones de operación		Variables a medir			
Tasa de quemado	Potencia	Relación de aire	T° del MPI	Potencia radiativa	Tasa Radiativa
500 kW/m ²	12,15 kW	mín.			
500 kW/m ²	12,15 kW	...			
...	...	máx.			
1000 kW/m ²	24,3 kW	mín.			
1000 kW/m ²	24,3 kW	...			
...	...	máx.			
1500 kW/m ²	36,45 kW	mín.			
1500 kW/m ²	36,45 kW	...			
...	...	máx.			
2000 kW/m ²	48,6 kW	mín.			
2000 kW/m ²	48,6 kW	...			
...	...	máx.			

8.2 Anexo1: Matriz de pruebas – Análisis de gases

Condiciones de operación					
Potencia	Tasa de quemado	Relación de aire	CO	No _x	Temperatura de los gases
24,3 kW	1000 kW/m ²	~1,5			
36,45 kW	1500 kW/m ²	~1,5			