

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO – CHILE



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
BANCO DE PRUEBAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE QUEMADORES
DE MEDIOS POROSOS INERTES BAJO LA
NORMATIVA DE CERTIFICACIÓN
CHILENA”**

PAULA ANDREA PERALTA PEÑA

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

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. RER.NAT. ING. HERNAN OLGUÍN A.

ABRIL 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mis papás Brenda y Hernán, quiero que sepan que este logro es tan mío como de ustedes, que valoro y entiendo que este es una meta por la cual ustedes vienen trabajando desde mucho antes que yo misma tuviera conciencia de que la quería. Literalmente ustedes hicieron esto posible y nunca les voy a terminar de dar las gracias por ello y sinceramente espero algún día poder devolverles la mano por todo. Obviamente también gracias a mis dos hermanitos, no saben cuánto se agradece toda la fe de su parte, ojalá esto sea motivo de orgullo para ustedes tanto como ustedes lo son para mí.

Siguiendo los agradecimientos a toda la buena y linda gente del departamento de mecánica. La suma de todas las manos que se me tendieron en este viaje fue lo que resultó en que hoy pueda decir que está terminado. ¡Un honor aprender con y de ustedes! Los voy a recordar con infinito cariño.

Por último y no menos importante a mis amigos; los que han estado conmigo desde la semana uno y a los que se han ido sumando en el camino. Si pudiera devolver el tiempo lo haría todo exactamente igual, cada persona, cada risa, cada salida, cada noche de estudio, cada buen y no tan buen momento fue lo que me dio la oportunidad de conocerlos e hicieron que estos ultimo años fueran los mejores que hubiese podido esperar. Así que no me queda más que dar las gracias a mi suerte por tener el privilegio de ser mitad 04 y mitad de la mejor carrera. Mención honrosa al Andrecito, fuiste refugio y familia desde el comienzo, motivos sobran para darte las gracias.

DEDICATORIA

*A mis estrellitas color rojo más importantes:
Illita, Silvia, Modesto, Hernán y Elena.*

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación presenta tres ejes principales desarrollados en el marco del estudio de quemadores radiativos.

El primer eje corresponde al estudio de la NCh 3111, que establece estándares de construcción y funcionamiento exigidos para quemadores automáticos de aire forzado que funcionan con combustibles gaseosos, con el fin de poder aterrizar los ensayos desde la generalidad de la normativa a la particularidad del caso presentado en este informe, que corresponde a quemadores radiantes de premezcla diseñados para trabajar con potencias variables y sin desprendimiento de llama. Este eje contiene requerimientos de la cámara de combustión para poder medir y controlar los parámetros solicitados de forma adecuada, descripción de los ensayos en conjunto con su respectivo criterio de aprobación ordenados de una manera acorde al check list de aprobación que maneja el personal de la SEC para certificar los quemadores.

El segundo eje corresponde al diseño de una cámara de combustión según la normativa chilena para la adecuada caracterización de un quemador. Se desarrollan planos de construcción de la cámara, listado de piezas y se plantean dos alternativas de materiales para su construcción: 304L para las piezas en contacto directo con los gases resultantes o A36 para todo el conjunto. Cada alternativa viene con 3 cotizaciones referenciales asociadas que revelaron una diferencia de 500.00 CLP entre ambas alternativas siendo 250.000 CLP el costo de la más económica que correspondería a la manufacturada con A36. Se complementa con una comparación entre el tiempo de encendido que podría estar el quemador en cada alternativa sin llegar a la temperatura crítica del acero según corresponda; dicha comparación reveló que la diferencia de tiempo entre ambas temperaturas no se condice la diferencia de precio, con una variación de 30% en el tiempo de ambas. Es entonces que queda abierta la recomendación de material acorde a lo que se apunte con la construcción de la cámara. Se suma un detalle del sistema de monitoreo y control, comparándose con los instrumentos disponibles concluyéndose que cumplen con la precisión requerida.

El tercer eje corresponde al diseño y construcción del sistema estructural de un banco de pruebas para medición de radiación para medios porosos. Estructura fue construida con perfiles ensamblables de aluminio, lo que le brinda la capacidad de acomodarse a distintos sistemas que acompañan los quemadores y a distintas geometrías y tamaños que podrían tener. Se detallan características de los perfiles de aluminio, dimensiones de los elementos que conforman el sistema estructural, beneficios de este tipo de diseño y las etapas de construcción de la estructura completa. Importante destacar que las dimensiones máximas de la estructura fueron diseñadas teniendo en cuenta la posterior instalación de la cámara de combustión diseñada en el segundo punto.

Palabras claves: *NCh 3111, banco de pruebas, hogar de combustión, caracterización de quemadores, quemadores de medios porosos.*

ABSTRACT

The present research work presents 3 main axes developed in the framework of the study of radiative burners.

The first axis corresponds to the study of the NCh 3111, which dictates construction standards and performance required for forced air burners that operate with gaseous fuels, in order to be able to land the tests from the generality of the regulations to the particularity of the case presented in this report, which corresponds to pre-mix radiant burners designed to work with variable powers and without flame release. This axis contains requirements of the combustion chamber to be able to measure and control the requested parameters in an appropriate manner, description of the tests in conjunction with their respective approval criteria ordered in a manner consistent with the approval checklist handled by SEC personnel to certify the burners.

The second axis corresponds to the design of a combustion chamber according to Chilean regulations for the proper characterization of a burner. Are developed plans of construction of the chamber, list of pieces and two alternative materials for its construction are proposed: 304L for the pieces in direct contact with the resulting gases or A36 for the whole set. Each alternative comes with 3 associated referential quotes that revealed a difference of 500.00 CLP between both alternatives being 250,000 CLP the cost of the cheapest one that would correspond to the one manufactured with A36. It is complemented by a comparison between the ignition time that the burner could be in each alternative without reaching the critical temperature of the steel, as appropriate; This comparison revealed that the difference in time between the two temperatures does not match the price difference, with a variation of 30% in the time of both. It is then that the recommendation of material according to what is noted with the construction of the camera remains open. A description of your monitoring and control system is added and they are contrasted with what is available in the facilities: instruments accomplish the required precision.

The third axis corresponds to the design and construction of the structural system of a test bench for radiation measurement for porous media. Structure was built with aluminum assemblable profiles, which gives the ability to accommodate different systems that accompany the burners and different geometries and sizes that could have. Details of the aluminum profiles, dimensions of the elements that make up the structural system, benefits of this type of design and the construction stages of the complete structure are detailed. Important to note that the maximum dimensions of the structure were designed taking into account the subsequent installation of the combustion chamber designed in the second point.

Keywords: *NCh 3111, test bench, combustion hearth, characterization of burners, porous media burners.*

GLOSARIO

Abreviaturas

MPI	Medios porosos inertes
BDP	Banco de pruebas
HDC	Hogar de combustión
COVDM	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano

Lista de símbolos

λ	Relación aire combustible	[-]
H	Poder Calorífico	$[MJ/m^3]$ o $[MJ/kg]$
ρ_r	Densidad relativa	[-]
W	Índice de Wobbe	$[kJ/Nm^3]$
V	Consumo volumétrico	$[m^3/h]$
M	Consumo másico	$[kg/h]$ o $[g/h]$
Q	Consumo calorífico	[kW]
l_1	Longitud del Hogar	[m]
φ	Eficiencia de combustión	[-]
P	Presión	[mbar]

Nomenclaturas químicas

N	Nitrógeno
O_2	Oxígeno
CO_2	Dióxido de carbono
H_2O	Agua
S	Azufre
SO_2	Dióxido de azufre
SO_3	Trióxido de azufre

C	Carbono
H_2	Di hidrógeno
CO	Monóxido de carbono
OH	Hidróxido
NO_x	Óxidos de nitrógeno
NO	Monóxido de nitrógeno
NO_2	Dióxido de nitrógeno
N_2O_4	Tetraóxido de dinitrógeno
N_2O_5	Pentaóxido de dinitrógeno
CH_4	Metano

Subíndices

s	Superior
i	Inferior
n	Nominal
min	Mínimo
max	Máximo

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	II
RESUMEN EJECUTIVO	III
ABSTRACT	IV
GLOSARIO.....	V
ÍNDICE	VII
INTRODUCCIÓN	X
OBJETIVOS.....	XII
Objetivos Generales	XII
Objetivos Específicos	XII
DESARROLLO DEL TEMA.....	1
1 Marco Teórico	1
1.1 Combustión	1
1.1.1 Combustible y combustión.....	1
1.1.2 Combustión completa e incompleta	1
1.1.3 Eficiencia de combustión	2
1.1.4 Relación aire combustible	2
1.1.5 Mezclas ricas y pobres	2
1.1.6 Temperatura de flama adiabática	3
1.1.7 Combustión eficiente y análisis gases resultantes	3
1.2 Quemadores	4
1.2.1 Clasificación de los quemadores	5
1.2.2 Elementos auxiliares de los quemadores.....	7
1.3 Gas natural	8
1.4 Términos termodinámicos específicos relativos a la norma	8
1.4.1 Términos generales.....	8
1.4.2 Combustibles gaseosos	8
1.4.3 Consumo de gas	10
1.4.4 Presiones de ensayo.....	10
1.5 Combustión de medios porosos	11
1.5.1 Principio de operación	11
1.5.2 Ventajas.....	13
1.5.3 Quemadores de medios porosos	14
1.6 Tecnología de perfiles ensamblables.....	14
1.7 Aceros y solicitudes térmicas.....	16
1.7.1 Definición	16
1.7.2 Clasificación.....	16

1.7.3	Acero y temperatura	17
2	Normativa Chilena NCh 3111	19
2.1	Generalidades	19
2.1.1	Contexto normativa	19
2.1.2	Alcances.....	20
2.1.3	Condiciones de ensayo.....	20
2.1.4	Generalidades procedimientos de ensayos	20
2.1.5	Exactitud de las mediciones	21
2.2	Requisitos de diseño hogar según normativa	22
2.2.1	Medio refrigerante	25
2.2.2	Evaluación de los productos de combustión	25
2.3	Diseño del hogar de combustión.....	26
2.3.1	Selección de material	28
2.3.2	Costo y proveedores	30
2.3.3	Evaluación de alternativas	32
2.3.4	Sistemas de monitoreo y control	35
2.4	Requisitos de funcionamiento	38
2.4.1	Prebarrido	38
2.4.2	Consumo calorífico de encendido.....	39
2.5	Descripción de ensayos de operación.....	40
2.5.1	Resistencia del quemador al sobrecalentamiento.....	40
2.5.2	Temperatura de los dispositivos de regulación y seguridad	41
2.5.3	Rango de consumo calorífico del quemador	41
2.6	Ensayos definidos por los diagramas de funcionamiento y ensayos	41
2.6.1	Consideraciones	42
2.6.2	Diagrama de funcionamiento.....	43
2.6.3	Diagrama de ensayo	45
3	Diseño Banco de pruebas quemador de medios porosos.....	46
3.1	Generalidades.....	46
3.1.1	Requerimiento banco de pruebas.....	50
3.2	Sistema de medición	51
3.3	Sistema estructural	51
3.3.1	Accesorios perfiles ensamblables	51
3.3.2	Elementos estructurales en base a perfiles de aluminio	55
3.4	Ejemplo de Mediciones	57
4	Proceso de construcción	58
4.1	Dimensionado de perfiles.....	58
4.2	Instalación de elementos de unión	59
4.3	Instalación de accesorios simple ensamble	60
4.4	Instalación soporte sistema de medición	60
4.5	Registro fotográfico estructura completa.....	61
	CONCLUSIONES	63
	REFERENCIAS.....	65

ANEXOS.....	68
A. Planos de construcción hogar de combustión según normativa.	68
B. Listado de piezas y materiales para la construcción del hogar de combustión ..	77
C. Resumen de costos y proveedores por material	80
D. Cálculos sistema radiativo para ambas alternativas.....	82
E. Cálculo presión máxima dentro de la cámara de combustión	93
F. Cálculo de consumo calorífico nominal del quemador	94
G. Diagrama de funcionamiento y ensayos para quemadores de potencias variables.	95
H. Check list ensayos extracto certificado de aprobación quemador	96
I. Listado de piezas requeridas para armar los módulos.	99

INTRODUCCIÓN

Actualmente se ve tanto en Chile como en el mundo un interés por la utilización de nuevas tecnologías de combustión cada vez más eficientes que ayuden a disminuir el consumo de combustible e incrementen la eficiencia térmica de los procesos en aplicaciones industriales, todo ello motivado por la incertidumbre en los precios de los combustibles fósiles, los pronósticos que hablan de limitadas reservas de petróleo en las décadas venideras, las políticas de producción más limpia con mínimos impactos ambientales y la necesidad de incrementar la competitividad para asegurar la permanencia en el mercado.

Lo anterior ha conducido la investigación y el desarrollo tecnológico en sistemas que permitan recuperar el calor residual de los gases de escape para precalentar el aire de combustión. La implementación de este sistema de combustión con aire a alta temperatura toma importancia ya que influye sobre las características de la combustión ampliando los límites de inflamabilidad, incrementando la velocidad de combustión, aumentando la temperatura de llama y maximizando el calor disponible en los procesos. Estos efectos combinados mejoran la estabilidad de llama y la combustibilidad de gases de bajo poder calorífico.

Esta tecnología descrita recientemente se puede aterrizar en una amplia gama de aplicaciones industriales, mediante su utilización en la fabricación de quemadores radiantes de medios porosos de alta eficiencia.

Un tema imperante cuando se trabaja en sacar al mercado nuevas tecnologías, más aún cuando involucra artefactos que trabajan con gases inflamables, es garantizar al consumidor que está accediendo a una alternativa segura y con propiedades superiores a la opción tradicional. Para cumplir el primer punto, es importante que cumpla con todos los requerimientos definidos por la normativa chilena e internacional referente a los quemadores automáticos de aire forzado que trabajan con combustibles gaseosos. Por otro lado, para cumplir el segundo punto es importante tener la claridad de las ventajas que se están ofreciendo, mediante el conocimiento de los parámetros que puede ofrecer este tipo de tecnología.

Cuando se habla de la medición de parámetros referentes a artefactos que trabajan con gases inflamables es importante la exactitud y las condiciones en las cuales se llevan a cabo las mediciones y no es factible enviar el quemador a una entidad externa dependiente de la SEC en cada etapa del desarrollo de esta tecnología, es entonces que nace la motivación de instaurar una estación de medición de parámetros constantemente disponible para su uso.

Este documento en concreto se enfoca en el desarrollo del diseño y construcción de un banco de prueba para la caracterización de quemadores de medios porosos, diseñado

acorde a la normativa chilena vigente para quemadores de aire forzado que trabajan con combustibles gaseosos.

Cabe resaltar que, si bien se diseñó teniendo en mente la caracterización de los quemadores de medios porosos apuntando a su posterior certificación, también se puede utilizar para quemadores de llama libre cuya longitud de llama sea menor a un metro y que cumple con las dimensiones definidas más adelante.

De la mano con el diseño de la cámara de combustión, en este documento también se encontrará una breve descripción de los ensayos que se deben llevar a cabo en él y además un registro de la construcción del sistema estructural que lo sostiene, que también se puede utilizar para la toma de mediciones de la radiación de quemadores de manera cómoda y flexible.

De este modo, lograr contribuir y potenciar el desarrollo del estudio de esta tecnología dentro de la UTFSM, permite entregar una herramienta disponible en las mismas instalaciones con la cual pueden evaluar el desempeño de los quemadores que proponen insertar en el mercado y si éste cumple con los requisitos de eficiencia y medio ambientales exigidos por la normativa chilena.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es el diseño de un banco de pruebas que cumpla con todos los requisitos exigidos para llevar a cabo los ensayos decretados por la normativa chilena relativa a los quemadores automáticos de aire forzado que trabajen con combustibles gaseosos y la construcción de un sistema estructural que le de soporte y que se pueda utilizar también como estación para medir la radiación de quemadores de medios porosos.

Junto con la instalación del banco de prueba este estudio pretende tener la utilidad de ser utilizado como manual que resuma los ensayos que se deben llevar a cabo en él, para confirmar que los quemadores que posteriormente van a ser testeados cumplan con los requisitos de eficiencia y medioambientales que exige el estado chileno para en el futuro puedan ser llevados al mercado.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Diseñar un hogar de combustión que cumpla con todos los requerimientos para llevar a cabo los ensayos que conlleven a la certificación de quemadores de aire forzado que funcionen con combustibles gaseosos. Diseño también contempla sistema de control y propuesta de sistema de medición.
- Prestación de alternativas de materiales y presupuestos para la construcción efectiva del hogar diseñado. Las alternativas incluyen análisis termodinámico para comparar la durabilidad de los materiales que lo conforman con el quemador puesto en marcha.
- Diseño y construcción de un sistema estructural que sea capaz tanto de dar soporte al hogar de combustión mencionado en el punto anterior, como además de cumplir con los requisitos de flexibilidad suficiente para poder instalar quemadores de medios porosos de distintos tamaños y geometrías, para ensayos de toma de muestra de radiación y temperatura de la superficie del quemador.
- Presentación de resultados de medición a modo de ejemplificar el potencial de medición del banco en formato de medición de radiación.
- Creación de un manual que contenga información de forma resumida los ensayos que se deben llevar a cabo en el banco de pruebas, en un formato simple que detalle las condiciones de ensayo y los criterios de aprobación para los parámetros que son posibles medir en el banco de pruebas propuesto. En pos de llevar a cabo un trabajo práctico, este manual se ordenará en base al check list que utiliza la SEC para la certificación.

DESARROLLO DEL TEMA

1 Marco Teórico

El objetivo de esta sección es la de entregar las definiciones de los conceptos que se utilizarán en el contexto del diseño del banco de pruebas para quemadores de MPI y su correspondiente metodología de ensayo, así como la de los conceptos termodinámicos involucrados en el tema.

1.1 Combustión

Para poder comprender el proceso de combustión en medios porosos es importante primero definir los conceptos básicos relativos a la teoría de la combustión.

1.1.1 Combustible y combustión

La combustión es una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía en forma de luz y calor.

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono, por ende, reciben el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_nH_{2n+2} . Los combustibles se pueden encontrar en estado sólido, líquido o gaseoso y pueden ser extraídos directamente de la naturaleza, como el caso del gas natural, o puede pasar por una serie de tratamientos mecánicos y/o químicos para su obtención, como es el caso del petróleo.

1.1.2 Combustión completa e incompleta

En términos de componentes químicos, en una reacción de combustión el hidrocarburo reacciona con un oxidante, que es normalmente aire (79% N y 21% O_2), para formar CO_2 , H_2O y N. Además, el combustible puede contar con un porcentaje de S en su composición, elemento que se oxida como SO_2 .

La reacción descrita anteriormente se cumple solo en el contexto que la reacción tenga la cantidad suficiente de oxígeno para que se oxide en su totalidad el combustible hidrocarburo. En otras palabras, un proceso de combustión es completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre (en el caso que esté presente en los productos) se transforma en SO_2 . Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes no quemados, como C, H_2 , CO, o bien, OH.

Como fue mencionado anteriormente, la insuficiencia de oxígeno es la principal razón para la combustión incompleta, sin embargo, no es la única, también podría atribuirse a un mezclado poco homogéneo del combustible en la cámara de combustión aun si

hay más oxígeno del necesario para la combustión completa. Esto puede atribuirse al mezclado durante el limitado tiempo en que el oxígeno y el combustible quedan en contacto.

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente el oxígeno sin combinar el producto de los gases. [1]

1.1.3 Eficiencia de combustión

La eficiencia de combustión en términos generales corresponde a la proporción de carbono total en el combustible que se oxida hasta CO_2 . Este parámetro se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\varphi = \frac{y_{CO_2}}{y_{CO_2} + y_{CO}}$$

Donde:

y_{CO_2} : Composición volumétrica de CO_2 en los gases resultantes de combustión.

y_{CO} : Composición volumétrica de CO en los gases resultantes de combustión. [2]

1.1.4 Relación aire combustible

Esta relación es utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire en la mezcla a quemar. Suele expresarse en una base de masa, aunque también se puede expresar en base molar, y se define como la razón entre la masa del aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Comúnmente se expresa mediante el símbolo λ .

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa. La cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica se llama exceso de aire y se expresa en términos porcentuales en relación al aire teórico estequiométrico.

1.1.5 Mezclas ricas y pobres

Para que la combustión se produzca, es necesario que la relación de aire combustible de la mezcla se encuentre dentro de determinados valores que dependen del combustible a utilizar. Cuando la razón aire combustible está bajo dicho rango se habla de una mezcla pobre, caso contrario si la mezcla se encuentra sobre dicho rango se habla una mezcla rica en combustible. En este mismo espectro, entre medio de los rangos determinados por las mezclas pobres y ricas, se encuentra el rango de inflamabilidad, que corresponde al rango de relaciones de aire y combustible donde el combustible es capaz de combustionar.

1.1.6 Temperatura de flama adiabática

En ausencia de cualquier interacción de trabajo y transferencias de energía en cualquiera de sus formatos, la energía química liberada durante un proceso de combustión se pierde como calor hacia los alrededores o se reutiliza para el proceso que se estime conveniente. Cuanto más pequeña es la pérdida de calor, mayor es el aumento de la temperatura. En el caso límite en que no haya pérdida de calor hacia los alrededores, la temperatura de los productos alcanzará un máximo, conocido como temperatura de flama adiabática, situación se grafica en la Figura 1 donde se observa que la temperatura de una cámara de combustión será máxima cuando la combustión sea completa y no se libere calor a los alrededores. [1]

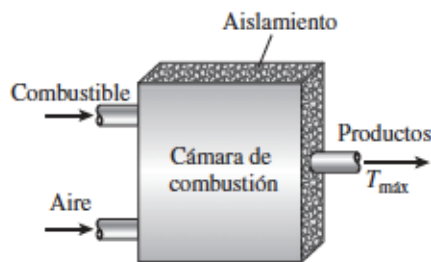


Figura 1 Cámara adiabática

1.1.7 Combustión eficiente y análisis gases resultantes

Los productos obtenidos de la combustión de cualquier combustible se denominan productos de combustión, la composición de estos productos depende del tipo de combustible utilizado, de la relación de aire combustible, del estado de operación del equipo y de las condiciones que se efectúa la combustión. Las emisiones no inocuas relacionadas con el uso de la energía incluyen las emisiones de CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x (Mezcla de NO , NO_2 , N_2O_4 y N_2O_5), CO y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (p. ej. olefinas, cetonas y aldehídos), así como las emisiones de SO_2 [3].

1.1.7.1 Productos de combustión del carbono

Las emisiones de dióxido de carbono proceden de la oxidación del carbono de los combustibles durante la combustión. En condiciones de combustión óptimas, el contenido total de carbono de los combustibles debería convertirse en CO_2 . Sin embargo, los procesos de combustión reales no son perfectos y la consecuencia de ello es que se producen pequeñas cantidades de carbono parcialmente oxidado y no oxidado.

El CO se produce en las primeras etapas de la combustión, como resultado de una combustión incompleta del carbono combustible y casi inmediatamente reacciona con O_2 para formar CO_2 y así el carbono original queda completamente oxidado. Para que la segunda oxidación se realice antes de que los gases salgan de la región reactiva de la flama, se requiere un buen mezclado de aire – combustible.

Si no se propicia esta mezcla, los gases de combustión tendrán altas concentraciones de CO y de oxígeno sin reaccionar, lo que implica una disminución de eficiencia del generador de calor y para evitar esto, el combustible se quema con exceso de carburante.

Por lo tanto, a modo de síntesis, el flujo de carbono para un proceso de combustión típico se puede describir de la siguiente manera:

- La mayor parte del carbono es liberado de forma inmediata como CO_2 .
- Una pequeña fracción del carbono no se oxida como CO_2 por falta de oxígeno, y se transforma en CH_4 , CO y compuestos orgánicos volátiles distintos del metano.
- El resto del carbono permanece sin quemar (es decir, también son resultados de la combustión incompleta del carbón) en forma de hollín y ceniza. [4]

1.1.7.2 Productos de la combustión del nitrógeno

El nitrógeno está considerado como un elemento inerte pero a muy altas temperaturas parte del volumen de nitrógeno contenido en el aire reacciona con el oxígeno formando diversos NO_x , que se agregan a los productos de combustión. La composición de los NO_x depende del tipo de combustible, de la relación aire – combustible y de las condiciones que se lleve a cabo la combustión (Turbulencia, grado y tiempo de mezclado).

Entre los óxidos nitrosos disponibles, se destaca la formación del dióxido de nitrógeno, que es un gas de olor fuerte, irritante y asfixiante. Además, cuando reacciona con la humedad del ambiente se forman ácidos nítricos y nitrosos, los cuales caerían como lluvia ácida.

1.1.7.3 Productos de la combustión de azufre

Si el combustible contiene S en su composición, el S del combustible se oxida a dióxido de azufre en las primeras etapas del proceso de combustión. En las últimas etapas de combustión una cantidad muy pequeña de SO_2 (menor al 3%) se oxida a trióxido de azufre SO_3 .

Este SO_3 es susceptible de descomponerse al combinarse con el vapor de agua de los gases de combustión, para formar ácido sulfúrico, el cual puede causar problemas de corrosión y también es causante de la lluvia ácida. [5]

1.2 Quemadores

Los quemadores son aparatos o mecanismos cuya función es preparar la mezcla de combustible más carburante, que es generalmente aire, para luego quemarla y producir calor. Los quemadores pueden operar con combustibles líquidos o gaseosos, para los combustibles en estado sólido se utilizan distintas tecnologías de parrillas industriales.



Figura 2 Quemador industrial estándar

1.2.1 Clasificación de los quemadores

En términos generales, dependiendo del parámetro a considerar, existen diversos criterios para la clasificación de un quemador:

1.2.1.1 Estado físico del combustible

Como fue mencionado anteriormente, un quemador puede operar con combustibles que se encuentren en estado líquido o gaseoso, para los dos casos se hace una diferenciación en el diseño del quemador y en su principio de operación.

- Quemadores que operan con combustibles líquidos: Combustible previo a entrar a la cámara de combustión debe pasar por un mecanismo mecánico que convierta el flujo de combustible en gotas pulverizadas de tamaño reducido antes de entrar a la cámara de combustión. Este proceso tiene el nombre de atomización y su objetivo es el de aumentar la superficie de contacto entre aire y combustible.
- Quemadores que operan con combustibles gaseosos: La principal clasificación de este tipo de quemadores es si son quemadores difusionales o de premezcla. En este caso el gas combustible o la mezcla de aire y combustible se inyectan por el quemador y mediante un sistema de ignición se prende la llama.

1.2.1.2 Tiempo de mezclado del combustible gaseosos y el combustible

En el caso particular de los combustibles gaseosos, se hace la distinción entre los lugares donde se lleva a cabo la mezcla de carburante y combustible. Como ya fue mencionado existen dos tipos:

- Quemadores de premezcla: Quemador en el que parte o la totalidad del aire necesario para la combustión completa del gas, se mezcla con éste antes de los orificios de salida de la mezcla. El mezclador es la parte del conjunto del quemador más sus accesorios donde se produce la turbulencia necesaria para asegurar una mejor mezcla de gas y aire. En general, los quemadores de

premezcla se utilizan en recintos cerrados, para grandes potencias y procesos automáticos.

- Quemadores difusionales: En este sistema de combustión, la mezcla entre combustible y carburante se realiza en el propio quemador o en la descarga a la cámara de combustión. Se tienen así dos tipos de quemadores que emplean este sistema de combustión; el quemador con mezclado de cabeza, donde la mezcla se lleva a cabo como su nombre lo dice en los orificios de salida del quemador y los quemadores donde la mezcla se lleva a cabo al inicio de la cámara de combustión, entrando el aire y el gas por separado a la misma. [6]

1.2.1.3 Alimentación aire atmosférica o mecánica

Este parámetro clasifica los quemadores de acuerdo con la manera en que el quemador obtiene su aire primario para la combustión.

- Quemadores atmosféricos: Se emplean únicamente para combustibles gaseosos. En este tipo de quemadores el aire primario se induce en el propio quemador mezclado con el gas y el aire secundario se obtiene por difusión del ambiente alrededor de la llama.
- Quemadores mecánicos o de aire forzado: En este caso el aire de combustión es introducido mediante un ventilador. Esta definición se verá más en detalle en el punto 1.3.1

1.2.1.4 Potencia fija o variable

Un quemador puede operar con una o varios escalones de potencia. Bajo este parámetro se distinguen tres clasificaciones:

- Quemador de un escalón: Son quemadores que sólo pueden operar con la potencia que hayan sido diseñados, su regulación todo/ nada se utiliza para quemadores de pequeña potencia.
- Quemador de varios escalones: Son quemadores que pueden operar en más de una escala de potencia. Deben disponer de los elementos necesarios para poder regular la admisión de aire y el gasto de combustible, de modo que en cada escalón de potencia se obtenga el rendimiento de combustión lo más alto posible. Corresponde a quemadores de potencias intermedias o altas.

Se distinguen 2 tipos de quemadores de potencia variable:

- 1) Quemador de etapas: este quemador puede hacer llama de varios tamaños, dejando pasar más o menos combustible. El más sencillo es de tres etapas: todo-medio-nada, es decir que produce una llama mitad de la que es capaz de producir en condiciones de plena potencia, y otros de más etapas, aunque no suele tener más de cuatro: todo-dos tercios-un tercio-nada.

- 2) Quemadores modulantes: En este quemador, tanto para combustibles líquidos como gaseosos, puede modularse la llama por un sistema electrónico, que regula en función de las necesidades de calor, necesidades que conoce por una sonda situada en la conducción de retorno del sistema de calefacción; a menos temperatura, mayor potencia habrá que dar a la llama.

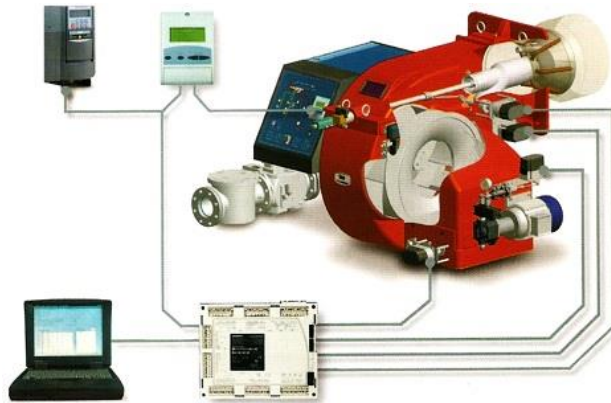


Figura 3 Quemador modulante con su respectivo sistema de control

1.2.2 Elementos auxiliares de los quemadores

Las condiciones de utilización de los equipos que poseen quemadores de gas exigen la presencia de dispositivos de encendido, control y seguridad. A continuación, se exponen estos elementos auxiliares

- Trampa de llama: En las mezclas de gases inflamables, la llama se propaga desde un punto de ignición al resto de la mezcla. Este fenómeno se conoce como deflagración, y la velocidad de avance de la llama o velocidad de deflagración depende de varios factores, como el tipo de quemador, combustible, etc. En algunos casos, debido a la baja presión del gas o del aire alimentado, se produce el paso del fluido con mayor presión a la canalización del fluido con menor presión. Por ende, se utilizan estos artefactos que se instalan en la parte inferior del quemador cuya función es solventar este problema.
- Sistemas de encendido: Para que comience la combustión de gas en un quemador, se utiliza un sistema de encendido. El sistema más sencillo consiste en una llama piloto encendida al lado del quemador principal, de forma que se provoque la combustión de la mezcla al momento que esta salga del quemador. Cabe aclarar que existen sistemas más sofisticados, pero no es el caso de este estudio. [7]

1.3 Gas natural

El gas natural corresponde a un combustible gaseoso de origen fósil que está constituida por una mezcla de hidrocarburos en la que su principal componente es el metano (CH_4), aunque contiene también otros hidrocarburos ligeros como el etano (C_2H_6), el propano (C_3H_8), el butano (C_4H_{10}) o el pentano (C_5H_{12}) en mucha menor proporción. El gas natural recibe este nombre porque se extrae directamente de la naturaleza y llega a los puntos de consumo sin haber experimentado prácticamente ninguna transformación química.

Tabla 1 Composición típica gas natural doméstico según proveedor

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH_4	81.86
Etano	C_2H_6	11.61
Propano	C_3H_8	1.92
Butano	C_4H_{10}	0.22
Pentano	C_5H_{12}	0.23
Nitrógeno	N_2	0.90
Dióxido de carbono	CO_2	3.18

Se utilizará en este proyecto gas natural como combustible para los MPI debido a las ventajas que tiene el gas natural por sobre los otros combustibles; ya que es un combustible gaseoso, relativamente económico, estable, de fácil acceso y almacenamiento y amigable con el medio ambiente. [8]

1.4 Términos termodinámicos específicos relativos a la norma

Si bien en el documento original de la normativa definen una vasta lista de términos, el objetivo de este punto es el de definir los términos generales y termodinámicos utilizados en la normativa importantes para la comprensión de los ensayos que se describirán en los puntos siguientes de este documento, recordar que los ensayos definidos serán solo los que comprometen el uso del banco de pruebas diseñado.

1.4.1 Términos generales

- Quemador automático de aire forzado: Quemador provisto de dispositivos de encendido, de control de llama y de accionamiento automáticos. El consumo calorífico del quemador se puede regular de forma automática o manual durante el funcionamiento.
- Cámara de combustión: También conocido como hogar de combustión, corresponde a un compartimiento cerrado que actúa como la parte del conjunto en la cual se realiza la combustión del aire y el gas.

1.4.2 Combustibles gaseosos

- Condiciones de referencia: 15°C y 1013,25 [mbar]

- Poder calorífico (H): Cantidad de calor producido por la combustión completa, a una presión constante e igual a los 1013,25 [mbar], de la unidad de volumen o de masa de gas, tomados los componentes de la mezcla de combustible en las condiciones de referencia, y siendo conducidos los productos de combustión en las mismas condiciones. Se puede cuantificar en energía producida por metro cúbico de combustible [MJ/m^3] o en energía producida por kilogramo de combustible [MJ/kg].

Se distinguen dos tipos de poder calorífico:

- Poder calorífico superior (H_s): Poder calorífico cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado.
 - Poder calorífico inferior (H_i): Poder calorífico medido sin considerar el calor latente del calor de agua de la combustión. El calor latente es la energía que necesita el agua para pasar de fase líquida a vapor.
- Densidad relativa (ρ_r): relación de masas de volúmenes iguales de gas y aire secos tomados en las mismas condiciones de temperatura y de presión. [9]
 - Índice de Wobbe: Clasifica los gases combustibles en familias acorde a su valor. Su cálculo es distinto dependiendo si corresponde al índice de Wobbe inferior (W_i) o superior (W_s), se calculan respectivamente como:

$$W_i = \frac{H_i}{\sqrt{\rho_r}} ; W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_r}}$$

Acorde a este indicador, los gases se distribuyen en 3 familias y cada familia se subdivide en grupos según su valor del índice de Wobbe. Desde un punto de vista práctico los gases de la misma familia son intercambiables, es decir tienen un comportamiento similar en los quemadores produciendo los mismos resultados de combustión (el mismo flujo calorífico y el mismo tipo de llama) sin necesidad de adaptar los quemadores. [10]

- Segunda familia de los gases: Gases cuyo índice de Wobbe está comprendido entre 9.680 y 13.860 [$kcal/m^3$], a esta familia pertenecen los gases naturales y las mezclas hidrocarburo – aire de alto W. Dentro de esta familia se distinguen 3 grupos [11]:

Tabla 2 Grupos segunda familia

Grupo	W [MJ/m^3]
H	45.7 – 54.7
L	39.1 – 44.8

E	40.9 – 54.7
---	-------------

- Turndown del quemador: Corresponde a un indicador de diseño del quemador y representa una relación entre la máxima y mínima tasa de transferencia de calor en la cual puede operar un quemador en condiciones correctas. A mayor turndown, mayor es el rango de calor que puede entregar el quemador. **[12]**
- Gas de referencia: Dentro de cada familia o grupo, el gas de referencia corresponde al gas para el cual el quemador ha sido diseñado
- Gases límites: Gases de ensayo que corresponden a los extremos de una familia o grupo específico. En otras palabras, el gas natural es un término amplio en el sentido de que los porcentajes en volumen en los cuales se encuentran sus componentes corresponden a rangos; por lo tanto, los gases límites de ensayo se clasificarían como gas natural cuando sus componentes se encuentran en el límite del rango de lo admisible.

1.4.3 Consumo de gas

Para cada unidad de medida de consumo de gas a definir en los puntos a continuación se distinguen 3 tipos:

- Nominal: Consumo de gas indicado por el fabricante.
- Mínimo: Consumo mínimo de gas indicado por el fabricante.
- Máximo: Consumo máximo de gas indicado por el fabricante.
- Consumo volumétrico (V): Volumen de gas consumido por el quemador en funcionamiento continuo durante una unidad de tiempo definida. En este contexto se medirá en $[m^3/h]$
- Consumo másico (M): Masa de gas consumida por el quemador en funcionamiento continuo durante una unidad de tiempo definida. En este contexto se medirá en $[kg/h]$ o eventualmente $[g/h]$.
- Consumo calorífico (Q): Cantidad de energía consumida por unidad de tiempo correspondiente al producto del consumo volumétrico o másico por el poder calorífico del gas, pudiendo considerarse el poder calorífico inferior o superior. Se mide en $[kW]$

1.4.4 Presiones de ensayo

- Presión normal: Presión con la cual los quemadores funcionan en las condiciones normales, cuando están alimentados con el gas de referencia, que en este caso correspondería al gas natural.
- Presiones límites: Presiones representativas de las variaciones extremas de las condiciones de operación del quemador.

Se definen los puntos de toma de presión en la cámara de combustión:

- Presión de la cámara de combustión: Presión o depresión efectiva en la cámara de combustión en relación con la presión atmosférica. Se mide mediante una toma de presión posicionada en la puerta de la cámara de combustión.
- Presión de salida de los gases: Presión de los gases resultantes de combustión. Se mide aguas arriba mediante sondas posicionadas en tubos que decantan en la chimenea del conjunto. [9]

1.5 Combustión de medios porosos

La combustión en medios inertes (MPI), es una variante del proceso de combustión de llama libre en la cual se inserta una estructura sólida porosa que se dice inerte ya que no interviene ni modifica su estructura química al momento de llevar a cabo el proceso de la combustión. [13]

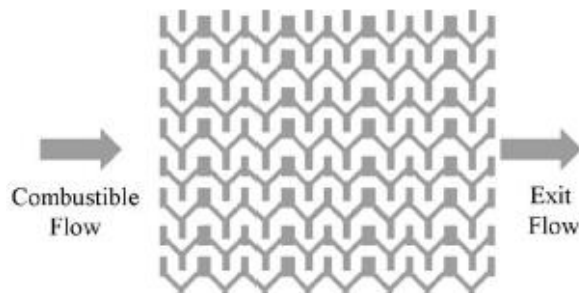


Figura 4 Representación estructura MPI

1.5.1 Principio de operación

La estructura sólida porosa mencionada anteriormente dentro de la cual se lleva a cabo la combustión, corresponde a una matriz sólida de cavidades abiertas suficientemente grandes para sostener la combustión. El principio de funcionamiento se puede representar de forma más clara en la figura 5.

En ella se puede identificar 3 zonas; la zona A que corresponde a la zona de precalentamiento, que se caracteriza por tener una porosidad de pequeño tamaño y es donde se precalienta la mezcla de aire y combustible. En segundo lugar, está la zona B, que corresponde a una matriz porosa de mayor tamaño donde se lleva a cabo la combustión y por último la zona C que corresponde a la zona de expulsión de los gases de combustión. [14]

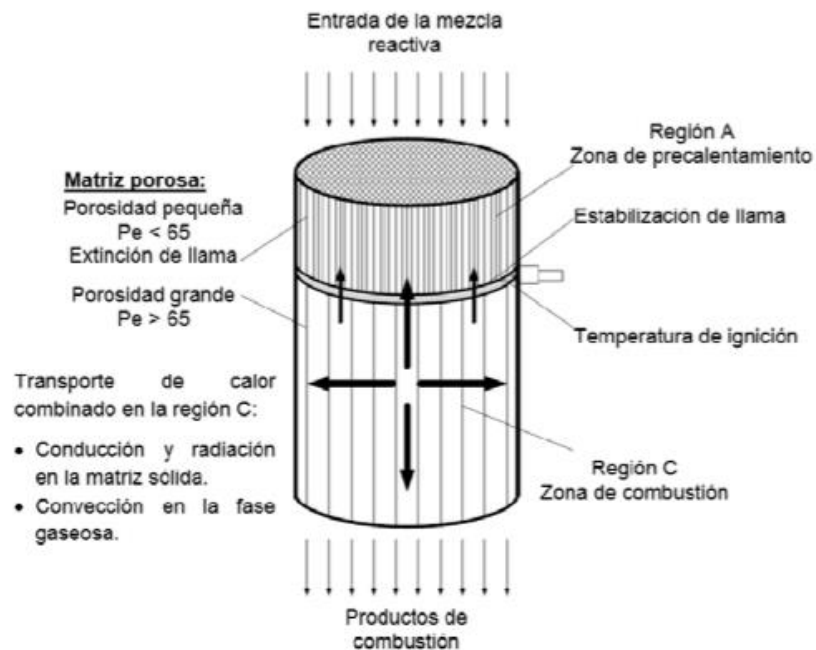


Figura 5 Principio de funcionamiento

Los perfiles de temperatura en el sólido y gas son como los que se muestran en la Figura 6. Reporta que mediante estos sistemas es posible recuperar hasta un 25% de la energía que entra con el combustible. [15]

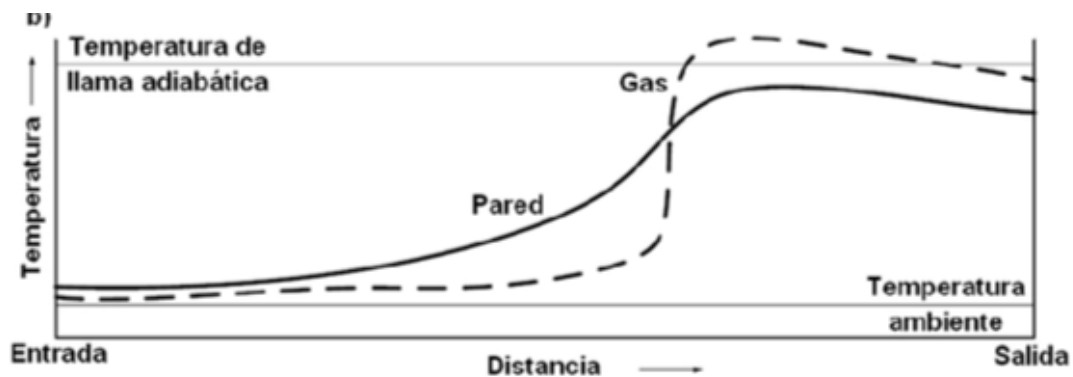


Figura 6 Perfil de temperatura de gas y paredes sólidas medio poroso

El concepto de exceso de entalpía en el proceso de combustión dentro de un MPI, describe un proceso en el cual la llama producida en la zona de combustión calienta por convección el medio sólido que a su vez transfiere el calor por conducción y radiación a la región aguas arriba de la llama con el objetivo de precalentar la entrada de mezcla de combustible. Esta recirculación de calor tiene como resultado que en la zona de reacción se puedan alcanzar temperaturas incluso más altas que la de flama adiabática, que corresponde a la temperatura de los productos de la combustión teóricamente alcanzada si no se pierde energía al ambiente exterior.

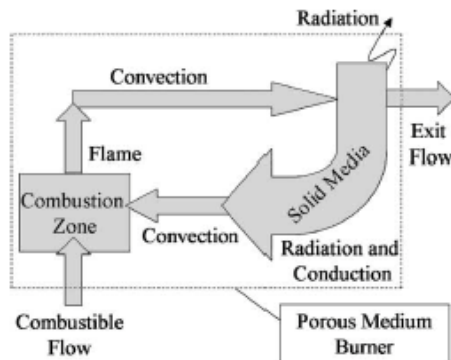


Figura 7 Representación esquemática teoría exceso de entalpía mediante recirculación de calor

Es así como mezclas pobres o muy ricas y combustibles de bajo poder calorífico pueden ser combustionados de manera más estable y en un rango más amplio de inflamabilidad. [16]

1.5.2 Ventajas

Por todas las razones mencionadas anteriormente, la combustión en MPI tiene una serie de ventajas en comparación con la combustión en llama libre, que son la razón de la importancia del desarrollo de esta tecnología. Las principales se enumeran a continuación [17]:

1.5.2.1 Ampliación de los rangos de inflamabilidad

En las mezclas de aire/ combustible, el límite inferior de inflamabilidad disminuye cuando se incrementa la temperatura inicial de la mezcla de acuerdo con la ley de Burgess – Wheeler [18], la combustión de aire precalentado puede dirigir a una disminución del límite inferior de inflamabilidad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$L.I.I_T = L.I.I_{298} \left[1 - \frac{3.14(T - 298)}{L.I.I_{298}H_i} \right]$$

Donde $L.I.I_T$ es el límite inferior de inflamabilidad precalentado de los reactivos expresado en porcentaje.

Por otro lado, el límite superior de inflamabilidad tiende a aumentarse al incrementar la temperatura de precalentamiento del aire lo cual genera una ampliación significativa del rango de inflamabilidad, lo que permite al quemador trabajar con mezclas más pobres, produciendo menos emisiones.

1.5.2.2 Disminución en las emisiones de NO_x

La temperatura de precalentamiento del aire trae consigo un incremento en los picos de temperatura de llama, lo cual desde el punto de vista de formación del NO_x térmicos

genera mayores concentraciones de este gas de efecto invernadero. Para atenuar y controlar esta tendencia, la tecnología de combustión de medios porosos utiliza la recirculación de los productos de combustión en la zona de reacción, lo que genera un vaciamiento local en el aire, reduciendo las temperaturas de llama y por ende las emisiones de NO_x .

1.5.2.3 Reducción de emisión de CO_2

Al sustituir sistemas de combustión convencionales por tecnologías con aire precalentado se logra reducir las emisiones de CO_2 debido al incremento de la eficiencia de la combustión y la reducción del consumo de combustible.

1.5.2.4 Aumento de la densidad de energía

En la combustión de MPI, se obtiene una mayor densidad de energía que alcanza hasta los 3000 [kW/m²] en contraste con los quemadores de llama libre que alcanzan solo los 300 [kW/m²]. Esto permite a su vez que los quemadores sean de menor tamaño que los de llama libre

1.5.2.5 Ampliación rangos de turndown

Ampliación de los rangos de turndown del quemador, lo que resulta en una alta estabilidad de llama aun trabajando con mezclas pobres.

1.5.2.6 Combustión sin llama

La combustión sin llama se caracteriza porque la zona de reacción ocurre en todo el volumen de la cámara de combustión, sin la formación de frente de llama, ni ocurrencia de gradientes de temperatura significativos. Con la combustión sin llama se logra alcanzar simultáneamente alta eficiencia energética y muy reducidas emisiones de NO_x y CO , así como calentamiento más uniforme, entre otras ventajas mencionadas anteriormente [19].

1.5.3 Quemadores de medios porosos

Los quemadores de medios porosos son una aplicación de la combustión en medios poroso que reúnen todas las características y ventajas detalladas en el punto anterior. Este tipo de quemadores se categorizan como quemadores radiantes, que utilizan el calor infrarrojo por medio de radiación. Su principal parámetro es la temperatura que alcanzan y son altamente cotizados en la industria por su alta estabilidad de llama y eficiencia energética. [20]

1.6 Tecnología de perfiles ensamblables

Los perfiles ensamblables utilizados para la construcción de los módulos son perfiles de aluminio que por su forma y la variedad de accesorios disponibles hace que sean sencillos de armar de la manera deseada. Además, tienen el plus de que son ligeros considerando su alto nivel de resistencia, por lo cual se consideran estructuras confiables y de fácil manipulación.



Figura 8 Perfil de aluminio

En la siguiente tabla se brinda información de propiedades mecánicas destacadas de los perfiles:

Tabla 3 Propiedades mecánicas perfiles ensamblables

Resistencia a la tensión (En dirección de la carga)	245 $[N/mm^2]$
Rendimiento dúctil A_5	10 %
Rendimiento dúctil A_{10}	8 %
Módulo de elasticidad	70.000 $[N/mm^2]$
Dureza Brinell	75 HB
Coeficiente de expansión longitudinal $[-50^{\circ}C, 20^{\circ}C]$	$21.8 \times 10^{-6} [K^{-1}]$
Coeficiente de expansión longitudinal	$23.4 \times 10^{-6} [K^{-1}]$

Los perfiles que se utilizarán para armar los módulos son marca Bosch RexRoth; este proveedor cuenta con una amplia variedad de perfiles que se diferencian entre sí en su forma y dimensión de su sección transversal, en este caso se utilizarán perfiles relativamente pequeños, de 40 mmx 40 mm ya que el peso reducido de los sistemas a los cuales debe brindarle apoyo no justifica perfiles de mayor sección transversal. La geometría de la sección transversal del perfil se puede apreciar en la siguiente figura:

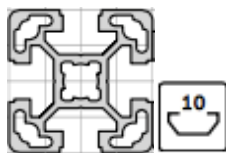


Figura 9 Sección transversal perfil de aluminio

Además, en la Tabla 4 se detalla dimensiones y propiedades de los perfiles intrínsecas de su geometría [21]:

Tabla 4 Dimensiones y parámetros perfiles de aluminio

Perfil	Abertura [mm]	Superficie [cm ²]	M. inercia [cm ⁴]		M. de sección [cm ³]		Masa [kg/m]
			I_x	I_y	W_x	W_y	
40x40L	10	5.6	9.1	9.1	4.5	1.3	1.5

1.7 Aceros y solicitudes térmicas

1.7.1 Definición

El término acero sirve comúnmente para denominar, en ingeniería metalúrgica, a una mezcla de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,03 % y el 2% en masa de su composición, dependiendo del grado.

El acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas, sobre todo su resistencia.

Existen muchos tipos de acero según el o los elementos aleantes que estén presentes. Cada tipo de acero permitirá diferentes aplicaciones y usos, lo que en macro lo hace un material muy versátil. [22]

1.7.2 Clasificación

Una buena forma de clasificar los aceros es de acuerdo a las distintas características que proporcionan los diferentes elementos de aleación:

1.7.2.1 Aceros al carbono

Estos aceros contienen grandes cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.

1.7.2.2 Aceros aleados

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden subclasificar en:

- Estructurales: Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además, se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25% a un 6%.
- Para herramientas: Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados

para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.

- Especiales: Los Aceros de Aleación especiales son los aceros inoxidable y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos.

1.7.2.3 Aceros de baja aleación ultra resistente

Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. [23]

1.7.3 Acero y temperatura

En esta sección se va a estudiar la influencia que sobre el acero tiene cualquier aumento de la temperatura en su comportamiento estructural y resistente.

En efecto, las propiedades mecánicas del acero no son las mismas a 20 °C, que las que pueda tener a 200 °C o 1000 °C. No obstante, antes de producirse el fallo estructural, las propiedades mecánicas del acero van variando gradualmente conforme se va produciendo el aumento de la temperatura. A continuación, se ilustrará en las siguientes figuras el comportamiento de las propiedades térmicas y mecánicas del acero estructural cuando se enfrenta a variaciones de temperatura con respecto a la referencial. [24]

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento de la conductividad térmica y el calor específico a medida que va aumentando la temperatura; específicamente se observa cómo sus propiedades de conducción de calor y aumenta su capacidad calórica.

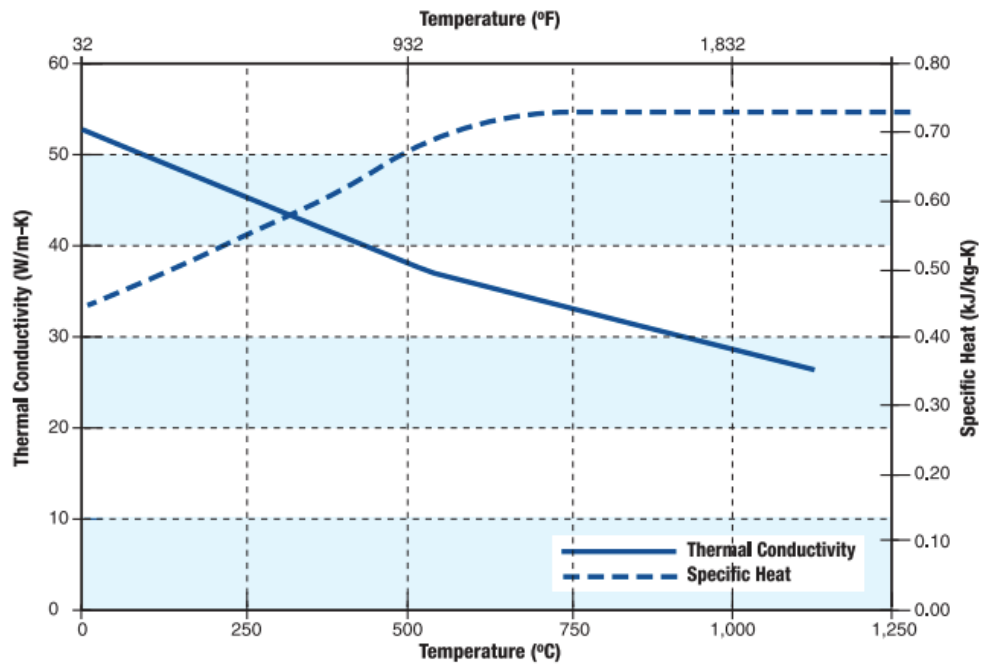


Figura 10 Propiedades térmicas versus temperatura acero estructural

En la Figura 11 se puede observar cómo varía la curva de esfuerzo en función de la temperatura. Se puede comprobar que el límite elástico decrece a medida que aumenta la temperatura.

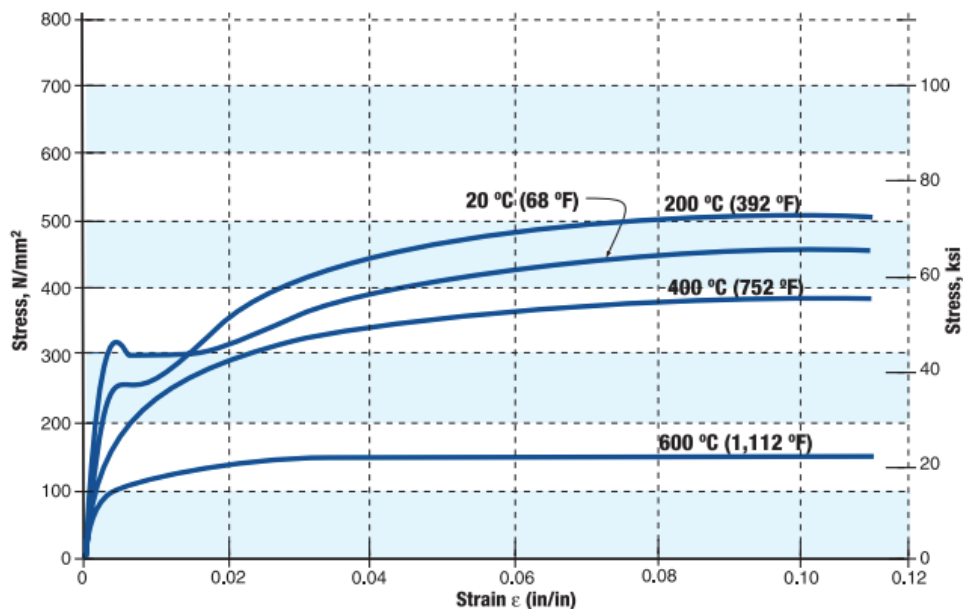


Figura 11 Curva esfuerzo versus deformación acero estructural

Por último, cabe tener presente el coeficiente de dilatación térmica α_T que corresponde a la variación de longitud de un elemento debido a la dilatación experimentada por él a una temperatura dada. En términos de construcción, este parámetro es importante ya

que va de la mano con una deformación térmica unitaria que afecta directamente las uniones de las piezas, agregando un factor de estrés extra a las uniones soldadas. En la Figura 12 se grafica la deformación unitaria del acero estructural en función de su temperatura [25] En ella se puede apreciar una curva rápida de aumento de deformación , que pasado los 900°C aumenta la pendiente aún más.

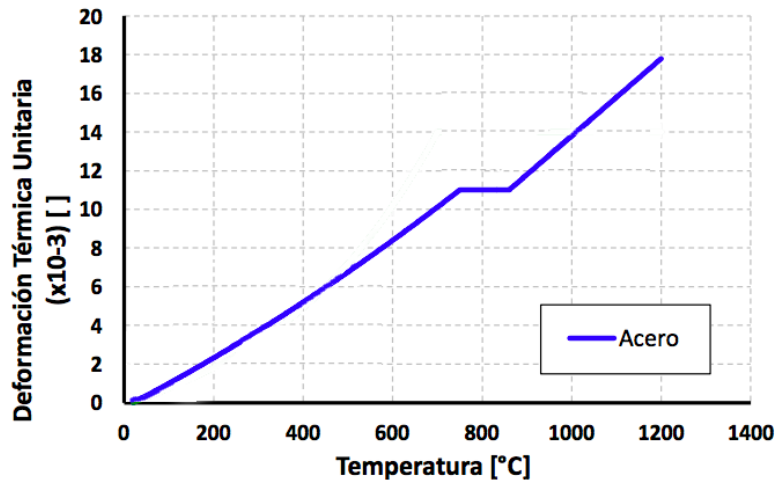


Figura 12 Deformación térmica unitaria versus temperatura

Es en base a las curvas recientemente presentadas que describen el comportamiento del acero estructural a altas temperaturas, que la norma chilena fija la temperatura media que pueden alcanzar los elementos estructurales sin una pérdida significativa de sus propiedades en 500°C [26], principalmente por la fuerte baja en su resistencia mecánica.

Asimismo, y formando curvas similares a las descritas para el acero estructural, para el caso del acero inoxidable austeníticos, se define que su temperatura de servicio máxima para evitar deteriorar sus propiedades mecánicas, térmicas y anticorrosivas como 870°C para aceros expuestos a uso intermitente en condiciones normales con aire seco según el *ASM Metal Handbook* [27].

2 Normativa Chilena NCh 3111

2.1 Generalidades

2.1.1 Contexto normativa

La norma NCh 3111 es un documento oficial otorgado por el Instituto Nacional de Normalización (INN) que contiene información acerca de estándares de construcción y funcionamiento exigidos para el uso y comercialización de quemadores automáticos de aire forzado que funcionan con combustibles gaseosos.

El objetivo de la norma es establecer la terminología, los requisitos generales referentes a la construcción y el funcionamiento de los quemadores automáticos de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos, su equipamiento con dispositivos de regulación y de seguridad y los procedimientos de ensayo de tipo para estos quemadores.

Es importante recordar que independiente del amplio alcance de esta normativa, el objetivo de esta sección se limita a la definición de los ensayos presentados en la normativa que se deben llevar cabo en el banco de prueba diseñado bajo las condiciones descritas para poder lograr la certificación de los quemadores.

2.1.2 Alcances

Esta norma se aplica a los quemadores automáticos de aire forzado provistos de un ventilador par el aire de combustión, que funcionen con combustibles gaseosos y destinados a comercializarse como un conjunto completo.

2.1.3 Condiciones de ensayo

En términos generales se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El quemador se debe situar en un local bien ventilado, sin corrientes de aire, con una temperatura ambiente de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se permiten otras temperaturas en cuanto no influyan en los resultados del ensayo.
- En cuanto a la alimentación eléctrica, a no ser que se indique lo contrario, la tensión eléctrica se fija en el valor de tensión nominal. Por otro lado, las condiciones anormales corresponden al 85% o al 110% de la tensión nominal.
- Se ensaya un quemador como unidad independiente y este, a su vez, debe ensayarse en conjunto con su equipamiento que corresponde a su respectivo ventilador y tren de válvulas.

2.1.4 Generalidades procedimientos de ensayos

2.1.4.1 Gases de ensayo

El gas de referencia indicado por el fabricante es el gas natural de petróleo, que es seleccionado por ser un combustible seguro, sustentable, eficiente y fácil de almacenar. El gas natural es un combustible que se encuentra en el grupo H de la segunda familia según el índice de Wobbe.

Para una medición completa y correcta del quemador, es importante comprobar el adecuado comportamiento del quemador no solo con el gas de referencia, sino también en el resto de los gases pertenecientes a su familia; es así como se definen los gases de ensayo.

En el siguiente recuadro se detalla las características de los gases de ensayo correspondiente al grupo H de la segunda familia:

Tabla 5 Características de los gases de ensayo - Tabla C1 NCh 3111

Composición en volumen	Denominación	W_i [MJ/m ³]	H_i [MJ/m ³]	W_s [MJ/m ³]	H_s [MJ/m ³]	ρ_r
$CH_4 = 100$	G20	45,67	34,02	50,72	37,78	0,555
$CH_4 = 87$ $C_3H_8 = 13$	G21	49,6	41,01	54,76	45,28	0,684
$CH_4 = 77$ $H_2 = 23$	G222	42,87	28,53	47,87	31,86	0,443
$CH_4 = 92.5$ $N_2 = 7.5$	G23	41,11	31,46	45,66	34,95	0,586
$N_2 = 15$						

La verificación de las características de los quemadores se realiza utilizando los gases de combustión del grupo H de la segunda familia indicados en la Tabla 6

Tabla 6 Gases según ensayos - Tabla 4 NCh 3111

Ensayo	Gas
Consumo calorífico	G 20
Rango de estabilidad	G 20
Calidad de combustión	G 20 G 21
Retroceso de llama	G 222
Desprendimiento de llama	G23

Destacar que los últimos dos ensayos de la Tabla 2 son exclusivos para quemadores de premezcla total, que es el caso de este estudio.

2.1.4.2 Presiones de ensayo

Se distinguen 3 presiones de ensayo:

- Presión nominal (P_{nom}): Presión normal establecida por el fabricante [mbar]
- Presión máxima (P_{max}): 1,2 veces P_{nom} [mbar]
- Presión mínima (P_{min}): 0,8 veces P_{nom} [mbar]

2.1.5 Exactitud de las mediciones

En este apartado se resumen las mediciones que se requieren tomar acorde a lo que se solicita en la normativa y sus incertidumbres correspondientes, en el apartado 2.3.4 se

pueden contrastar con la incertidumbre de los elementos de medición disponibles en las instalaciones del departamento.

Tabla 7 Incertidumbre aparatos de medición – Apartado 5.1.3.7.1 NCh 3111

Parámetro	Incertidumbre permitida
Poder Calorífico	$\pm 0.5\%$
Densidad del gas	$\pm 0.5\%$
Temperatura del gas	$\pm 0.2\ K$
Tiempos	$\pm 0.1\ s$
Presión de gas	$\pm 0.1\ mbar$
Presión atmosférica	$\pm 0.5\ mbar$
Productos de combustión (NO_x, CO_x)	$\pm 5\ ppm$
Masa	$\pm 0.5\%$
Volumen de gas	$\pm 0.5\%$
Temperatura de la superficie	$\pm 2\ K$
Estanqueidad línea de gas	$\pm 0.1\ mbar$

2.2 Requisitos de diseño hogar según normativa

El banco de ensayos debe estar constituido por un hogar tubular definido por su diámetro interno, su longitud y el consumo calorífico nominal correspondiente. De estos parámetros el diámetro es el único que una vez establecido no se puede modificar y la cámara de combustión se debería diseñar para que su largo sea variable mediante la implementación de una pared posterior que sea capaz de desplazarse longitudinalmente en el interior de la cámara de combustión para adaptarse a los requerimientos del consumo calorífico nominal de acuerdo a la siguiente relación:

$$l = 0,23 \sqrt{\frac{Q_n}{10}}$$

El consumo nominal por su parte corresponde al valor máximo de consumo calorífico declarado por el fabricante. Estos 3 parámetros se relacionan acorde al gráfico de la Figura 13

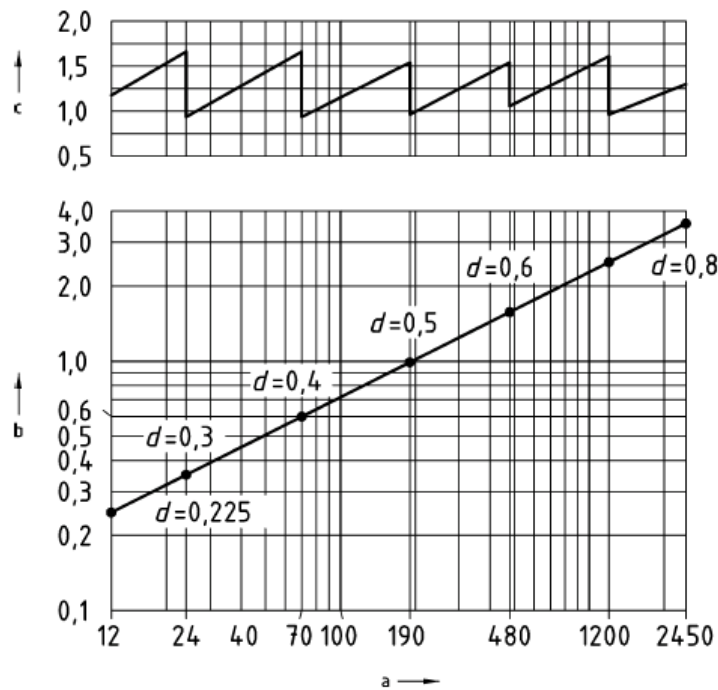


Figura 13 Carga del hogar, diámetro y longitud del tubo del hogar en función del poder calorífico Q – Figura 4 NCh 3111

Donde:

- a: Consumo calorífico Q [kW]
- b: Longitud de la cámara de combustión [m]
- c: Carga de la cámara de combustión [MW/m^3]
- d: diámetro del tubo del hogar [m]

Los quemadores se pueden ensayar sobre un hogar de paso directo o de retroceso:

- Hogar de paso directo: Se les dice a las cámaras de combustión donde para regular la carga dentro del hogar se utiliza un anillo de acero de igual diámetro exterior que el diámetro interior del hogar y de 3 mm de espesor que se posiciona de manera concéntrica al hogar y es capaz de desplazarse longitudinalmente a través de él, su objetivo es el de obturar el paso de los gases de resultantes hacia los tubos de humo, así dependiendo del nivel de obturación se puede controlar la presión interna dentro de la cámara.
- Hogar con retroceso: Mismo concepto que el caso anterior de impedir de manera variable la evacuación de los gases para controlar la presión interna dentro de la cámara, pero la diferencia es que se obtura la entrada de los gases a los tubos o la salida de los gases a la chimenea.

Adicionalmente el hogar debe estar provisto de al menos un visor a través del cual se pueden observar visualmente la zona de combustión del quemador. Junto con el visor el hogar debe tener una compuerta para maniobrar los quemadores y en esta puerta se debe instalar un dispositivo de control de presión.

Teniendo en consideración los requisitos descritos recientemente, la normativa adjunta una representación esquemática del hogar que se puede apreciar en la Figura 14.

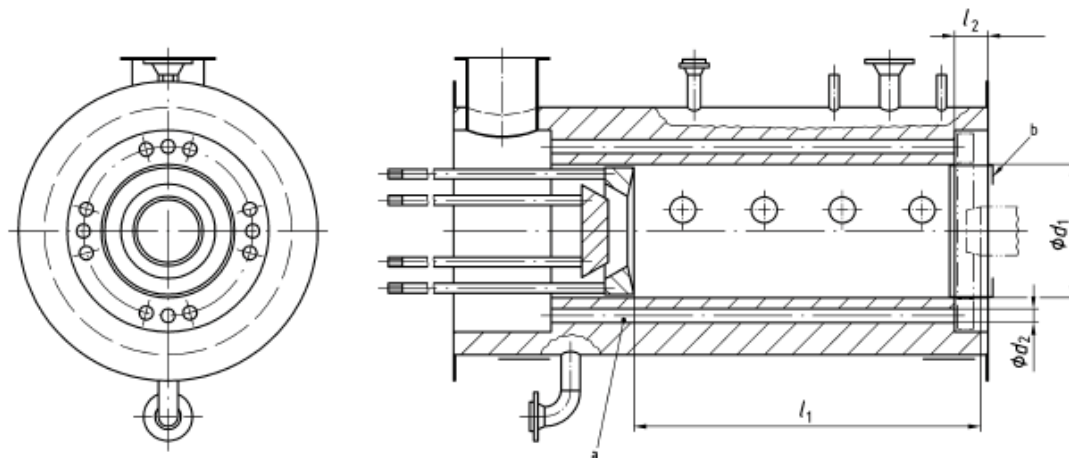


Figura 14 Esquema de construcción hogar de combustión según normativa – Figura 3 NCh 3111

Donde:

- d_1 : Diámetro interno del hogar de combustión
- d_2 : Diámetro interno de los tubos de humo
- l_1 : Largo del hogar de combustión.
- l_2 : Largo sección de paso de los gases resultantes hacia los tubos de humo.

La relación entre las variables descritas en la Tabla 8 se explicitan en la siguiente tabla:

Tabla 8 Relación parámetros construcción hogar de combustión

Test flame tube	Flue gas tube		Numbers	l_2 mm
d_1 m	d_2 mm			
	internal	external		
0,225	16	20	8	60
0,3	21	25	14	80
0,4	36,5	41,5	12	100
0,5	39,5	44,5	26	130
0,6	51,5	57	30	160
0,8	80,9	88,9	28	200

Esta información está dada en términos generales, las dimensiones particulares de la cámara de combustión propuesta están definidas en detalle en el punto 2.3

2.2.1 Medio refrigerante

El hogar debe estar provisto de un sistema de refrigeración que funcione con líquido refrigerante. Los rangos de temperatura entre los cuales se considera aceptable la temperatura del líquido refrigerante están normados y varían de acuerdo al ensayo que se requiera:

Se considera una temperatura aceptable de líquido entre 15° y 60° para los ensayos de:

- Arranque
- Estabilidad de la llama
- Determinación de estabilidad de llama y de los límites de funcionamiento seguro con los gases limitantes de desprendimiento de llama.

Por otro lado, se considera una temperatura aceptable de líquido entre 40° y 80° para los ensayos de:

- Determinación de estabilidad de llama y de los límites de funcionamiento seguro con los gases limitantes de retroceso de llama.
- Determinación de las características de combustión
- Determinación del rango de potencia.

Todos los ensayos serán vistos en detalles en la sección de descripción de ensayos de este documento.

2.2.2 Evaluación de los productos de combustión

El hogar de combustión se conecta a una chimenea mediante tubos de humo, que como su nombre lo hace presagiar, son los encargados de evacuar los gases fuera de la cámara de combustión. Es en estos tubos donde se toman las muestras de los gases de combustión, que acorde a la norma, se deben tomar con las especificaciones de la Figura 15

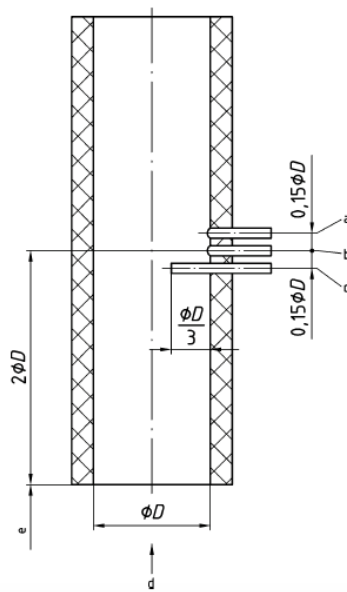


Figura 15 Sección tubo de humo que esquematiza la toma de muestra de temperatura, presión y gases resultantes
– Figura 7 NCh 3111

Donde:

- D: Diámetro de los tubos de humo definidos acorde a la tabla 8
- a: Toma de muestra de temperatura
- b: Toma de muestra presión/tiro
- c: Análisis del humo
- d: pared posterior del hogar de combustión
- e: Sentido de paso de los gases producto de combustión

Al igual que el caso anterior, esta información está dada en términos generales, las dimensiones particulares de la toma de muestra para el diseño propuesto están definidas en detalle en el punto 2.3

2.3 Diseño del hogar de combustión

El objetivo de esta sección es la de describir el proceso de construcción del hogar de combustión, el cual se diseñó pensando en su futura mecanización tomando en consideración todos los requerimientos planteados en el punto 2.2.

Dentro de los requerimientos del hogar, también se consideró que fuera capaz de montarse en la estructura del banco fabricada a base de perfiles de aluminio destinada a la toma de muestra de radiación y/o temperatura de quemadores a nivel laboratorio, ya que actuaría a su vez como sistema de cierre de ella.

En primer lugar, se define que el diámetro requerido del hogar debe ser de 500 [mm], esto con el doble propósito de flexibilizar el hogar en cuanto al tamaño y geometría de quemadores que se puedan testear en el BDP y en cuanto a rango de potencia con el cual podrían operar dichos quemadores acorde al gráfico de la Figura 13

En cuanto al largo de la cámara de combustión, si bien en el punto 2.2 se definió una relación entre largo y diámetro de la cámara de combustión, esta relación está fundada en que, si la potencia del quemador aumenta, el largo de la cámara deberá aumentar a medida que aumenta el largo de llama. Como la tecnología de CMP no desprende llama, este factor de diseño pasa a ser secundario, por lo cual se diseña un hogar con largo fijo de 1 m de largo.

Ya definidos estos parámetros, de la Tabla 8 se obtiene información de la cantidad de tubos de humo requeridos y sus dimensiones: la cámara de combustión debe contar con 26 tubos de humo con diámetro interno y externo de 39,5 [mm] y 44,5 [mm] respectivamente.

Adicionalmente en la misma Tabla 8 entrega la dimensión del largo requerido de la sección de paso de los gases de escape desde la cámara de combustión hacia los tubos de humo, que deberá ser de 130 [mm] para un diámetro de 500 [mm].

Para el sistema de obturación de los gases resultantes seleccionado para la variación de la presión dentro de la cámara de combustión se utilizará un sistema de retroceso que corresponde a un diafragma a la salida de la chimenea.

En cuanto al sistema de refrigeración, las superficies de las paredes interiores del quemador, en adición con las superficies exteriores de los tubos de humo y la base de los tubos de humo forman un recinto cerrado diseñado para contener el líquido refrigerante. En pos de sencillez de diseño se propone que el líquido refrigerante corresponda a agua que se pueda cargar y descargar por bushings ubicados en la parte superior e inferior respectivamente del manto de la cámara de combustión. (Observar Anexo A.6)

Cargar y descargar el agua manualmente al ser requerido para la toma de mediciones en el reactor tiene el beneficio de que evitaría la instalación de un sistema de bombeo y enfriamiento del líquido refrigerante, tema que disminuye considerablemente el costo de instalación del hogar en el establecimiento.

En el Anexo A se encuentran los planos de construcción del hogar de combustión propuesto, con información de sus materiales de construcción y dimensiones definidas acorde a los requerimientos descritos anteriormente.

El resultado final del mecanizado del hogar de combustión propuesto se puede apreciar en la siguiente imagen se pueden apreciar en el Anexo A.1

2.3.1 Selección de material

La determinación de los materiales para la construcción del HDC se llevó a cabo buscando un equilibrio entre el costo de los materiales y su capacidad para no deteriorar sus propiedades mecánicas al estar expuestos a altos niveles de temperatura y radiación.

Específicamente en la selección de aceros el criterio para la selección de la calidad que debían tener, fue si el acero estaba o no en contacto con el líquido refrigerante; para los aceros que estaban en contacto directo con la radiación del quemador, se debió seleccionar un acero de mayor resistencia térmica que el que seleccionó para las partes del hogar que si estaban bajo la influencia del sistema de refrigeración.

Teniendo en consideración los dos factores mencionados en los últimos párrafos, los aceros seleccionados fueron los siguientes:

2.3.1.1 Acero Inoxidable AISI 304L

Acero propuesto para la mecanización de las piezas que estén en contacto directo o indirecto con la radiación proveniente del quemador o que esté en contacto con los gases calientes resultantes de la combustión sin estar bajo la influencia del líquido refrigerante.

Este tipo de acero corresponde a la línea de aceros inoxidables austeníticos, Cr-Ni, son aceros de muy bajo carbono, por lo que las zonas sometidas a calor son menos propensas a la corrosión, presenta una alta ductilidad, excelente para procesos de conformado, no es magnético y presenta excelente soldabilidad. [28]

Además de lo ya mencionado, se pueden observar sus propiedades térmicas principales en la Tabla 9. [29]

Tabla 9 Propiedades térmicas promedio acero 304L

Capacidad Térmica [J/g°C]	Punto de fusión [°C]	T° de servicio [°C]
0,5	1400 – 1450	870

Recordar que la temperatura de servicio se define como la temperatura de trabajo que puede llegar a alcanzar la plancha de acero sin perder de forma considerable sus propiedades mecánicas.

Las piezas del conjunto que idealmente deberían ser de esta calidad de acero o incluso mayor corresponden a:

- Manto bajo del hogar de combustión y la puerta. Excluyendo todas las piezas pequeñas que conforman el sistema de apertura y cierre que unen la puerta al manto.

- Tapa del hogar de combustión, ya que recibe radiación directa por parte del quemador que rebota en ella para introducirse a los tubos de humo.
- Chimenea del hogar de combustión, pieza que recibe el calor de los gases resultantes de la combustión al salir de los tubos de humo, que, si bien están refrigerados, el escaso tiempo de intercambio de calor entre ellos y el líquido refrigerante y la no muy baja temperatura del éste llevan a una alta temperatura de salida de los gases de combustión.
- Discos que conforman la clapeta del sistema de obturación de los gases de combustión a la salida de la chimenea.

2.3.1.2 Acero estructural ASTM A36

Caso contrario del material anterior, este acero se propone para la mecanización de toda pieza que, a pesar de estar expuesta a altas temperaturas, también están en contacto por la otra cara con el líquido refrigerante. También se incluyen las piezas y accesorios que estén posicionados por fuera del manto exterior de la cámara.

Este material corresponde a un acero al carbono estructural, que destaca por su buena soldabilidad y su alta versatilidad de uso. En particular para este caso fue seleccionado por su alta disponibilidad en el mercado y su relativamente bajo costo.

Se adjunta la siguiente tabla con propiedades térmicas del acero al carbono:

Tabla 10 Propiedades térmicas promedio acero al carbono

Capacidad Térmica [J/g°C]	Punto de fusión [°C]	T° de servicio [°C]
0,47	1420 - 1460	500°

Las piezas que entran bajo esta categoría corresponden a:

- Manto interior y exterior de la cámara de combustión.
- Tubos de humo
- Tubos de medición
- Flange que une la cámara al sistema estructural
- Piezas pequeñas y accesorios mirillas
- Vástago y manilla sistema de obturación posicionado en la chimenea.
- Piezas pequeñas y accesorios del sistema de cierre y apertura que van por fuera del manto exterior de la cámara.

2.3.1.3 Materiales adicionales

Esta sección detalla los materiales requeridos para la construcción del HDC que no corresponden a planchas de acero, como se vieron en los dos puntos anteriores.

- Vidrio templado: Es un tipo de vidrio de seguridad, procesado por tratamientos térmicos o químicos, para aumentar su resistencia en comparación con el vidrio normal. Se propone utilizar este tipo de material para el visor de las mirillas debido a su alta resistencia térmica
- Empaquetadura trenzada: También conocida como empaquetadura tipo Kevlar, corresponden a sellos hidráulicos que vienen en formato de carrete donde se pueden dimensionar según requerimiento los sellos, sin la limitante que tienen los sellos de goma con dimensiones definidas.
- Elementos de fijación: corresponden a pernos, tuercas, remachas y pasadores. Todos de resistencia baja o media ya que ninguno está expuesto a solicitudes muy fuertes.

En el Anexo B se encuentra el listado de piezas que conforman el hogar de combustión, detallando el subsistema al cual corresponde, el material del cual está constituida y los requerimientos de material por pieza. Con esto se trabajó para determinar la cantidad de material efectivo a comprar para obtener una aproximación real del costo de construir el hogar de combustión.

2.3.2 Costo y proveedores

Una vez determinado el material a utilizar y la cantidad a usar de cada uno de los materiales enlistados en el Anexo B, es importante compatibilizar la cantidad de material que se requiere versus lo que ofrece el mercado. La tabla con la síntesis del material requerido se encuentra disponible en el Anexo B.1

Para este proyecto se cotizaron 3 alternativas de proveedores por cada material requerido de costo significativo como lo son los aceros en sus distintos espesores y niveles de calidad y el vidrio de seguridad. Se limitó la búsqueda a los proveedores ubicados en la quinta región y en la metropolitana por conceptos de costos de traslados.

El Anexo B.2 corresponde a una tabla que sintetiza el material requerido extraído del listado de piezas del Anexo B.1. Por otro lado, en el Anexo C se contrasta este requerimiento con las dimensiones disponibles de planchas de acero que fueron encontradas en el mercado.

Con este factor en mente, se puede observar en el Anexo C.2 que las planchas de acero inoxidable más convenientes son las que ofrece el proveedor 2 en formato 1 [m] de ancho y 3 [m] de largo, siendo incluso más económicas que las ofrecidas por los otros 2 proveedores que venden en formato 2 [m] x 1 [m].

Debido a la gran dimensión de las planchas ofrecidas en el mercado, una primera alternativa es la de aprovecharlas al máximo y ocupar el material sobrante para mecanizar también las piezas que en un comienzo fueron diseñadas con acero estructural. De esta forma se ahorra el costo de la compra de acero estructural para los espesores de 5 [mm] y 8 [mm] con sus respectivos costos asociados de envíos. La información del nuevo requerimiento de material para esta alternativa se encuentra en el Anexo B.3.

En base a la comparación de las cotizaciones definidas en el Anexo C, se puede concluir la alternativa más conveniente para la compra de las piezas a mecanizar:

Tabla 11 Cotización final aceros alternativa 1 – Excluye solo costos de envío.

Material	Proveedor	Cantidad	Dimensión	Precio
ASTM A36 - 2.5 mm	SACK	1	1 m x 1 m	\$23.800
ASTM A36 - 3 mm	SACK	1	1 m x 0.15 m	\$4.284
ASTM A36 - 4 mm	CINTAC	2	2 m x 1 m	\$81.948
304 L - 5 mm	ACERMET	1	3 m x 1 m	\$274.176
304 L - 8 mm	ACERMET	1	3 m x 1 m	\$438.682
TOTAL				\$781.916

Importante destacar que los precios son referenciales sujetos a variaciones por parte de los proveedores y las dimensiones sujetas a su stock.

Analizando el actual escenario y el relativamente alto costo de la alternativa dada recientemente, se propone la opción de mecanizar todas las piezas con acero estructural. La información del nuevo requerimiento de material para esta alternativa se encuentra en el Anexo B.4.

En base a la comparación de las cotizaciones definidas en el Anexo C, se puede concluir la alternativa más conveniente para la compra de las piezas a mecanizar:

Tabla 12 Cotización final aceros alternativa 2 – Excluye solo costos de envío

Material	Proveedor	Cantidad	Dimensión	Precio
ASTM A36 - 2.5 mm	SACK	1	1 m x 1 m	\$23.800
ASTM A36 - 3 mm	SACK	1	1 m x 0.15 m	\$4.284
ASTM A36 - 4 mm	CINTAC	2	2 m x 1 m	\$81.948
ASTM A36 - 5 mm	Prodalam	1	3 m x 1 m	\$64.105
ASTM A36 - 8 mm	CINTAC	1	2 m x 1 m	\$81.948
TOTAL				\$256.086

Al igual que en el caso anterior, los precios son referenciales sujetos a variaciones por parte de los proveedores y las dimensiones sujetas a su stock.

2.3.3 Evaluación de alternativas

El objetivo de esta sección es la de tratar de predecir el comportamiento de los aceros que constituyen las dos alternativas planteadas en el punto anterior cuando están a expuestos a altas temperaturas para poder estimar cuanto es el tiempo máximo de uso antes de que el acero alcance una temperatura tal que afecte sus propiedades mecánicas o produzca un estrés térmico tal que afecte el sistema estructural del conjunto que conforma el hogar de combustión.

Anteriormente se definió una temperatura de servicio tanto para el acero estructural como para el inoxidable, en base al comportamiento de sus propiedades en función de la temperatura y se tomará de referencia esta temperatura para el cálculo del tiempo de cada pieza del conjunto.

2.3.3.1 Cálculo de tiempo para alcanzar temperatura de servicio

Una vez definidas las temperaturas críticas para cada alternativa de acero, el paso siguiente es estimar cuánto demora cada pieza de en alcanzar dichas temperaturas.

La estimación del tiempo se plantea de la siguiente manera:

- a) Se considera el hogar de combustión como la superposición de dos cilindros cerrados con distintos largos y diámetros como se puede observar en la Figura 16.
- b) Dentro del horno, las paredes reciben calor debido a la radiación de la superficie del MPI que se considerará a una temperatura constante de 1200°C y a la radiación propia de los gases de combustión cuya temperatura se considerará constante y homogénea a 700°C y su emisividad se determinará en este ejercicio mediante las ecuaciones de Hottel.
- c) En pos de simplificar los cálculos, las paredes internas del horno se considerarán a una temperatura constante igual a la temperatura ambiente.
- d) En el escenario recientemente descrito, se llevará a cabo un sistema radiativo matricial para obtener la tasa de transferencia de calor que reciben tanto la tapa del horno como la parte inferior de éste. Para esto se deben calcular a su vez los factores de forma dentro del hogar acorde a su geometría.
- e) Se calcula el calor requerido para aumentar la temperatura desde condiciones ambientales hasta alcanzar la temperatura crítica de las piezas recién mencionadas, considerando que se conoce su volumen, densidad, coeficiente calorífico y temperatura inicial.

- f) Al cálculo de la tasa de transferencia de calor por radiación, se suma la transferencia de calor por convección, desde los gases calientes hacia las paredes de acero de la cámara
- g) Finalmente, para obtener el tiempo que demora cada pieza en alcanzar la temperatura crítica, se divide la tasa de transferencia de calor radiativa por el calor requerido. El tiempo del conjunto se verá representado por la primera pieza que alcance la temperatura crítica.

Se repite el mismo ejercicio para las dos alternativas. Todos los cálculos correspondientes a esta sección se encuentran en el Anexo D.

A modo de síntesis, para el desarrollo de este ejercicio se llevaron a cabo las siguientes suposiciones:

- Gases de combustión se mantienen a una temperatura constante de 700°C cuando el quemador está encendido, temperatura homogénea en todo el volumen del HGC.
- Exceso de aire de 10%
- Presión atmosférica dentro de la cámara de combustión
- Emisividad del acero estructural 0.28 [30]
- Emisividad acero inoxidable 0.38 [31]
- Emisividad MPI 0.8 [32]
- Densidad de acero constante a 8500 [33]
- Calor específico de 460 [J/kgK] para el acero estructural y 510 [J/kgK] para el acero inoxidable [34]

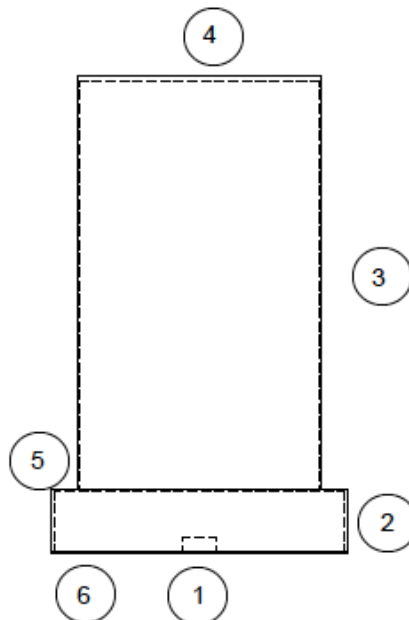


Figura 16 Esquema simplificado hogar de combustión

El ejercicio anterior excluía del análisis la parte superior del hogar de combustión, es decir la chimenea y el sistema de obturación; esto debido a que el tiempo que se busca aproximar viene definido por la pieza crítica del conjunto, que se puede descartar que sea la chimenea debido a que es la pieza que tiene mayor volumen por su elevado grosor y a su vez está expuesta a gases con menor temperatura.

El que los gases sean de menor temperatura es debido a la influencia del líquido refrigerante sobre ellos; al fluir por los tubos de humo están en contacto directo con el agua que los rodea reduciendo su temperatura, sin embargo, en una tasa no muy alta considerando la relativamente alta velocidad de los gases y la reducida área de transferencia de calor.

2.3.3.2 Resultado de análisis por pieza

En el punto anterior se calculó la tasa de transferencia en la superficie interna de cada pieza que está expuesta directamente a la radiación y los gases de combustión. En esta sección se evaluarán los resultados obtenidos por pieza, se considera un factor de seguridad conservador de 0.2 debido a las desviaciones proporcionadas principalmente por la consideración de la temperatura de las paredes constante sumado a las posibles desviaciones resultado de las estimaciones planteadas.

2.3.3.2.1 Parte inferior cámara de combustión y puerta

Con un volumen de $0.00457 [m^3]$ y una capacidad calorífica dependiendo del material, se requiere entonces para aumentar de temperatura ambiente a la temperatura crítica de servicio según caso:

- A. Inoxidable: 16742 [kW]
- A. Estructural: 9642 [kW]

Dependiendo del caso, la pieza está expuesta a las siguientes tasas de transferencia de calor:

- A. Inoxidable: 4,994 [kW/s]
- A. Estructural: 4,503 [kW/s]

Si se lleva a cabo la razón entre ambos parámetros, considerando el mismo factor de seguridad para los dos casos, se obtiene que para el caso del acero inoxidable se puede mantener el quemador encendido unos 45 [min] de corrido, versus el acero estructural que bordea los 26 [min].

2.3.3.2.2 Tapa cámara

Con un volumen de $0.00625 [m^3]$ y una capacidad calorífica dependiendo del material, es necesario para aumentar de temperatura ambiente a la temperatura crítica de servicio según caso:

- A. Inoxidable: 23006[kW]
- A. Estructural: 13250 [kW]

Dependiendo del caso, la pieza está expuesta a las siguientes tasas de transferencia de calor:

- A. Inoxidable: 2,580 [kW/s]
- A. Estructural: 2,229 [kW/s]

Si se lleva a cabo la razón entre ambos parámetros, considerando el mismo factor de seguridad para los dos casos, se obtiene que para el caso del acero inoxidable se puede mantener el quemador encendido unos 118 [min] de corrido, versus el acero estructural que bordea los 79 [min]

2.3.4 Sistemas de monitoreo y control

Esta sección busca profundizar en el detalle de los sistemas de monitoreo y control a instalar en el sistema de cierre diseñado en los puntos anteriores. La siguiente figura corresponde a un esquema del recorrido de los gases de combustión dentro del hogar y donde se llevarían a cabo las mediciones de los parámetros.

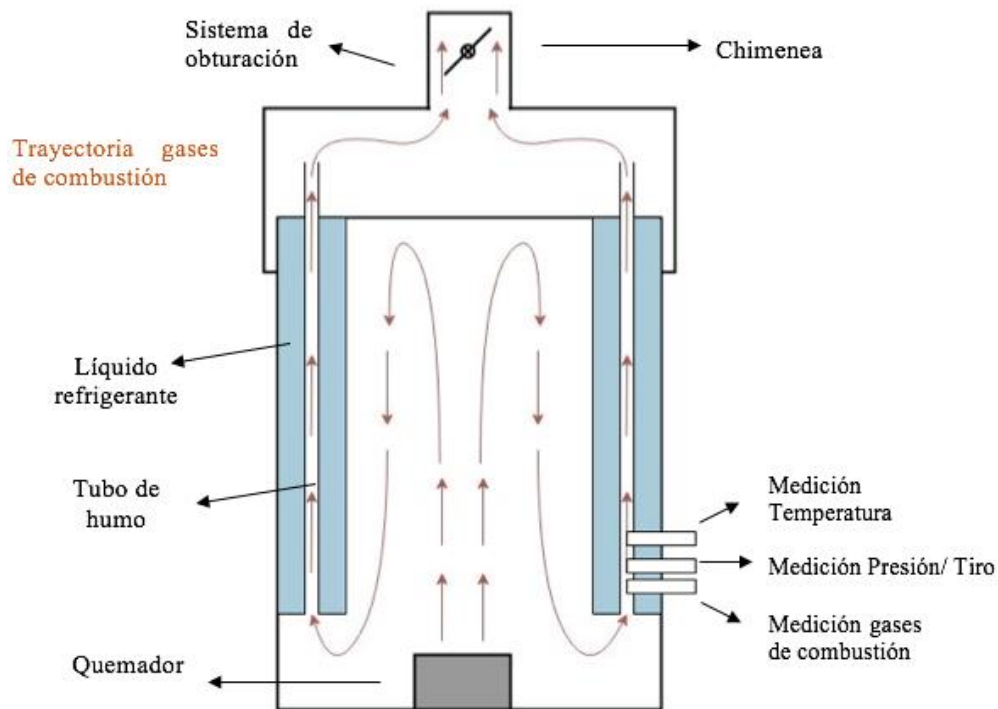


Figura 17 Representación esquemática HDC

En base a esto se puede observar que el hogar de combustión está diseñado para mediciones de temperatura, presión y análisis de gases de combustión (En adición de toda la información que ello conlleva). Adicional a lo esquematizado, en la puerta del hogar de combustión se posiciona un elemento para monitorear la presión dentro de la cámara. Recordar que todos estos parámetros se pueden medir en función de la presión dentro de la cámara y el consumo calorífico, los cuales se pueden controlar

mediante el sistema de obturación de gases de la chimenea y mediante la variación de caudal de aire respectivamente.

Una vez presentados los puntos de control, surge la pregunta de cuáles serían las herramientas propuestas para medir los parámetros mencionados y si es posible llevar su registro en tiempo real, o si solo se puede conocer de manera instantánea.

En las instalaciones del departamento cuenta con un analizador de gases marca BOSTON modelo HD, dicho equipo viene equipado diferentes sondas (y diferentes conexiones para cada sonda) que le dan la capacidad de medir distintos parámetros. Este equipo tiene la capacidad de almacenar datos por medición y por usuario para luego entregarlos por impreso o en un sistema de visualización de almacenamiento integrado, además si se cuenta con el software de administración asociado también se puede conectar a un computador para descargar dichos datos. Se propone entonces, utilizar este instrumento para la medición de Presión, Temperatura y composición de los gases resultantes de combustión, aunque cualquier otro analizador de gases que cumpla con los requisitos de medición puede ser utilizado.

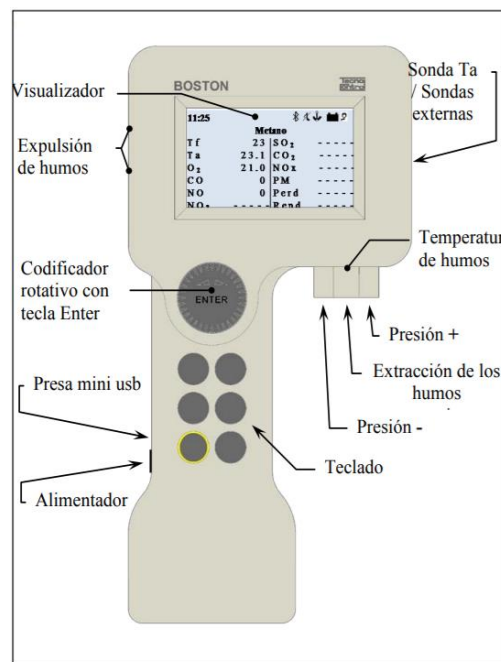


Figura 18 Analizador de gases BOSTON HD - Base del equipo

Físicamente este equipo se conecta con los tubos de medición esquematizados en la Figura 17 mediante una sonda de humos 8 mm. de diámetro que se conecta a la base del equipo. Dicha sonda tiene adicionada un termopar y un empalme de presión que se conectan de manera independiente al equipo, pero que converge en la misma toma de medición, así se pueden llevar a cabo las tres mediciones solicitadas utilizando solo un tubo de medición. La sonda de humo viene además con una trampa de condensación para no dañar el equipo con la humedad de los gases.



Figura 19 Conexión de sonda y acoplados al equipo

Para mayor exactitud en las mediciones, el analizador de gases permite ingresar de manera manual características del combustible, del espacio de prueba, del carburante, condiciones ambientales, entre otras más específicas.

En la siguiente tabla se encuentra información de las mediciones específicas de este instrumento y se sus rangos y resoluciones asociadas [35]

Tabla 13 Parámetros, rangos, resoluciones y precisiones asociadas.

Parámetro	Rango	Resolución	Precisión
O_2	0- 21% vol	0,1% vol	$\pm 0,3\%$
CO	0- 2000 ppm	1 ppm	$\pm 20 \text{ ppm}$
NO	0- 1000 ppm	1 ppm	$(0 \div 100) \pm 5 \text{ ppm}$ $(100 \div 1000) \pm 5 \text{ rdg}$
NO_2	0- 200 ppm	1 ppm	$(0 \div 100) \pm 5 \text{ ppm}$ $(100 \div 1000) \pm 5 \text{ rdg}$
SO_2	0- 200 ppm	1 ppm	$(0 \div 200) \pm 10 \text{ ppm}$ $(200 \div 2000) \pm 5 \text{ rdg}$
CO_2	0- 100% vol	0,1% vol	$(0 \div 100) \pm 5 \text{ ppm}$ $(100 \div 1000) \pm 5 \text{ rdg}$
NO_x	0- 1500 ppm	1 ppm	$(0 \div 100) \pm 5 \text{ ppm}$ $(100 \div 1000) \pm 5 \text{ rdg}$
$T^\circ \text{ humos}$	0- 1000 K	1°C	$\pm 0,3^\circ C$
$Tiro$	-200 – 200 Pa	0,1 Pa	$\pm 0,5 Pa$

Se puede observar entonces en la Tabla 7 que las precisiones requeridas para la toma de muestra acorde a la normativa son consecuentes con las precisiones del equipo disponible.

Para el caso de la medición de la presión dentro de la cámara, el medio de control corresponde al sistema de obturación posicionado aguas arriba a la salida de la chimenea; a mayor abertura menor es la presión dentro de la cámara y en casos límites

de presión negativa está la alternativa de abrir la puerta del hogar. Particularmente para este parámetro no es significativo tener un registro de la presión en el tiempo, sino que solo es útil conocerlo de manera instantánea para controlar el resto las condiciones a las cuales medir el resto de los parámetros, es por esto que el elemento de medición propuesto correspondería a un barómetro que se pueda atornillar en la parte baja del hogar.

Para dimensionar el rango de presiones que debería ser capaz de medir el barómetro propuesto para el control dentro del hogar, en primer lugar, se define el rango inferior negativo en -1 [bar], debido a las condiciones de medición observados en el Anexo F. Por otro lado, para el límite superior se toma el caso extremo en el cual es sistema de obturación está completamente cerrado, creando un sistema cerrado que encierra gases resultantes de la combustión de gas natural a una temperatura dada. Los cálculos relacionados al dimensionamiento del manómetro se encuentran en el Anexo E. El cálculo entrega que el rango superior del manómetro estimado es 3 [bar] de presión manométrica, con la resolución más precisa posible, para que éste sea sensible a las variaciones de abertura del sistema de obturación.

2.4 Requisitos de funcionamiento

El objetivo de esta sección es la de describir los requisitos previos al funcionamiento del quemador que comprometan el uso del banco de pruebas. Tanto estos requisitos, como los que se detallarán en los puntos siguientes, se ordenarán de tal forma que se pueda trabajar como un desglose del check list de certificación que utiliza el personal de la SEC para aprobar o no los quemadores. Extracto de dicho check list que sean aludidos en este trabajo se encuentra disponible en el Anexo H.

2.4.1 Prebarrido

Se solicita la realización de un prebarrido de la cámara de combustión, antes de que se active el dispositivo de encendido. Esto significa hacer pasar aire por la cámara sin combustionar para asegurarse de que no existan agentes externos en la cámara que pueden afectar las mediciones.

Dos casos para determinar el tiempo de prebarrido:

- a) Para un caudal de combustión total correspondiente al consumo calorífico máximo, la duración debe ser de 20 segundos.
- b) Para un caudal menor, el tiempo se debe aumentar en proporción lo mismo que se disminuye el caudal con respecto al caudal correspondiente al consumo calorífico máximo, siendo 20 s el 100% del caudal.

Caudal de aire de prebarrido se puede reducir a lo más en un 67% con respecto a su caudal correspondiente al Q_{max} , en el caso que esto no se cumpla se debe originar:

- a) Parada por seguridad del quemador

- b) La continuación del prebarrido hasta que se restablezca el caudal de aire requerido, con la condición de que no haya disminuido el tiempo total de prebarrido con el caudal de aire requerido

Los quemadores con más de un escalón, como es el caso de este estudio, deben tener una clapeta de aire que permitan al menos un caudal alto y bajo, dependiendo del número de escalones que tenga el quemador. El prebarrido se debe establecer para ser llevado a cabo en solo uno de estos caudales con los cuales puede trabajar el quemador.

Después de una parada por regulación, se puede volver a poner en funcionamiento sin prebarrido los quemadores:

- a) Si $Q \leq 70$ [kW] y además el quemador está provisto de 2 válvulas de seguridad y de un dispositivo de control de estanquidad.
- b) Si $Q \geq 70$ [kW] y además el quemador está provisto de un dispositivo de control de estanquidad.

El prebarrido se debe llevar a cabo obligatoriamente después de:

- a) Un bloqueo firme.
- b) Una parada de más de 24 horas.
- c) Un corte de energía eléctrica.
- d) Una parada por falta de gas.

2.4.2 Consumo calorífico de encendido

Se debe poner en funcionamiento el quemador con un exceso de aire determinado y medir los parámetros necesarios para calcular el consumo calorífico. Si el quemador tiene consumo calorífico nominal menor a 120 [kW] no hay restricción de λ .

La siguiente tabla especifica el valor de λ de acuerdo con las condiciones de encendido y al rango de modulación del quemador para quemadores con más de un escalón. Cada “punto” mencionado en la siguiente tabla corresponde a un conjunto de condiciones de funcionamiento claramente definidas en la sección 2.6.2 de este informe y graficadas en el Anexo G.

Tabla 14 Factor de aire – Extracto quemadores modulantes, tabla 7 NCh 3111

Rango de modulación	Factor de aire λ					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
[1 - 4]	≤ 1.2	≤ 1.2	≤ 1.3	≤ 1.3	≤ 1.2	≤ 1.2
≤ 4	≤ 1.2	≤ 1.2	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.2	≤ 1.2

Se debe comprobar que el consumo calorífico de encendido, calculado mediante el producto de consumo másico o volumétrico por su poder calorífico inferior o superior respectivamente, debe ser menor o igual que 120 [kW] o al valor definido por:

$$t_s \times Q_t \leq 100$$

Donde:

t_s : tiempo de seguridad [s]; tome el valor de 3 o 5 dependiendo de si el consumo máximo del quemador es menor o mayor que 70 [kW] respectivamente.

Q_t : Consumo calorífico máximo de encendido, expresado en porcentaje con respecto al consumo calorífico nominal. [%]

2.5 Descripción de ensayos de operación

Esta sección tiene el objetivo de describir todos los ensayos relativos al banco de pruebas y/o al hogar de combustión propuesto, excluyendo de la lista a los requisitos de funcionamiento del tren de válvulas y a los del diseño y construcción del quemador como tal. Puntualmente los parámetros que son posibles de medir en el hogar de combustión propuesto, ya sea directa o indirectamente son:

- Composición de los gases de combustión
- Exceso de aire
- Temperatura de los gases de combustión
- Presión en la cámara de combustión
- Caudal de aire y combustible (Quemadores tipo laboratorio, que no tengan incorporado tren de válvulas que incluya medidor de caudal en su estructura)
- Consumo calorífico, conociendo el caudal de aire y el poder calorífico del combustible.

La normativa NCh 3111 con la cual se trabaja en este informe es general para todos los tipos de quemadores de aire forzado, donde la intención de este apartado es la de poder aplicar esta normativa al caso solicitado, que corresponden a quemadores de aire forzado de premezcla total, con varios escalones y operando con gas natural, de manera de poder trabajarla de una manera sencilla y práctica.

Destacar que se dejaron fuera la descripción de ensayos relativos al análisis de funcionamiento y estabilidad de llama, debido a que en la combustión de medios porosos no conlleva a la formación de llama como resultado de la combustión.

2.5.1 Resistencia del quemador al sobrecalentamiento

2.5.1.1 Descripción del ensayo

Para un quemador de premezcla total, el quemador se alimenta 10 min con el gas límite de retroceso de llama indicado en la Tabla 2 (G222), a un consumo calorífico igual a $1,09Q_{max}$, y la presión en la cámara de combustión se regula al valor máximo correspondiente al consumo máximo indicado por el fabricante.

2.5.1.2 Criterios para aprobarlo

Piezas del quemador al ser examinadas visualmente no deben presentar ningún deterioro que no sea la alteración superficial originada por la combustión.

2.5.2 Temperatura de los dispositivos de regulación y seguridad

2.5.2.1 Descripción del ensayo

Quemador se alimenta con el gas de referencia al consumo calorífico máximo. Se mide la temperatura de los elementos de control y seguridad a temperatura ambiente y después de 30 min se vuelven a medir.

Se destaca que en el caso que un componente eléctrico genere calor en sí mismo una elevación de temperatura, las sondas se deben colocar de forma que midan la temperatura del aire que lo rodea.

2.5.2.2 Criterios para aprobarlo

La temperatura de los dispositivos de ajuste, regulación y seguridad, no deben sobrepasar el valor indicado por el fabricante, y su funcionamiento debe permanecer correcto.

En cuanto a los mandos y palancas destinados a ser manipulados, no debe sobrepasar una variación de temperatura en:

- 35° para los materiales metálicos
- 45° para los materiales cerámicos
- 60° para los materiales plásticos

2.5.3 Rango de consumo calorífico del quemador

2.5.3.1 Descripción del ensayo

Cálculo de acuerdo con el Anexo F. Medición se llevan a cabo en condiciones referenciales, parámetros a medir para ejecutar dicho cálculo son el consumo másico o volumétrico y la temperatura de los gases, con la cual a su vez se pueden determinar todos los parámetros de los gases dependientes de la temperatura, como la densidad y su poder calorífico.

2.5.3.2 Criterios para aprobarlo

El consumo calorífico nominal máximo y el mínimo no se deben desviar $\pm 5\%$ de los valores indicados por el fabricante.

2.6 Ensayos definidos por los diagramas de funcionamiento y ensayos

Los diagramas de funcionamiento y ensayo, en grandes términos, corresponden a rangos en los cuales están definidos los puntos de operación de los quemadores. Una definición más detallada de cada uno será llevada a cabo en los puntos 2.6.2 y 2.6.3 respectivamente.

Estos rangos están definidos por puntos que son importantes para la caracterización del quemador en cuestión ya que definen las condiciones para una serie de ensayos que se describirán en los puntos consiguientes.

2.6.1 Consideraciones

Para poder verificar las condiciones respectivas a cada punto, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

2.6.1.1 Emisiones de NO_x

Concentración de NO_x están definidas para condiciones de referencia de 20°C y 70% (o 10 [g/kg]) de humedad, condiciones distintas a las dichas se deben corregir acorde a la siguiente fórmula:

$$NO_{xr} = (NO_x)_M + \left[\frac{0,02(NO_x)_M - 0,34}{1 - 0,02(h_m - 10)} \right] \cdot (h_m - 10) + [0,85(20 - T_M)]$$

Donde:

- $(NO_x)_M$: Medida de NO_x a h_m y T_M , expresada en [mg/kWh]
- h_m : Humedad durante la medición de $(NO_x)_M$ expresada en [g/kg]
- T_M : Temperatura durante la medición de $(NO_x)_M$ expresada en [°C]
- NO_{xr} : Valor de NO_x corregido

Es importante destacar que para quemadores que funcionan con la segunda (y tercera, pero no es el caso) familia de gases, las emisiones se clasifican en clases de acuerdo con la concentración de NO_x que contengan sus gases resultantes de la combustión de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 15 Clases NOx según concentración

Clase	Emisiones de NO_x en [mg/kWh]
	Segunda Familia
1	≤ 170
2	≤ 120
3	≤ 80

Una vez definida la clase del quemador, los valores de concentración de NO_x no deben ser superiores al valor umbral de la inmediatamente superior, sin embargo, para cumplir con la ley basta que sea menor de 170 [mg/kWh] para todos los casos.

2.6.1.2 Arranque del quemador

En los puntos 2.7.2 y 2.7.3 se definirán las condiciones en el hogar de ensayos correspondiente a los puntos del diagrama de funcionamiento y el de ensayo. En cada punto se regularán los parámetros acordes a las condiciones descritas en cada uno, pero con la diferencia que se debe bajar la alimentación eléctrica el 100% (normal) al 85% del valor mínimo del rango de tensión especificado por el fabricante.

Se efectúan 3 ensayos de arranque en cada punto:

- Primer ensayo: fluido refrigerante frío

- Segundo ensayo: Se apaga el quemador e inmediatamente se reenciende.
- Tercer ensayo: Se apaga el quemador e inmediatamente se reenciende.

Después del segundo y tercer ensayo se debe verificar que el tiempo de encendido entre uno y otro no sea mayor que 5 segundos. Además, en cada ensayo se debe verificar por examen visual que no exista fluctuación excesiva de presión o que no aparezca ninguna oscilación de llama en el tubo hogar.

2.6.2 Diagrama de funcionamiento

El diagrama de funcionamiento representa el rango de utilización admisible del quemador según la presión de la cámara de combustión, expresado en función del consumo calorífico del quemador

Para los quemadores de potencia variable, los límites de estos rangos están delimitados por los puntos del 1 al 6 indicados en el Anexo G.

2.6.2.1 Punto 1

Alimentado con el gas de referencia, a una presión normal de alimentación se regula:

- Consumo calorífico a su valor máximo
- Tensión eléctrica a su valor nominal
- El factor de aire menor o igual a 1,2
- Presión en la cámara de combustión a su valor mínimo.

Bajo estas condiciones se verifica que se cumplan las siguientes condiciones:

- Verificación combustión CO , NO_x
 - Concentración de CO no debe sobrepasar los 100 [mg/kWh] o 93 [ppm]
 - Concentración de NO_x no debe sobrepasar los 170 [mg/kWh]
- Verificación de las temperaturas de los dispositivos de control y seguridad descritas en el punto 2.5.2
- Verificación de los valores de CO son 0,85 de la tensión eléctrica declarada sea menor a 2140 [mg/kWh] o 2000 [ppm]
- Bajar la tensión a un valor menor al 0,7 de la tensión declarado, si la concentración de CO no se mantiene menor que el 1% del porcentaje en volumen de los gases resultantes, entonces se debe activar una parada de emergencia.
- El consumo calorífico declarado no debe variar más de 5%, cuando el regulador de presión de alimentación de gas varíe entre P_{max} y P_{min} , que para la segunda

familia corresponde a 0,8 y 1,2 veces la presión normal indicada por el fabricante respectivamente.

- Se sustituye el gas de referencia por el gas límite de retroceso de llama y se verifica el encendido
- Si el consumo calorífico es menor o igual que 150 [kW], se sustituye el gas límite de desprendimiento para verificar el encendido.

2.6.2.2 Puntos 2, 5 y 6

Alimentado con el gas de referencia, a una presión normal de alimentación, se regula:

- Consumo calorífico al valor declarado
- Tensión eléctrica a su valor nominal
- λ menor o igual que 1,2
- Presión máxima para los puntos 2 y 6 y mínima o nula para el punto 5

Bajo estas condiciones se verifica:

- Combustión:
 - Concentración de CO no debe sobrepasar los 100 [mg/kWh] o 93 [ppm]
 - Concentración de NO_x no debe sobrepasar los 170 [mg/kWh] o el valor máximo acorde a la clase declarada.
- Se abre la clapeta de aire al máximo y se verifica visualmente la estabilidad de encendido del quemador.

2.6.2.3 Punto 3

Alimentado con el gas de referencia, a una presión normal de alimentación, se regula:

- Consumo calorífico al su valor nominal mínimo
- Tensión eléctrica a su valor nominal
- λ menor o igual que 1,3
- Presión de la cámara de combustión a su valor máximo.

Bajo estas condiciones se verifica:

- Combustión:
 - Concentración de CO no debe sobrepasar los 100 [mg/kWh] o 93 [ppm]
 - Concentración de NO_x no debe sobrepasar los 170 [mg/kWh] o el valor máximo acorde a la clase declarada.
- Se abre la clapeta de aire al máximo y se verifica visualmente la estabilidad de encendido del quemador.

2.6.2.4 Punto 4

Alimentado con el gas de referencia, a una presión normal de alimentación se regula:

- Consumo calorífico al su valor nominal mínimo
- Tensión eléctrica a su valor nominal
- λ menor o igual que 1,3
- Presión de la cámara de combustión a su valor mínimo o nulo.

Bajo estas condiciones se verifica:

- Combustión:
 - Concentración de CO no debe sobrepasar los 100 [mg/kWh] o 93 [ppm]
 - Concentración de NO_x no debe sobrepasar los 170 [mg/kWh] o el valor máximo acorde a la clase declarada.
- Se abre la clapeta de aire al máximo y se verifica visualmente la estabilidad de encendido del quemador.

En este punto además se llevan a cabo ensayos adicionales para quemadores de premezcla total, que es el caso de estudio:

- Se sustituye el gas de referencia por el gas límite de retroceso de llama y se deja funcionar el gas durante 10 min, bajo estas condiciones se evalúa visualmente la estabilidad de encendido de llama.

2.6.3 Diagrama de ensayo

Por otro lado, el diagrama de ensayos, representa los rangos de presión en la cámara de combustión y los rangos de consumo calorífico del quemador, en los que se ensaya el quemador para verificar su conformidad con la norma.

Se compone del diagrama de funcionamiento y, para los quemadores de potencia variable, por los puntos Hp1, Hp2, Hp3, Hp5 y Hp6 indicados en el anexo G.

2.6.3.1 Punto Hp1

Con las mismas condiciones que el punto 1, pero se aumenta un 9% el gas de referencia o se sustituye el gas de referencia con el gas límite de combustión incompleta. Bajo estas condiciones se verifica:

- Concentración de CO no debe sobrepasar los 2140 [mg/kWh] o 2000 [ppm]
- Se abre la clapeta de aire al máximo y se verifica visualmente la estabilidad de encendido del quemador.
- Consumo calorífico del quemador se configura para que opere a $1.09Q_{max}$. La presión en la cámara de combustión se regula al valor máximo correspondiente al Q_{max} acorde a la Figura 13. Bajo estas condiciones el quemador funciona

durante 10 min y se verifica que las diferentes piezas del quemador no presenten ningún deteriora al margen de la alteración originada por la combustión.

2.6.3.2 Punto Hp2 y Hp6

Con las mismas condiciones que los puntos 2 y 6. Además se regulan los siguientes parámetros:

- Se regula presión en la cámara de combustión 1,10 veces el valor máximo y se reajusta el consumo calorífico nominal.
- Se aumenta un 9% el consumo calorífico con el gas de referencia, o se sustituye el gas de referencia por el gas límite de combustión incompleta.

Bajo estas condiciones se verifica:

- Se verifica que la concentración de CO no sobrepase los 2140 [mg/kWh] o 2000 [ppm] cambiando el gas de referencia por el gas límite de combustión incompleta.
- Se abre la clapeta de aire al máximo y se verifica visualmente la estabilidad de encendido del quemador.

3 Diseño Banco de pruebas quemador de medios porosos

El objetivo de esta sección es la de describir el diseño práctico del banco de pruebas detallando los requerimientos solicitados, los rangos y resoluciones de sus elementos de medición, y un listado de pieza por sistema constituyente.

3.1 Generalidades

En términos generales, para el diseño del banco de pruebas se identificaron dos subsistemas principales; el de medición y el estructural.

La base del diseño del banco de pruebas es un módulo armado con perfiles de aluminio ensamblables con distintos grados de libertad dependiendo del elemento de unión que se utilice. De este módulo principal se desprende una columna, también construida con perfiles de aluminio, que sujeta un pirómetro y le da la distancia adecuada para que este pueda tomar mediciones de radiación de manera adecuada.

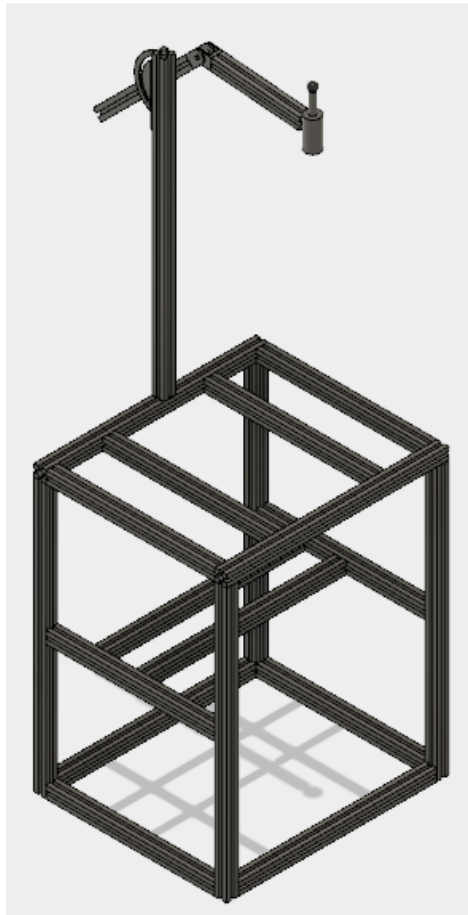


Figura 20 Banco de prueba acondicionado para muestras de radiación

Es importante destacar que en el dimensionamiento del módulo está considerada la futura instalación del hogar de combustión detallado en los planos del Anexo A una vez que éste sea construido. En base a esto, se recalca el hecho que el objetivo de esta investigación es la construcción de un banco de pruebas que sea capaz de medir la radiación emitida de los quemadores a nivel laboratorio, pero a la vez que sea capaz de acoplar a su estructura el hogar de combustión diseñado acorde a la normativa, para que se puedan llevar a cabo todos los ensayos descritos en el punto anterior teniendo como objetivo final verificar que los quemadores cumplan con los requisitos exigidos en la certificación.

La instalación del hogar de combustión sobre el módulo de aluminio se deberá llevar a cabo acorde a la siguiente figura.



Figura 21 Banco de pruebas con hogar propuesto acoplado

Como se puede observar en la imagen anterior, el armazón de aluminio se posiciona de costado para acoplar el HDC en el lado con mayor área. Los perfiles proporcionan una altura de 650 mm sobre el nivel del suelo, lo que significa que la puerta y visores se encontrarían a una distancia no muy adecuada para su uso y manipulación. Es por esto que se sugiere por temas ergonómicos que el conjunto completo se posicione sobre una superficie en altura (por ejemplo, una mesa del laboratorio de TFL).

Para unir el hogar a la estructura de aluminio, esto se hace mediante una placa mecanizada de acero que mediante pernos se une a éste y al armazón. Esta placa actúa como base del hogar de combustión y es la encargada de hermetizar por la parte inferior de ella.

De esta forma, se propone un hogar lo más flexible posible que cumpla con los requisitos que plantea la normativa, específicamente en el caso de la placa, que cumpla con los requisitos de hermetismo; en este contexto se propone que, para que el hogar sea compatible con la mayor cantidad de quemadores en cuanto a tamaño y forma, se arme una segunda estructura de perfiles de aluminio, esta vez de tamaño

considerablemente más pequeño, que sea capaz de dar apoyo y suspender el quemadores a testear a una altura suficiente para que la única abertura de la placa corresponda a los sistemas de ignición y de suministro de aire y combustible. Esto se puede graficar en la siguiente figura:

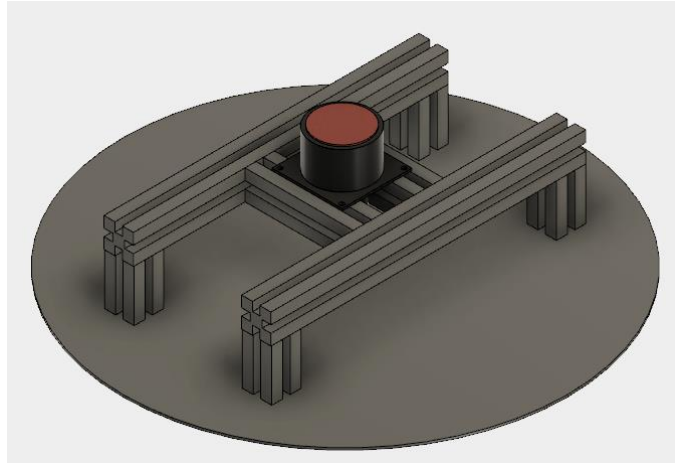


Figura 22 Estructura propuesta porta quemador

Las dimensiones específicas de esta estructura son indiferentes siempre y cuando estén dentro de los límites del hogar, es decir 428 mm de largo, 428 mm de ancho y 130 mm de alto.

De esta forma, la placa que sostiene el HDC, independiente del tamaño y forma del quemador, se puede mecanizar de la siguiente manera:

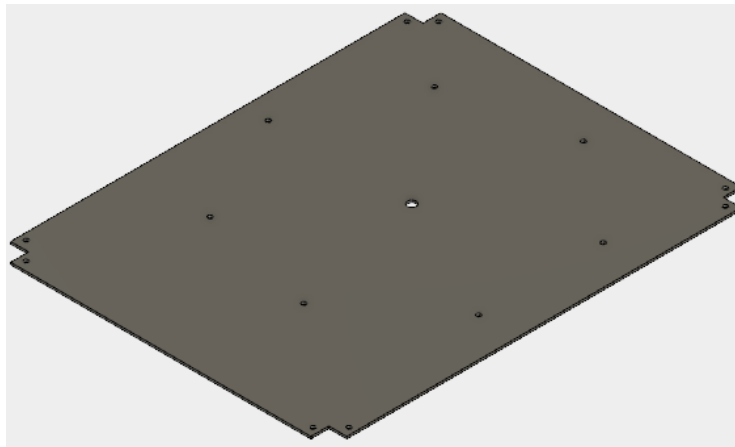


Figura 23 Placa auxiliar para acoplar el hogar al BDP

Detalles más específicos de las dimensiones de la placa propuesta se encuentran disponibles en el Anexo B.9

Cabe recordar que la medición de parámetros de los quemadores según plantea la normativa se lleva a cabo de a uno con su respectivo sistema de inyección de aire

forzado, de ahí el soporte propuesto. En el caso que lo que se busque sea testear quemadores con sus sistemas de inyección de aire y/o tren de válvulas acoplado con una geometría que no sea compatible con lo propuesto anteriormente, se recomienda se acomode el diseño de la placa al diseño a la geometría del conjunto sellando con placas auxiliares de ser necesario.



Figura 24 Ejemplo conjunto quemadores y ventilador Quempin acoplado a placa base

3.1.1 Requerimiento banco de pruebas

Los requerimientos de construcción del banco de pruebas para la toma de muestra de quemadores apuntando a su posterior certificación se profundizaron en detalle en la sección 2.2. Por lo tanto, el objeto de este punto es el de definir los requerimientos solicitados para el muestro de radiación de quemadores.

Se tomaron en cuenta los siguientes requerimientos que definirían el diseño y la selección de piezas:

- Flexibilidad en el diseño, es decir, la posibilidad de probar distintos quemadores de MPI de distintas geometrías y en distintas configuraciones.
- Permitir una manipulación rápida y sencilla
- Capacidad de realizar mediciones de los siguientes parámetros, sin considerar los parámetros que se pueden mesurar con el sistema de cierre propuesto:
 - Temperatura en la superficie del MPI.
 - Potencia radiativa y total del quemador.
 - Consumo de aire y de combustible en los quemadores.

3.2 Sistema de medición

Para las mediciones de radiación de los quemadores, el instrumento a utilizar corresponde a un pirómetro de dos colores o pirómetro de relación. En general, un pirómetro es un instrumento para medir temperatura en rangos altos y sin necesidad de estar contacto con el objeto que se requiere medir. El pirómetro de dos colores, por su parte, mide la energía radiada de un objeto entre dos bandas estrechas de longitud de onda y calculan la relación de las dos energías, que depende de la temperatura del objeto.

La técnica de relación puede eliminar, o reducir, errores en la medición de temperaturas provocadas por cambios en la emisividad, el acabado de la superficie y materiales que absorban la energía entre el pirómetro y objeto a medir, llevando a que este instrumento cuente con una alta precisión. [36]



Figura 25 Pirómetro Lumasense

Particularmente para este caso el pirómetro de dos colores es de marca Lumasense INC modelo ISQ-5, cuyo rango de medición es de 700°C – 1800°C, con resolución de 0.1°C [37].

3.3 Sistema estructural

El trabajo con los perfiles ensamblables consistió básicamente en el dimensionamiento y unión de perfiles ensamblables para finalmente armar el módulo que constituye el apoyo tanto de los quemadores como de los sistemas de alimentación y de los instrumentos de medición que se utilizarán para caracterizar el banco de prueba. Los perfiles de aluminio ya fueron descritos en el punto 1.6 y los accesorios a utilizar en la construcción del BDP se definen a continuación.

3.3.1 Accesorios perfiles ensamblables

El objetivo de esta sección es la de describir y justificar los accesorios que se utilizarán en la construcción elementos estructurales que conforman el banco de prueba:

- Bracket: Accesorio utilizado para unir 2 cortes de perfiles en 90° de forma “permanente”, ya que implica el uso de herramientas para poder desmontar este accesorio. Se utilizará en esta oportunidad para unir los cortes de perfiles que

no requieran desplazarse a lo largo de la ranura de los perfiles en los cuales están instalados.

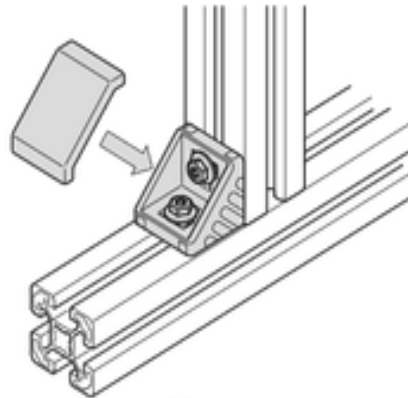


Figura 26 Esquema bracket

- Conector rápido: Elemento para unir cortes de perfiles en 90°, se diferencian de los brackets por qué no requieren de ningún elemento de unión extra, ni tampoco herramientas para montar y desmontar este accesorio, si no que se unen los perfiles con el mecanismo que se puede ver en la siguiente figura

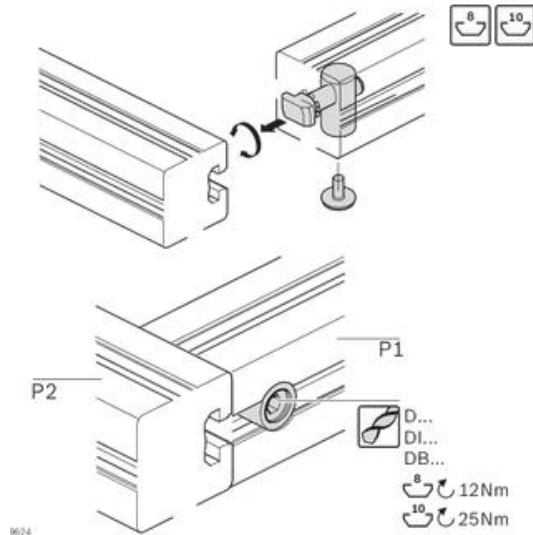


Figura 27 Esquema conector rápido

Basta con girar el perfil en 90° como muestra la imagen para bloquear o desbloquear el movimiento del perfil en la ranura. Es esta capacidad de desplazarse por la ranura de los perfiles a los cuales está conectado lo que le da movilidad y flexibilidad a la estructura del módulo.

El detalle de este accesorio está en que requiere que se lleven a cabo perforaciones en el perfil para su instalación.

- Plantilla de perforación: Como se mencionó anteriormente, la instalación de los conectores rápidos requiere una perforación perpendicular al eje de los perfiles, para asegurar que ésta sea realizada de manera adecuada y para brindar la distancia adecuada desde el extremo del perfil hasta el lugar que se busca perforar, se requiere de este elemento para que actúe como guía del elemento de perforación.

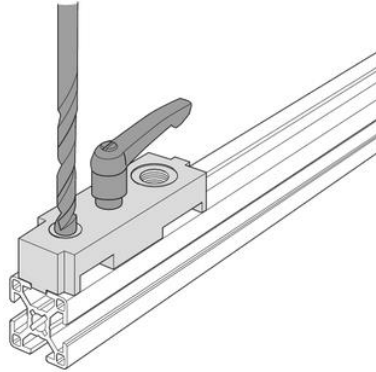


Figura 28 Plantilla de perforación perfiles de aluminio

- Rueda: Rueda doble de 10 [mm] de diámetro para aplicaciones de carga ligera, accesorio que brinda movilidad al conjunto en su totalidad.



Figura 29 Ruedas de 10 mm para el BDP

- Elemento de torsión: Accesorio que brinda resistencia a la torsión a los elementos estructurales unidos mediante conectores rápidos. Oponen resistencia a movimiento giratorio en 90 grados de los perfiles requerido para trabarlos y destrabarlos.

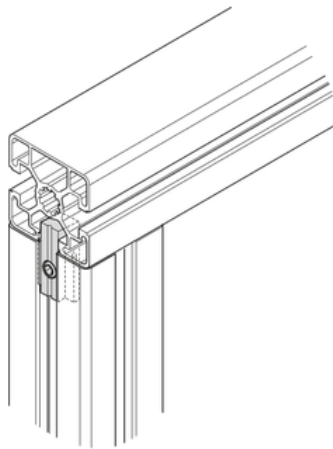


Figura 30 Elemento de torsión

- Junta giratoria 180°: Elemento de unión giratorio que permite posicionar un perfil con respecto a otro en un ángulo de $\pm 90^\circ$

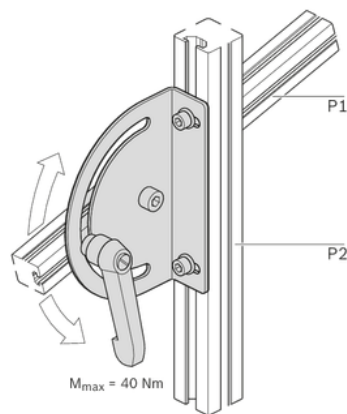


Figura 31 Junta giratoria

- Palanca: Elemento de sujeción para conexiones ajustables. En este caso se utiliza como un elemento auxiliar para ajustar la planilla de perforación a los perfiles.



Figura 32 Palanca

- Bloque deslizable y resorte: Elemento que aporta en la absorción de fuerzas de mayor magnitud.

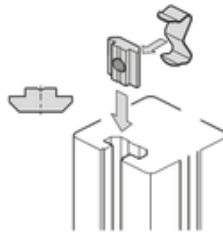


Figura 33 Bloque deslizante y resorte

- Unión 40x40: Accesorio utilizado para posicionar un perfil con respecto a otro en cualquier ángulo, en este caso se utiliza para darle grados de libertad al conjunto porta pirómetro.



Figura 34 Joint 40x40

3.3.2 Elementos estructurales en base a perfiles de aluminio

El objetivo de esta sección es la de describir los elementos estructurales que se busca armar con los perfiles y accesorios descritos anteriormente

3.3.2.1 Módulo principal

Los cortes de perfiles requeridos para poder armar el módulo principal, en conjunto con sus accesorios se detallan en el Anexo I.1

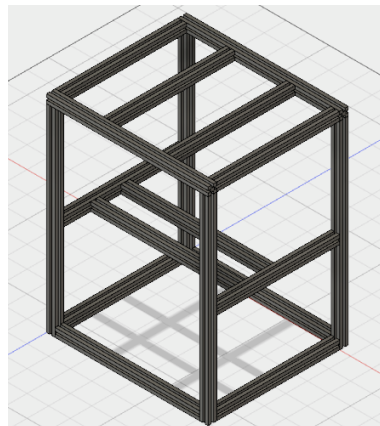


Figura 35 Diseño propuesto banco de prueba

Los conectores rápidos, que son los accesorios que permiten el movimiento rápido y fácil de un perfil con respecto a otro, se instalan en los dos niveles superiores, permitiendo movilidad de estos e incluso permite poder incluir más cortes de perfiles en estos niveles.

El principal beneficio de este diseño son los asociados a la capacidad de cada perfil de ensamblarse y desensamblarse de manera simple, lo cual permite que en el módulo principal se puedan testear tanto distintas configuraciones de quemadores en un sistema abierto o bien acomodar el módulo a las dimensiones de la placa mecanizada para instalar el hogar de combustión.

En resumen, las principales características del módulo principal son:

- Marco metálico modular en base a perfiles de aluminio.
- Dimensiones máximas de 920 [mm] x 750 [mm] x 670 [mm].
- Flexibles para ensamblaje de secciones individual y múltiple.
- Fácil armado, desarmado y manipulación.
- Ruedas asegurables para libre desplazamiento.

3.3.2.2 Columna y brazo flexible porta pirómetro

Cómo su nombre lo dice, este conjunto tiene la misión de posicionar el pirómetro a una distancia apropiada para que puede realizar las mediciones de temperatura del quemador. Este conjunto consta básicamente de un corte de perfil relativamente largo que actúa como una columna vertical brindando la distancia adecuada para tomar las mediciones, éste en conjunto con la junta giratoria y la unión (Accesorios descritos en el punto 3.4.1) conforman un brazo con 3 grados de libertad que permiten posicionar el pirómetro en distintos ángulos y distancias con respecto al quemador. Los elementos que componen este conjunto se detallan en el Anexo I.2



Figura 36 Columna y brazo porta pirómetro

El principal beneficio de este conjunto es que ofrece la posibilidad de que el pirómetro sea capaz de desplazarse en los tres ejes para flexibilidad al momento de tomar las medidas de temperatura del quemador.

3.4 Ejemplo de Mediciones

Como se mencionó anteriormente, las mediciones que se pueden llevar a cabo directamente en el banco de pruebas corresponden a la temperatura de la superficie del quemador y a los caudales de aire y combustible. Con estas mediciones a su vez se puede calcular los siguientes parámetros:

- Potencia radiativa, que corresponde a la energía debido a la temperatura de la superficie del quemado y se condice con la ley de Stephan-Boltzman.
- Potencia del combustible, que corresponde a la energía suministrada por el combustible.
- Tasa radiativa, que corresponde al porcentaje de energía suministrada como combustible que se disipa como radiación.
- Potencia específica, que corresponde a la energía que entrega el quemador por unidad de área.
- Exceso de aire de combustión, o lambda, que se puede calcular conociendo los caudales de aire y combustible.

La intención de este punto es presentar un ejemplo de mediciones que podrían ser llevadas a cabo en el sistema propuesto. Gráfico que se presentara corresponde al comportamiento experimental de la potencia radiativa y específica cuando se varía el caudal de aire y combustible.

Importante acotar que las mediciones fueron hechas en un solo punto del quemador asumiendo temperatura homogénea en la matriz porosa y que se llevaron a cabo con un caudal de combustible constante, sin embargo, son válidos para mostrar los tipos de mediciones y las tendencias esperadas en cada una.

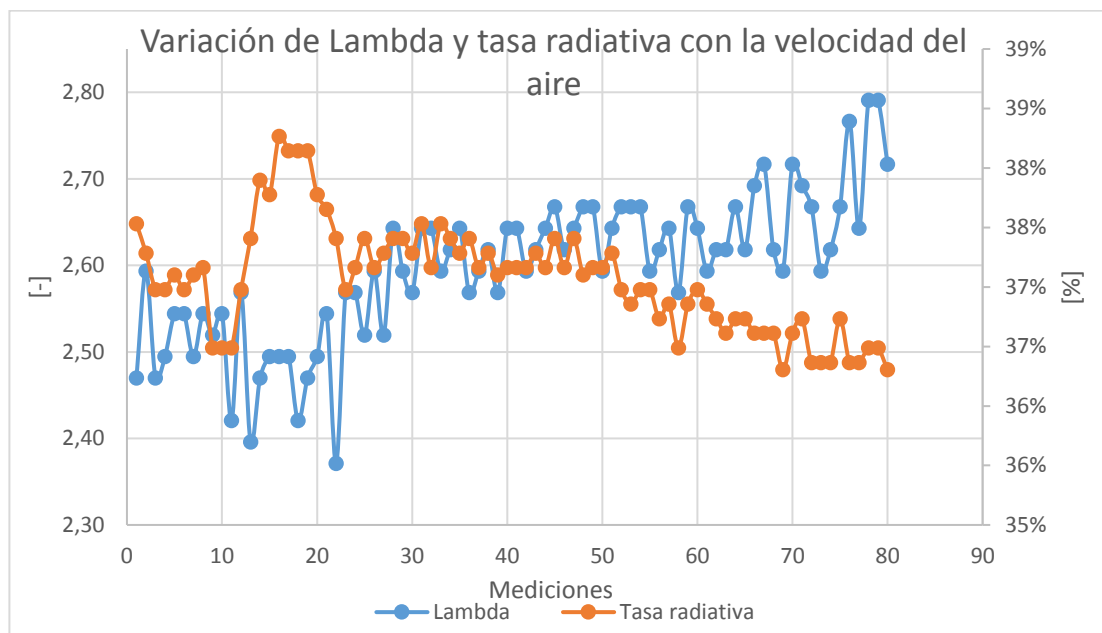


Gráfico 1 Variación lambda y tasa radiativa acorde a velocidad del aire

El gráfico corresponde a un registro de la variación de la tasa radiativa λ a medida que se va incrementando la velocidad, y por ende el caudal, de aire de combustión. Para tener una visión mas clara del comportamiento de los parámetros mencionados, el caudal de combustible se mantuvo constante a 2 [L/min]. Se puede observar en el gráfico entonces como a medida que se aumenta la velocidad del aire, aumenta el valor de λ y disminuye a su vez la tasa radiativa, esto debido a que a mayor carburante la mezcla se hace más pobre y esto repercute directamente en la temperatura de la superficie del quemador.

Se seleccionó este gráfico como ejemplo ya que representa de manera directa la relación entre aire de combustión y temperatura de la superficie, que es lo que propone medir el banco de pruebas.

4 Proceso de construcción

El objetivo de esta sección es la de describir y complementar de manera visual el proceso de construcción el sistema estructural descrito en la sección anterior.

4.1 Dimensionado de perfiles

Este paso se llevó a cabo mediante el uso de una sierra ingleteadora marca Einhell modelo TH-SM 2534 Dual, que corresponde a una sierra circular para llevar a cabo cortes transversales a los perfiles cuyo elemento de corte corresponde a un disco con dientes de carburo tungsteno de 10" de diámetro y 80 dientes. El uso de esta herramienta se valida considerando la importancia de que los cortes terminen en un ángulo de 90° para que se puedan ensamblar sin problemas unos con otros.



Figura 37 Sierra ingleteadora con perfil de aluminio montado

Para llevar a cabo este trabajo se llevaron a cabo 21 cortes distribuidos en 8 perfiles de aluminio de 2 [m] cada uno.



Figura 38 Perfiles dimensionados

4.2 Instalación de elementos de unión

La intención de esta sección es la de plasmar un registro fotográfico de la instalación de los accesorios descritos en el punto 3.3.2 para mostrar el resultado final de los perfiles dimensionados con sus elementos de unión.

En primer lugar, se llevó a cabo la instalación de los conectores rápidos; para esto se debieron perforar los perfiles utilizando la planilla de perforación descrita en el punto 3.3.2 y un taladro de pedestal. Para el lado de utilizó una broca helicoidal de 17 mm de diámetro.



Figura 39 Corte de perfil montado taladro de pedestal

En total se llevaron a cabo 14 perforaciones correspondientes a los 7 cortes que se diseñaron para tener movimiento en el riel de su corte paralelo. Seguido de esto, se tuvo que remover mediante lijado el material sobrante para introducir los conectores y el resultado se puede observar en la siguiente figura:



Figura 40 Cortes con los conectores rápidos instalados

4.3 Instalación de accesorios simple ensamble

Se le denomina simple ensamble a los accesorios que no involucran el manejo de ningún tipo de instrumento extra, por lo tanto, su proceso de instalación es muy similar al de la descripción de los accesorios en el punto 3.3.1, por lo cual se menciona en pos de mantener la cronología de la construcción, pero no se respalda totalmente con registro fotográfico.



Figura 41 Ejemplo de accesorio estructural: rueda y bracket con tapa

4.4 Instalación soporte sistema de medición

El sistema de medición corresponde al pirómetro descrito en el punto 3.2. Para esto se tuvo que crear un soporte en base a retazos de acero conseguidos y trabajados en el taller general de las instalaciones de la universidad. El pirómetro tiene una abrazadera incluida, como se puede ver en la siguiente figura, que mediante un sistema de perno se puede acoplar a una placa con las dimensiones adecuadas. El soporte está conformado por 3 placas; dos en L, cuyo ángulo se logró doblando a presión los extremos apoyadas en una prensa y una tercera plana a la cual fueron soldadas las dos mencionadas anteriormente. La placa plana se perfora para hacer pasar por ella un perno parker M6 que por el otro extremo se fije con un accesorio con la geometría de la ranura para que esta sea capaz de desplazarse y posicionarse en cualquier parte del sistema estructural.



Figura 42 Soporte sistema de medición

4.5 Registro fotográfico estructura completa

Presentación del sistema estructural terminado, todo es móvil a excepción del cubo que forma la base, las ruedas también se pueden cambiar de posición para usarse en modo horizontal pensando en alguna futura instalación del hogar. Conjunto porta pirómetro brinda total grados de libertad al conjunto.



Figura 43 Sistema estructural

Finalmente, en la Figura 44 se puede ver el banco de pruebas en uso. En este caso el quemador disponible para testear tenía incluido su propio soporte, por lo que para tomar el ejemplo de mediciones del punto anterior, bastó con maniobrar el brazo del conjunto.

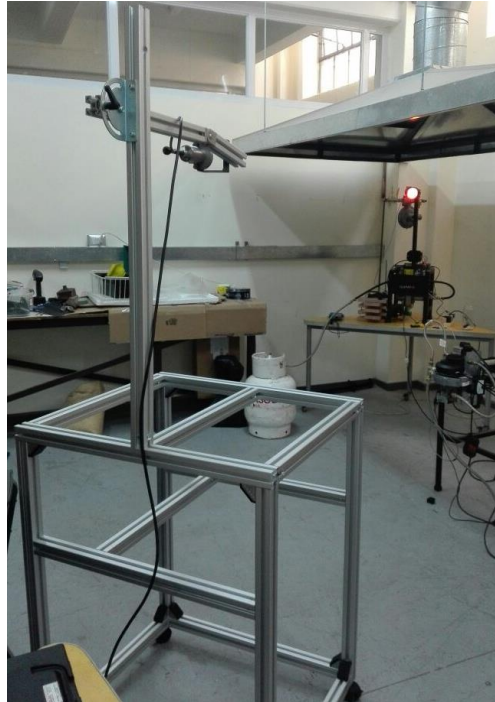


Figura 44 Banco de pruebas testeando quemador

CONCLUSIONES

Se puede concluir en forma global de esta investigación que es importante potenciar el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías de combustión, en un contexto donde el mayor porcentaje de combustible que se quema tanto para fines domésticos como industriales tiene procedencia fósil y por ende es finito, es imperativo continuar en la búsqueda de métodos que maximicen su eficiencia y reduzcan su impacto en el medio ambiente.

Para la aplicación particular que apunta el proyecto “Quempin”, que busca la inserción de estos quemadores en la industria panadera, el primer paso para sacar el producto al mercado corresponde a la certificación de los quemadores según todos los requisitos establecidos en la normativa chilena y para ello es fundamental saber medir los parámetros con los cuales está trabajando el quemador. En este estudio se lograron tres objetivos importantes que vienen a sumar en esta dirección cuyas conclusiones individuales de detallan a continuación:

La normativa chilena que delimita el correcto funcionamiento de un quemador de aire forzado que trabaja con combustibles gaseosos corresponde a un documento extenso y amplio en contenido que abarca desde el proceso de manufactura hasta el empaquetamiento, que además está confeccionado para todos los tipos de quemadores, todos los tipos de gases combustibles y niveles de potencia con el cual los quemadores podrían llegar a trabajar. Debido a esto, no resulta fácil seguir el hilo de las condiciones requeridas para cada ensayo, ni los criterios de aprobación que tiene dicho ensayo en particular. Es por esto que en este informe se cumplió con el objetivo de aplicar el documento en su totalidad al caso particular de los quemadores de MPI desarrollados por Quempin, en un formato práctico de “Condiciones de prueba/ criterios de aprobación” que se alinea con el check list con el cual trabaja el personal certificador de la SEC, lo cual facilita el trabajo de evaluación de los parámetros del quemador. Es importante tener presente que este manual detalla exclusivamente los ensayos que se pueden llevar a cabo en el hogar de combustión diseñado en esta investigación.

El segundo objetivo planteado tiene relación con la elaboración de planos de construcción que posteriormente puedan ser enviados a mecanizar, los que incluyen un sistema de control para la presión mediante la obturación de gases aguas arriba en la chimenea. Se comprueba que el analizador de gases disponible en el taller cumple con los requisitos de resolución y precisión que solicita la normativa. Por otro el rango de la presión dentro de la cámara en el caso más crítico de total cerrado del sistema de obturación se escapa de los instrumentos disponibles, que se propone por tema de reducción de costos un mano-vacuómetro de carátula con rango [-1,3] bar de presión absoluta con una resolución de al menos 0,1 bar.

En el informe se plantearon dos alternativas. La primera considera que todas las piezas que estén expuestas a la radiación del quemador y no al líquido refrigerante son de acero inoxidable 304L y la segunda alternativa plantea que toda la estructura es de

acero estructural. En la evaluación de alternativas se colocaron sobre la mesa dos parámetros, el costo de los materiales y el tiempo que podría estar encendido el quemador sin que el material alcanzara una temperatura crítica. En base a esto se puede concluir que la diferencia de tiempo que pueden estar encendido en ambas alternativas no es tan abismante como la diferencia de precio, entonces lo que se plantea es que el material sea seleccionado acorde al enfoque que se busque con la mecanización de dicho hogar; si lo que se busca es mecanizar el hogar principalmente como apoyo para el proyecto Quemapín a modo de conocer y controlar de antemano los parámetros que se están enviando al laboratorio externo de certificación, bastaría con la mecanización en acero estructural, siempre tomando las precauciones de tiempo de encendido de quemador y un tiempo prudente de enfriamiento. Por otro lado, si se busca apuntar más lejos y mantener el hogar como una herramienta más permanente, a la cual se pueda recurrir para proyectos futuros, entonces se recomienda que se opte por la primera opción.

Sin embargo, ya sea por una u otra opción, se recomienda llevar a cabo un estudio de elementos finitos que pueda fidelizar los tiempos calculados en este informe que son más que nada referenciales y comparativas. Finalmente, es de destacar el hecho de la potente herramienta que podría ser el tener disponible en las instalaciones universitarias un espacio acondicionado con todos los requerimientos de la SEC para la certificación de quemadores, tanto para este proyecto como para proyectos futuros.

El tercer objetivo cumplido en esta investigación corresponde a la construcción del sistema estructural de un banco de pruebas a base de perfiles ensamblables, característica que la da la opción de adaptarse a distintos tipos y formatos de quemadores de MPI. La construcción de este sistema estructural tiene distintos propósitos, el primero corresponde a darle soporte a los quemadores y al pirómetro para la medición de radiación pudiendo reemplazar el método estructural actual que correspondía en soldar una estructura acorde al formato y tamaño de quemador que se buscara medir, en segundo lugar, se plantea para que actúe como la estructura donde se posicionaría el HDC, ya que en su construcción se consideraron las dimensiones del hogar precisamente con este mismo fin. Su último propósito correspondería a dejar el legado para futuros proyectos con perfiles ensamblables al demostrar en este proyecto su fácil manipulación y variado rango de aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Çengel, Y., & Boles, M. (2015). *Termodinámica* (7th ed., pp. 772-792). México: McGraw-Hill.
- [2] Rosales, C. (2014). *Ecuaciones para combustión incompleta*. UTFSM, Valparaíso, Chile.
- [3] Universidad de Sonora. (2015). *Química de la combustión* (pp. 1-7). Sonora, México.
- [4] Grupo CGE (2007). *Manual del sector de la energía: Quema de combustible*. 4 p.
- [5] TESTO (2010) *Optimización de la combustión*. *Tiemporeal.es*. from <http://www.tiemporeal.es/archivos/optimizacioncombustion.pdf>
- [6] Rosales, C. (2013). *Combustión de Líquidos*. UTFSM, Valparaíso, Chile.
- [7] Universidad Politécnica de Valencia (2015). *Tipos de quemadores*. Departamento de Termodinámica aplicada, Valencia, España.
- [8] ¿Qué es el gas natural? *Gas extremadura*. *Dcgasextremadura.es*. Retrieved 18 December 2017, from <<http://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/>>
- [9] NCh 3111 Of. 2007, *Quemadores automáticos de aire forzado que utilizan combustibles gaseosos* (pp 4-8), INN, Santiago, Chile.
- [10] *Características principales de los gases combustibles*. *Gas extremadura*. *Dcgasextremadura.es*. Retrieved 20 December 2017, from <http://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/caracteristicas-principales-de-los-gases-combustibles/>.
- [11] Flórez-Orrego, D. *Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de GasNatural y Gas Natural-Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión*. (p. 6). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- [12] *Industrial Burners, Combustion Systems - Eclipse, Inc.* *Eclipsenet.com*. Retrieved 5 January 2018, from <http://www.eclipsenet.com/blog/what-is-turndown/>
- [13] M. M. Kamal and A. A. Mohamad. *Combustion in porous media*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 220:487, 2006. 3 p.

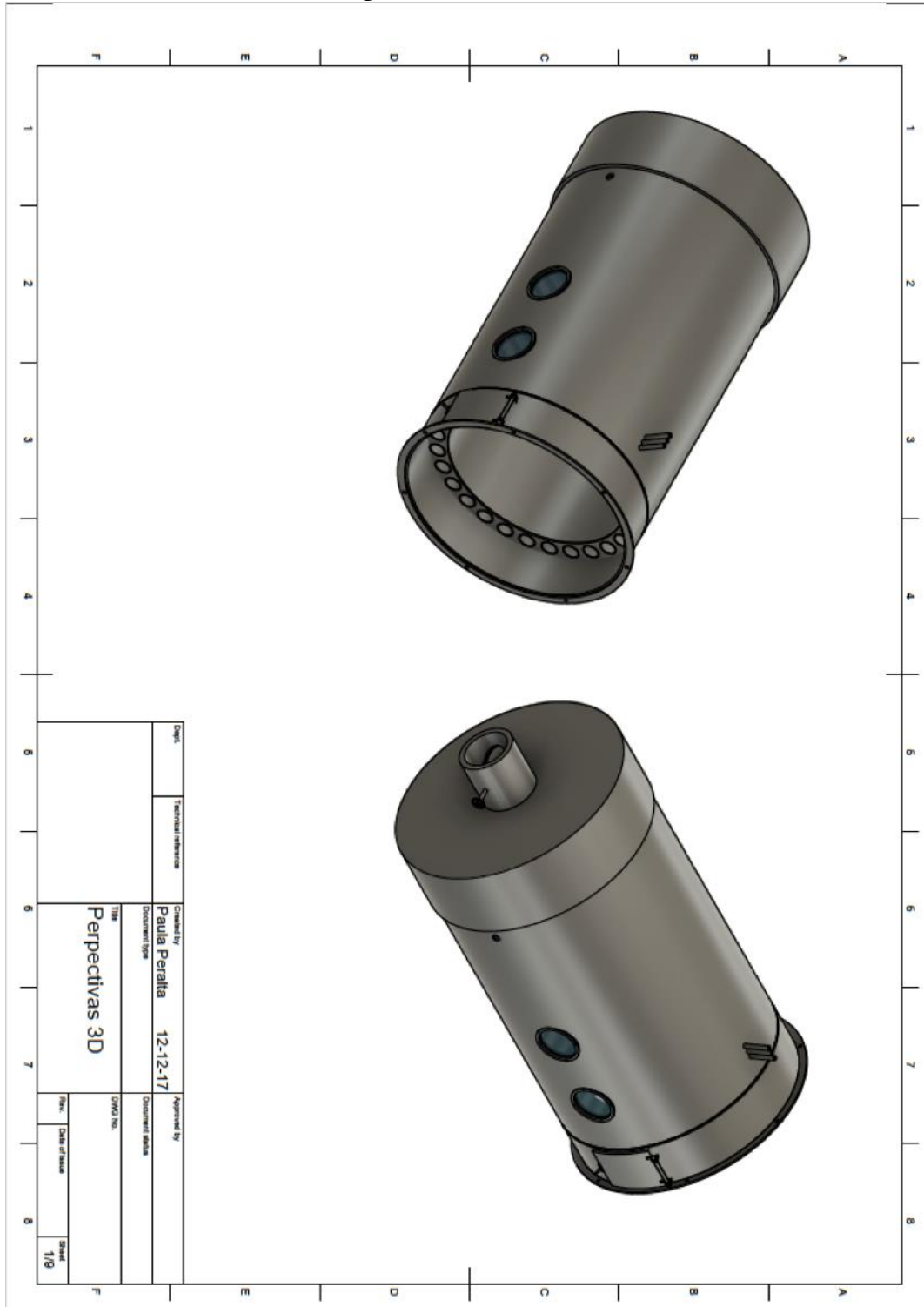
- [14] Wood S., y Harris A. (2008). *Porous burner for lean - burn applications*. Progress in Energy and Combustion Science 34, 667-684.
- [15] Barra A., Ellzey J. (2004). *Heat recirculation and heat transfer in porous burners*. Combustion and Flame 137, 230-241.
- [16] I. Malico y Dr. Muhammad Abdul Mujeebu. *Potential of porous media combustion technology for household applications*. International Journal of Advanced Thermofluid Research Vol. 1, No. 1, 2015. 52 p.
- [17] Martínez, I. (1992). *Termodinámica básica y aplicada* (pp. 6-7). Madrid: Dossat.
- [18] Henry Copete Lopez (2008), *Combustión con exceso de entalpía*, Revista Tecnologías No. 21, Chile, 21 diciembre 2018.
- [19] Lupant et al., 2007; Szegö et al., 2008; Effuggi et al., 2008.
- [20] Joaquín Rosas Piel (2016). *Aplicación de la tecnología de combustión en medios porosos inertes en oxicomustión y generación de gas de síntesis*. Memoria Ingeniero Civil Mecánico. UTFSM, Valparaíso.
- [21] Grupo Bosch Rex Roth. *Technical data for strut profile*. Boschrexroth.com. from <https://www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/do/Technical_Data_MGE_EN.pdf>
- [22] ¿Qué es el Acero? | Alacero. *Alacero.org*. Retrieved 11 January 2018, from <<https://www.alacero.org/es/page/el-acero/que-es-el-acero>>
- [23] CAP S.A. *INFOACERO - ¿Qué es el Acero? - Tipos de Acero*. (2000). *Infoacero.cl*. Retrieved 19 January 2018, from <http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm>
- [24] Milke, J.; Kodur, V.; Marrion, C. (2007). *Overview of Fire Protection in Buildings*. FEMA, Estados Unidos.
- [25] Salvarrey, M (2007). *Acero Estructural: Análisis a temperaturas elevadas*. IDIEM, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [26] NCh 933 Of. 1997. *Prevención de incendios en edificios*. INN, Santiago, Chile.
- [27] *Design guidelines for the selection and use of stainless*. Serie N°9014. Distribuido por Nickel Developpe Institute, Estados Unidos.

- [28] Cia General de Aceros. *Aceros inoxidables austeníticos: manual 304 y 304L*. Cga.com.co. Retrieved 28 January 2018, from <<https://www.cga.com.co/images/document/ficha-304-304L.pdf>>
- [29] UPMETAL, *Acero inoxidable calidad AISI 304L*. Retrieved 28 January 2018, <from <http://www.upmetal.cl/AISI304L.php>>
- [30] J.P Holman, *Transferencia de Calor* (10ma ed. p 667). México 1999. McGraw-Hill.
- [31] H. Y.; Lee, K. Y.; Kim, J. M.; Chio, S. K.; Park, J. H.; Choi, I. K. (2001) *Experimental study on the emissivity of stainless steel*. Actas de la reunión de primavera de la Sociedad Nuclear de Corea, 2001
- [32] Herrera, A.M.1; Álvarez, O.2; Escobar, J.3; Moreno, V.3; Oliveira Jr. A.A.M.3; Hotza, D. *Fabricación y caracterización de espumas de alúmina para aplicación en quemadores porosos radiantes*. Revista Materia, v. 17, n. 2, pp. 973-987, 2012
- [33] Irestal Group (2012) *Tablas técnicas del acero inoxidable*. Data.irestal.com. from <<http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>>
- [34] *Comportamiento del acero con la temperatura*. (2008). Ingemecánica. Retrieved <from <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn107.html>>
- [35] Tecnocontrol (2010) *Boston HD DataSheet*. Milan. Retrieved from <https://cpftecnogeca.com/images/Istruzioni/Spagnolo/BostonHD_ES.pdf>
- [36] Creus, A. (2011) *Instrumentación industrial 8va edición*, Barcelona España. Marcombo 2011
- [37] *ISQ 5 Datasheet*. (2011). Lumasenseinc.com. Retrieved 30 March 2018, from <https://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Temperature_Measurement/Infrared_Thermometers/IMPAC_Pyrometers/Series_5/pdf/EN-ISQ5_Datasheet.pdf>

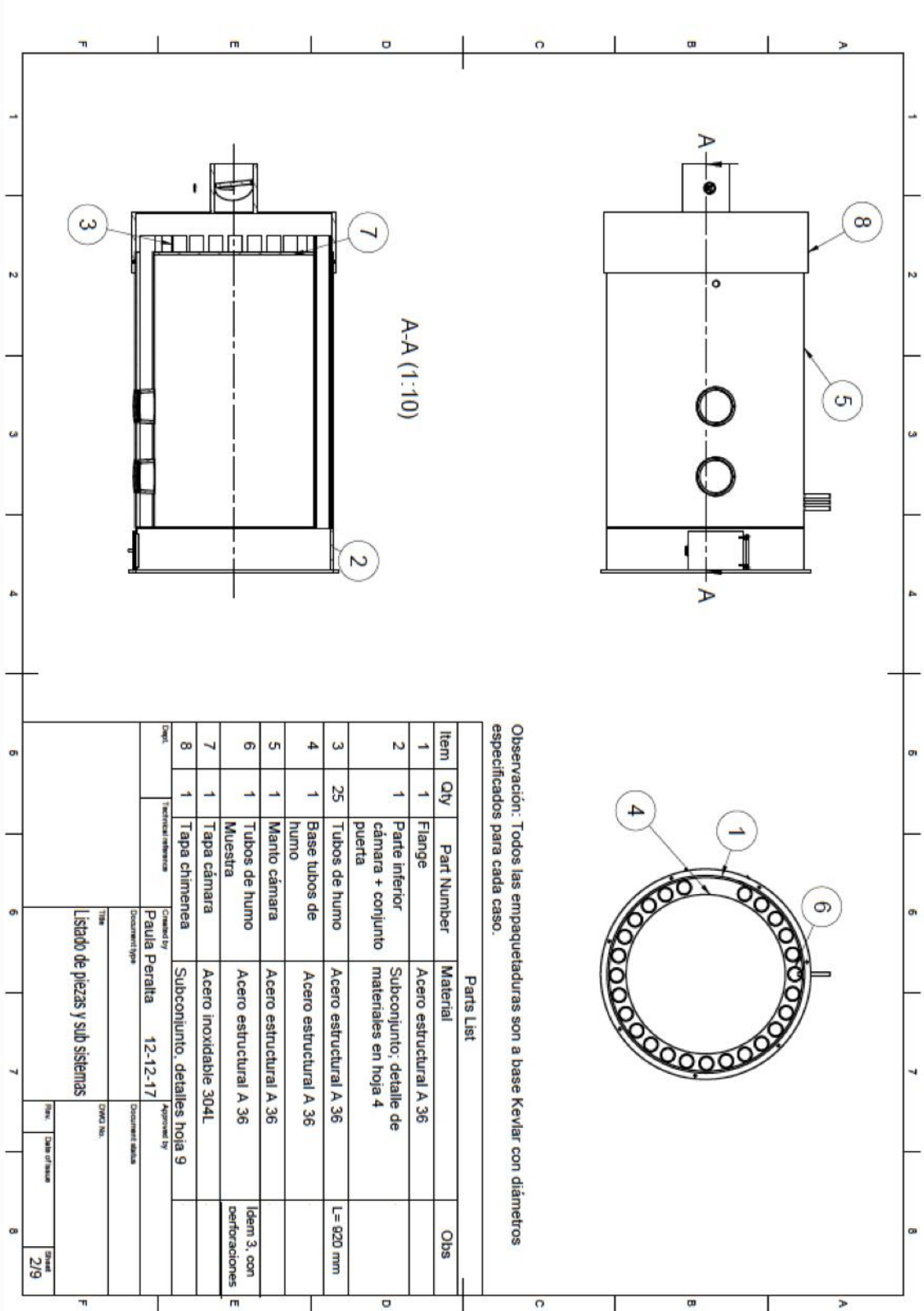
ANEXOS

A. Planos de construcción hogar de combustión según normativa.

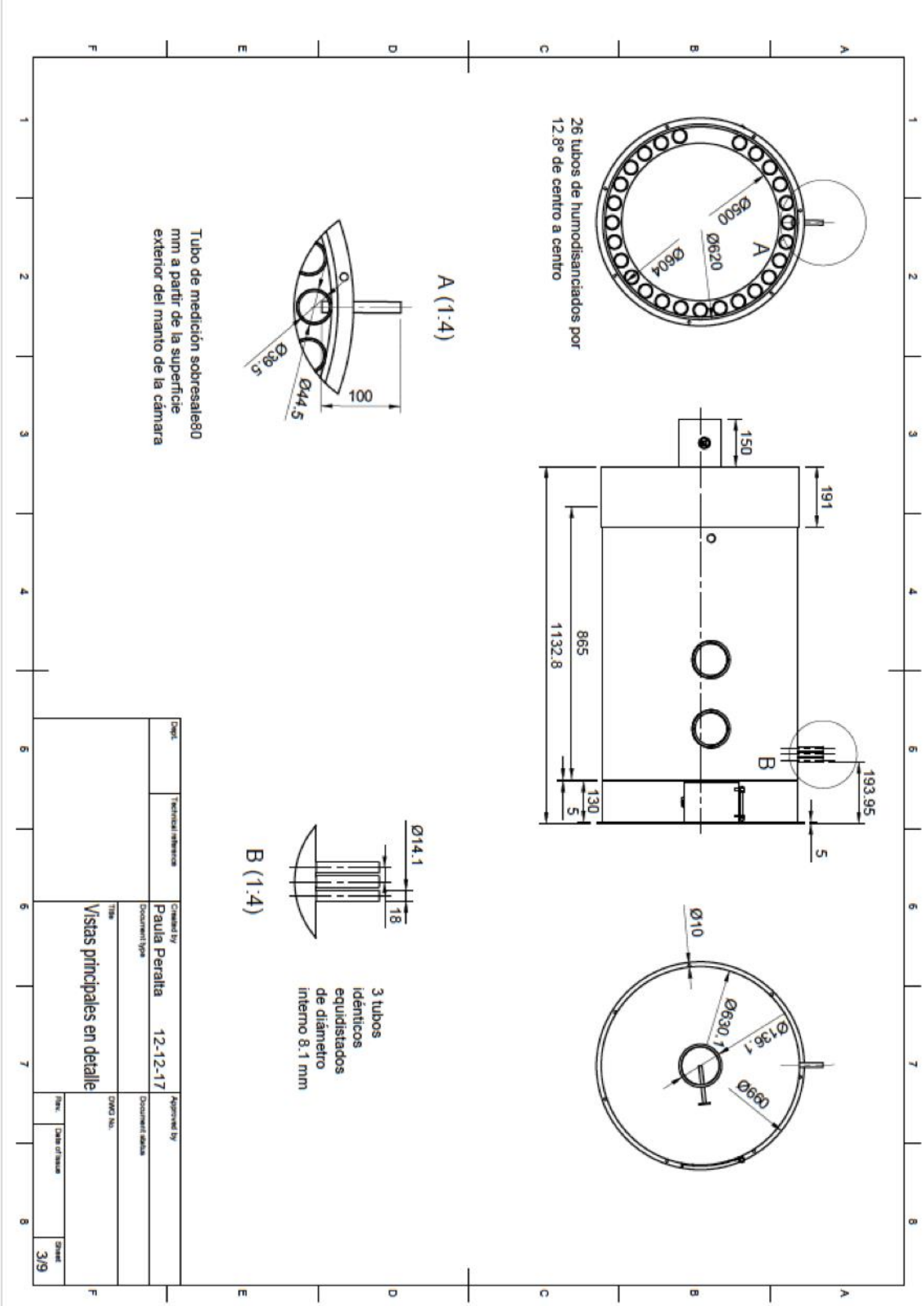
A.1 Plano isométricos en 3D hogar de combustión



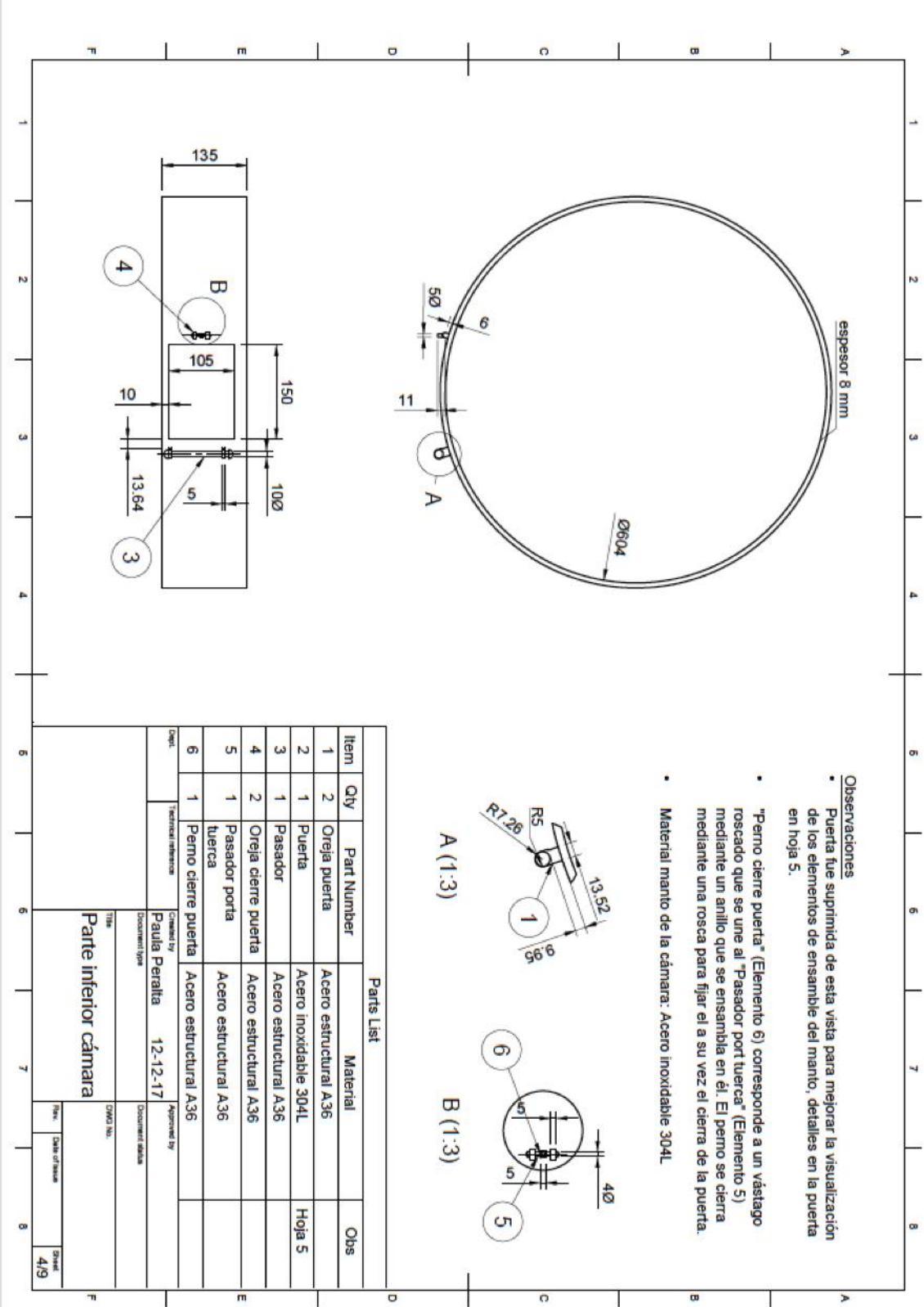
A.2 Listado de piezas y subsistemas hogar de combustión



A.3 Vistas principales en detalle con cotas generales



A.4 Parte inferior cámara y conjunto estructural puerta



Objeto:	Técnica referencia:	Created by:	Approved by:
		Paula Peralta	
Document type:	Document label:	12-12-17	
Title:	DWG No.:		
Puerta			
Rev.:	Date of issue:	Sheet:	
		5/9	

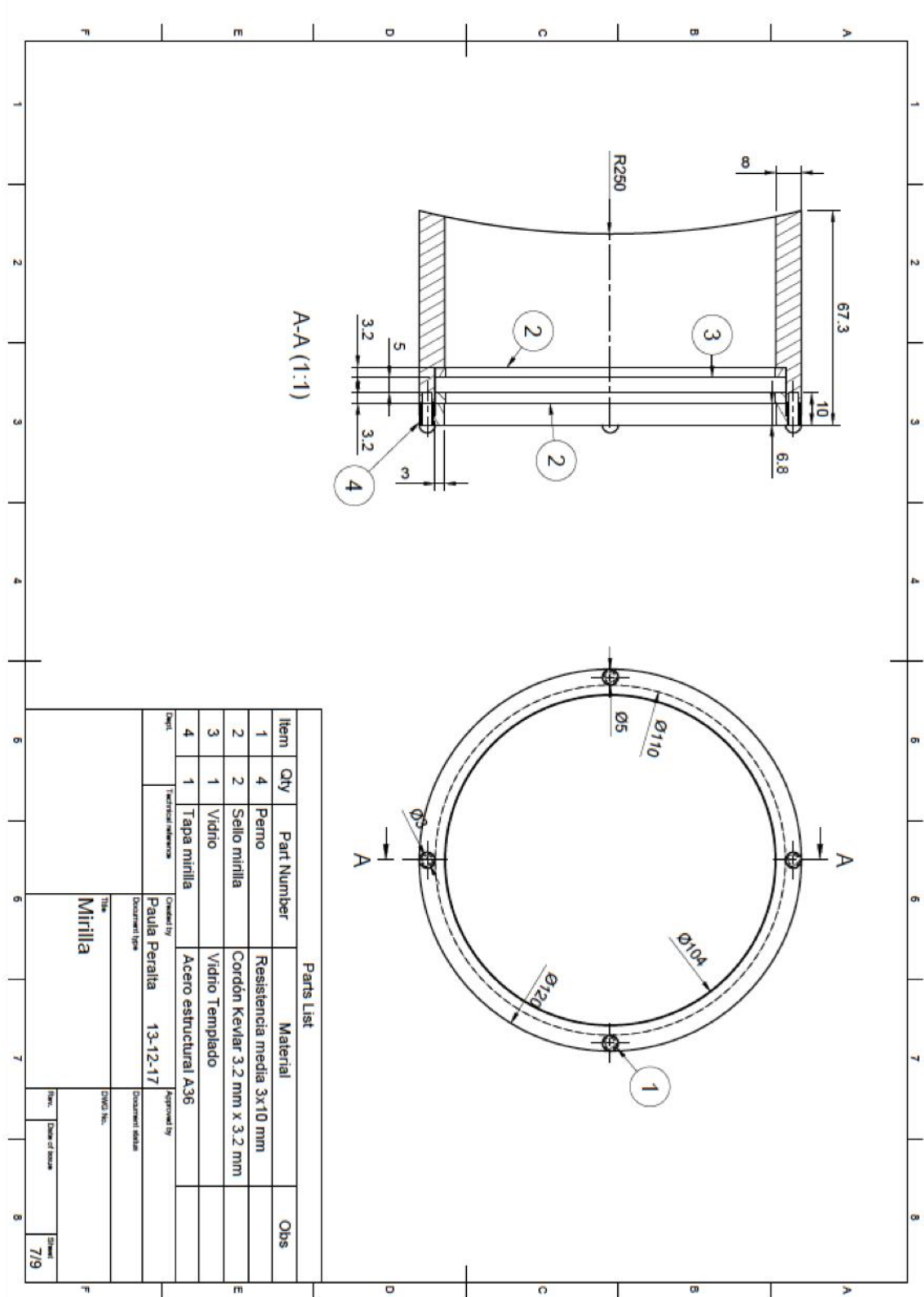
Technical Drawing Details:

- Top View (Front):** Shows a rectangular plate with a width of 865 mm. It features two circular openings for 1/4" HI Bushing. The distance between the centers of the bushings is 312.5 mm. The distance from the left edge to the first bushing center is 120.10 mm, and from the second bushing center to the right edge is 120.10 mm. The distance from the left edge to the center of the first bushing is 250 mm. The distance from the center of the first bushing to the center of the second bushing is 99.9 mm. The distance from the center of the second bushing to the right edge is 99.95 mm. The thickness of the plate is 20 mm.
- Side View:** Shows the profile of the jacket with a height of 61 mm. It features a 1/4" HI Bushing for water entry (Entrada agua) and a 1/4" HI Bushing for water exit (Salida agua). The distance between the centers of the bushings is 18 mm. The thickness of the plate is 25 mm.
- Cross-sectional View:** Shows a circular cross-section with an outer diameter of $\varnothing 612$ mm and an inner diameter of $\varnothing 500$ mm. The thickness of the plate is 4 mm. The angle between the central axis of the tube and the central axis of the jacket is 84° .

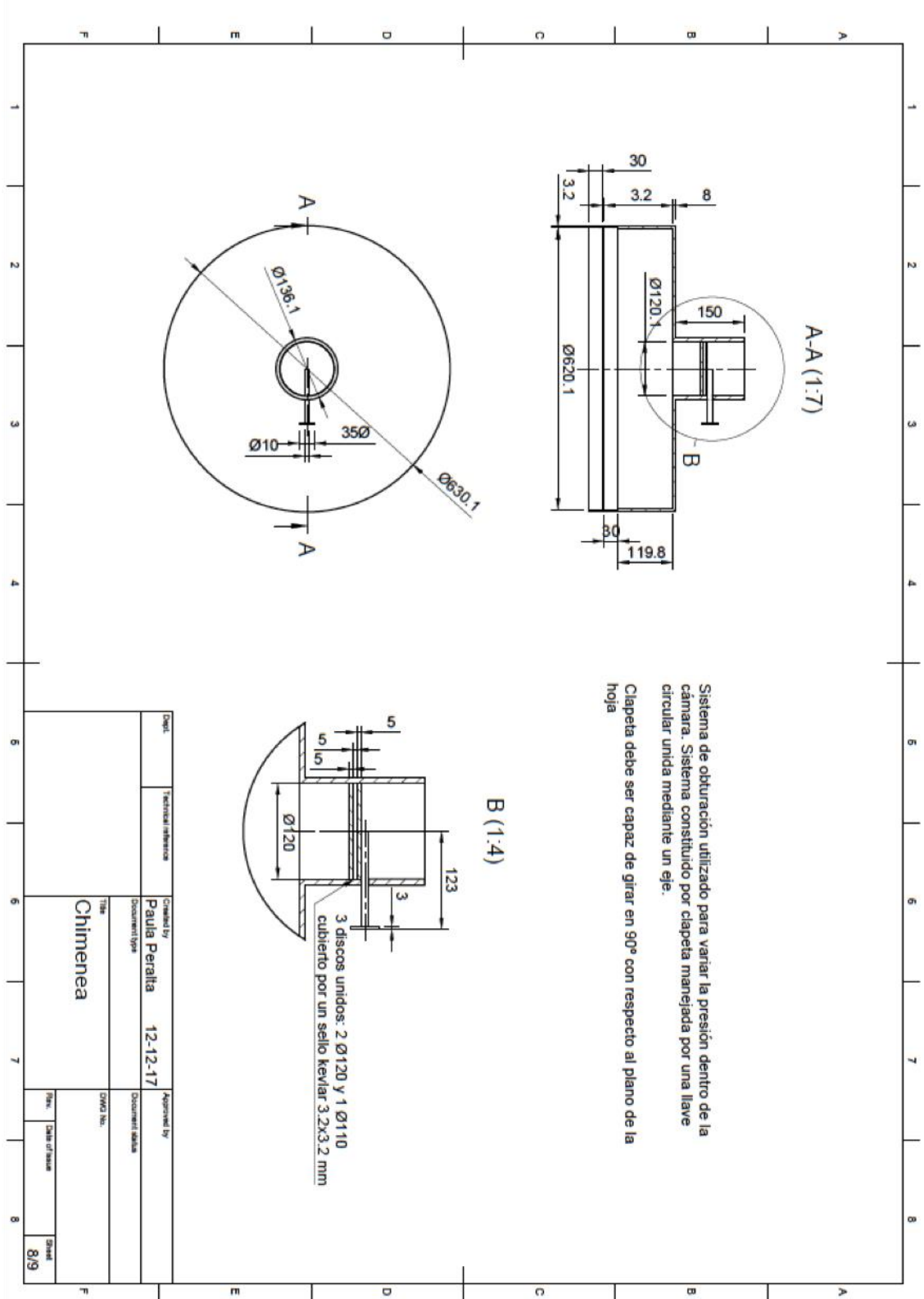
IMPORTANT

Manto de la cámara en conjunto con Base de tubos de humo forman un volumen a rellenar con líquido refrigerante (Agua), por lo tanto es importante la estanqueidad en su soldadura.

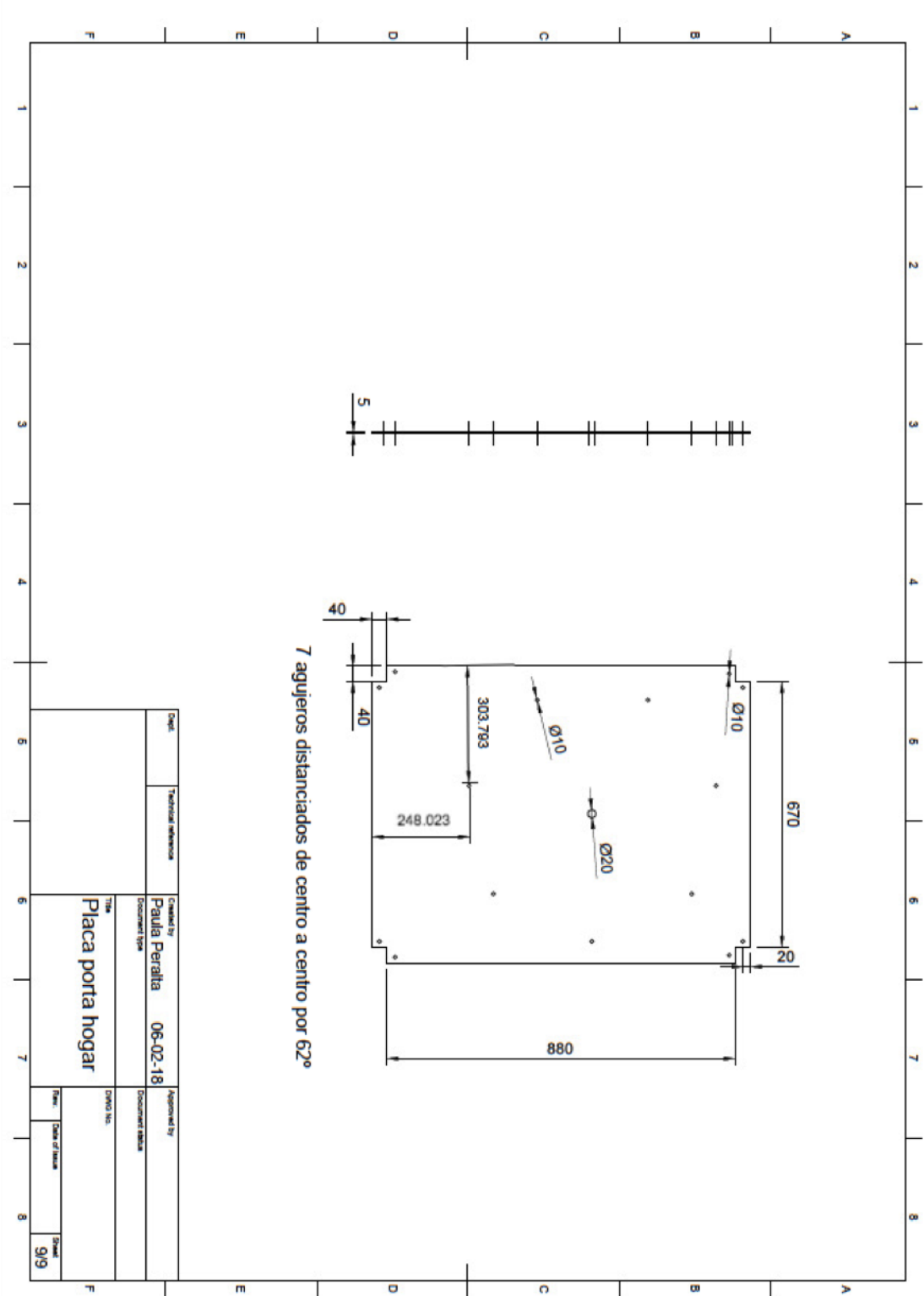
A.7 Detalle mirilla manto cámara



A.8 Chimenea y detalle sistema de obturación



A.9 Placa unión cámara con sistema estructural



B. Listado de piezas y materiales para la construcción del hogar de combustión

B.1 Listado de piezas y requerimientos reales

Tabla 16 Listado de piezas y requerimiento de material real por pieza

Pieza	Subconjunto	Material requerido	Material	Ctd.
Flange	General	Ø700 mm	Acero ASTM A36 – 5 mm	1
Tubos de humo	General	920 mm x 32 mm	Acero ASTM A36 – 2.5 mm	26
Base tubos de humo	General	Ø630 mm	Acero ASTM A36 – 5 mm	1
Tapa cámara	General	Ø500 mm	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Tubos de medición	General	100 mm x 80 mm	Acero ASTM A36 – 3 mm	3
Placa porta cámara	General	750 mm x 920 mm	Acero inoxidable 304L – 5 mm	1
Unión flange – placa	Elementos de fijación	-	Perno y tuerca M10 Resistencia media y L 10 mm	8
Pared interna manto	Manto cámara	865 mm x 1571 mm	Acero ASTM A36 – 4 mm	1
Pared externa manto	Manto cámara	865 mm x 1923 mm	Acero ASTM A36 – 4 mm	1
Manto mirilla	Mirilla	65 x 327 mm	Acero ASTM A36 – 8 mm	2
Sello mirilla	Hermeticidad	0,38 m	Cordón kevlar 3.2x3.2	2
Tapa mirilla 1	Mirilla	Ø120 mm	Acero ASTM A36 – 3 mm	2
Tapa mirilla 2	Mirilla	330 x 3.8 mm	Acero ASTM A36 – 3 mm	2
Remache tapa mirilla	Elementos de fijación	-	Perno M3 R Baja y L 10 mm	8
Vidrio mirilla	Mirilla	Ø110	Vidrio Templado	2
Base cámara	Base y sist. Cierre	135 x 1911 mm	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Puerta	Base y sist. Cierre	175 mm x 125 mm	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Oreja pasador puerta	Base y sist. Cierre	29 mm x 14mm	Acero ASTM A36 – 5 mm	2

Oreja cierra puerta	Base y sist. Cierre	8 mm x 12 mm	Acero ASTM A36 – 5 mm	2
Pasador puerta	Base y sist. Cierre	Ø10	Tubo macizo acero ASTM A36	1
Pasador porta perno	Base y sist. Cierre	Ø4 mm	Tubo macizo acero L 15 mm	1
Cierre puerta cámara	Elementos de fijación	-	Perno y tuerca M5 R baja de L 15 mm	1
Anillo perno cierre	Base y sist. Cierre	Ø7 mm	Acero ASTM A36 – 5 mm	1
Sello puerta 1	Base y sist. Cierre	0,109 m	Cordón Kevlar 5 x 5 mm	2
Sello puerta 2	Base y sist. Cierre	0,170 m	Cordón Kevlar 5 x 5 mm	2
Manto Chimenea	Sist. Expulsión humo	191 mm x 1935 mm	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Tapa Chimenea	Sist. Expulsión humo	Ø615	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Salida Chimenea	Sist. Expulsión humo	150 x 377 mm	Acero inoxidable 304L – 8 mm	1
Clapeta capa 1 y 3	Sist. Expulsión humo	Ø120	Acero inoxidable 304L – 5 mm	2
Clapeta capa 2	Sist. Expulsión humo	Ø110	Acero inoxidable 304L – 5 mm	1
Vástago clapeta	Sist. Expulsión humo	Ø10	Tubo macizo acero L 120 mm	1
Sello clapeta	Sist. Expulsión humo	0,308 m	Cordón kevlar 5mm x 5 mm	1
Manecilla circular	Sist. Expulsión humo	Ø35	Acero ASTM A36 – 3 mm	1

B.2 Resumen de material requerido real para la construcción del HDC

Tabla 17 Resumen requerimiento de material real

Material	Espesor / Sección transversal	Características
ASTM A36	2.5	Plancha 957 mm x 920 mm
	3 mm	Plancha 560 mm x 137.6mm
	4 mm	Plancha 1923 mm x 1735 mm
	5 mm	Plancha 700 mm x 1330 mm
	8 mm	Plancha 327 mm x 68 mm
Acero inoxidable 304 L	5 mm	Plancha 980 mm x 920 mm
	8 mm	Plancha 1935 mm x 441 mm
Tubo macizo acero	Ø10 mm	Largo tubo 215 mm
	Ø4 mm	Largo tubo 15 mm
Cordón Kevlar	3.2 mm x 3.2 mm	Largo cordón 0,76 m
	5 mm x 5 mm	Largo cordón 0,77 m
Vidrio templado	Ø110 mm	2 unidades espesor 5 mm
Perno	M10	7 unidades resistencia media y L_{min} 10 mm
	M4	8 unidades resistencia baja y L_{min} 7 mm
	M5	1 unidad resistencia baja y L_{min} 15 mm
Tuerca hexagonal	M10	7 unidades
	M5	1 unidad

B.3 Resumen de acero requerido adaptado a las dimensiones de planchas disponibles en el mercado

Tabla 18 Resumen acero adaptado a la oferta del mercado

Material	Espesor	Dimensiones plancha
ASTM A36	2.5	957 mm x 920 mm
	3 mm	560 mm x 137.6mm
	4 mm	1923 mm x 1735 mm
Acero inoxidable 304 L	5 mm	2725 mm x 920 mm
	8 mm	1935 mm x 631 mm

B.4 Resumen de acero requerido alternativa económica

Tabla 19 Resumen acero adaptado a la oferta del mercado

Material	Espesor	Dimensión plancha
ASTM A36	2.5	957 mm x 920 mm
	3 mm	560 mm x 137.6mm
	4 mm	1923 mm x 1735 mm
	5 mm	2725 mm x 920 mm
	8 mm	1935 mm x 631 mm

C. Resumen de costos y proveedores por material

C.1 Acero estructural ASTM A36

- Proveedor 1: SACK

Tabla 20 Tabla resumen oferta y precio con IVA incluido A36 proveedor 1

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
2.5 mm	957 mm x 920 mm	1m x 1m	1	\$23.800
3 mm	435 mm x 137.6mm	1m x 0.15m	1	\$4.284
4 mm	1923 mm x 1735 mm	1m x 1m	2	\$151.100
5 mm	700 mm x 1330 mm	1m x 1.5m	1	N/D
8 mm	327 mm x 68 mm	1m x 0.1m	1	\$ 6.363

- Proveedor 2: CINTAC

Tabla 21 Tabla resumen oferta y precio con IVA incluido A36 proveedor 2

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
2.5 mm	957 mm x 920 mm	2m x 1m	1	\$25.609
3 mm	435 mm x 137.6mm	2m x 1m	1	\$30.731
4 mm	1923 mm x 1735 mm	2m x 1m	2	\$81.948
5 mm	700 mm x 1330 mm	2m x 1m	1	\$25.609
8 mm	327 mm x 68 mm	2m x 1m	1	\$81.948

- Proveedor 3: PRODALAM

Tabla 22 Tabla resumen oferta y precio A36 proveedor 3

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
2.5 mm	957 mm x 920 mm	3m x 1m	1	\$25.169
3 mm	435 mm x 137.6mm	3m x 1m	1	\$39.710
4 mm	3495 x 865 mm	3m x 1m	2	\$115.335
5 mm	700 mm x 1330 mm	3m x 1m	1	\$64.105
8 mm	327 mm x 68 mm	3m x 1m	1	\$103.054

C.2 Acero inoxidable AISI 304L

- Proveedor 1: ACERMET

Tabla 23 Resumen oferta y precio A304L proveedor 1

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
5 mm	700 mm x 1330 mm	3m x 1m	1	\$274.176
8 mm	327 mm x 68 mm	3m x 1m	1	\$438.682

- Proveedor 2: Aceros Cisternas

Tabla 24 Resumen oferta y precio A304L proveedor 2

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
5 mm	700 mm x 1330 mm	3m x 1m	1	\$452.200
8 mm	327 mm x 68 mm	3m x 1m	1	\$572.723

- Proveedor 3: ACEROSVAL

Tabla 25 Resumen oferta y precio A304L proveedor 3

Espesor	Requerimiento real	Oferta min	Cantidad	Precio total
5 mm	700 mm x 1330 mm	3m x 1m	1	\$357.000
8 mm	327 mm x 68 mm	3m x 1m	1	\$535.500

D. Cálculos sistema radiativo para ambas alternativas

D.1 Cálculo factores de forma

Factores de forma se calcularon utilizando las propiedades de algebra de factores de forma, más la fórmula conocida de factor de forma entre dos superficies circulares posicionadas a una distancia conocida.

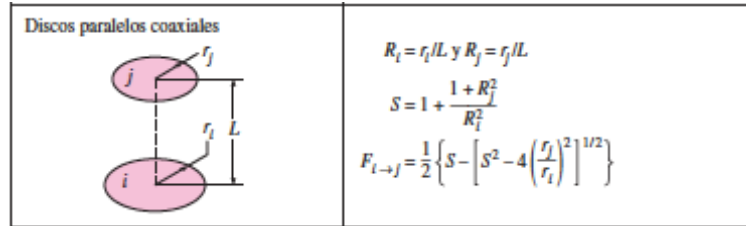


Figura 45 Factor de visión para discos paralelos - Tabla 13.1 Transferencia de calor Cengel 7ma ed.

```
(*Vector áreas hogar*)
A := {pi*0.035^2, 0.13*(2*pi*0.302), 0.865*(2*pi*0.25),
      pi*0.25^2, pi*(0.302^2 - 0.25^2), pi*(0.302^2 - 0.035^2)}

Clear[F11, F12, F13, F14, F15, F16, F21, F22, F23, F24,
      F25, F26, F31, F32, F33, F34, F35, F36, F41, F42, F43, F44, F45,
      F46, F51, F52, F53, F54, F55, F56, F61, F62, F63, F64, F65, F66]

(*Definición de factores nulos*)
F11 := 0
F16 := 0
F35 := 0
F44 := 0
F45 := 0
F53 := 0
F54 := 0
F55 := 0
F61 := 0
F66 := 0

(*Cálculo de factor de forma entre discos coaxiales*)
Clear[S]

Ri[ri_, L_] := ri / L
Rj[rj_, L_] := rj / L

S[Ri_, Rj_] := 1 + (1 + Rj^2) / Ri^2

Fdc[S_, ri_, rj_] := 1/2 * (S - {S^2 - 4 * (rj/ri)^2}^(1/2))

F14 := Fdc[S[Ri[0.02, 1], Rj[0.5, 1]], 0.02, 0.5]
```

```

(*Por regla de la superposición se puede obtener F15 y F13*)
F1a := Fdc[S[Ri[0.02, 0.13], Rj[0.302, 0.13]], 0.02, 0.302]
F1b := Fdc[S[Ri[0.02, 0.13], Rj[0.25, 0.13]], 0.02, 0.25]
F15 := F1a - F1b
F13 := F1b - F14

(*Regla de la suma*)
F12 := 1 - (F13 + F14 + F15)

(*Utilizando F obtenidos se aplica asociatividad*)
F21 := 
$$\frac{F12 * A[[1]]}{A[[2]]}$$

F31 := 
$$\frac{F13 * A[[1]]}{A[[3]]}$$

F41 := 
$$\frac{F14 * A[[1]]}{A[[4]]}$$

F51 := 
$$\frac{F15 * A[[1]]}{A[[5]]}$$

{0.003919}

(*Cálculo factores de visión parte baja hogar;
se define b como radiación que pasa a 3 y 4 , a=5+b, Y=1+6*)
Aa :=  $\pi * 0.302^2$ 
Ab :=  $\pi * 0.25^2$ 
Ay := Aa
F6a := 
$$\left( Fdc[S[Ri[0.302, 0.13], Rj[0.302, 0.13]], 0.302, 0.302] - \frac{F1a * A[[1]]}{Aa} \right) * \frac{Aa}{A[[6]]}$$

F6b := 
$$\left( Fdc[S[Ri[0.302, 0.13], Rj[0.25, 0.13]], 0.302, 0.25] - \frac{F1b * A[[1]]}{Ab} \right) * \frac{Aa}{A[[6]]}$$

F65 := F6a - F6b
F56 := 
$$\frac{F65 * A[[6]]}{A[[5]]}$$

F52 := 1 - (F51 + F53 + F54 + F55 + F56)
F25 := 
$$\frac{F52 * A[[5]]}{A[[2]]}$$

F62 := 1 - (F65 + F6b)
F26 := 
$$\frac{F62 * A[[6]]}{A[[2]]}$$

Fb6 := 
$$\frac{F6b * A[[6]]}{Ab}$$

Fb1 := 
$$\frac{F1b * A[[1]]}{Ab}$$

Fb2 := 1 - (Fb1 + Fb6)
F2b := 
$$\frac{Fb2 * Ab}{A[[2]]}$$

F22 := 1 - (F21 + F26 + F25 + F2b)

```

(*Se considera el cilindro superior como una geometría independiente,
b corresponde al total de radiación que entra desde el cilindro inferior*)

fb4 := Fdc[S[Ri[0.25, 0.865], Rj[0.25, 0.865]], 0.25, 0.25]

f4b := fb4

f43 := 1 - f4b

f34 := $\frac{f43 * A[[4]]}{A[[3]]}$

fb3 := f43

(*Por lo tanto 7.194% de la radiacion
que entra por b llega a 4 y 92.805% llega a 3*)

Clear[F23, F24, F32, F33, F34, F36, F42, F43, F46, F63, F64]

Solve[F2b = f23 + $\frac{fb4}{fb3} * f23$, f23]

F23 := 0.200164

F24 := $\frac{fb4}{fb3} * F23$

F32 := $\frac{F23 * A[[2]]}{A[[3]]}$

F42 := $\frac{F24 * A[[2]]}{A[[4]]}$

Solve[F6b = f63 + $\frac{fb4}{fb3} * f63$, f63]

F63 := 0.463357

F64 := $\frac{fb4}{fb3} * F63$

F36 := $\frac{F63 * A[[6]]}{A[[3]]}$

F46 := $\frac{F64 * A[[6]]}{A[[4]]}$

F43 := 1 - (F41 + F42 + F44 + F45 + F46)

F34 := $\frac{F43 * A[[4]]}{A[[3]]}$

F33 := 1 - (F31 + F32 + F34 + F35 + F36)

F := $\begin{pmatrix} F11 & F12[[1]] & F13[[1]] & F14[[1]] & F15[[1]] & F16 \\ F21[[1]] & F22[[1]] & F23 & F24[[1]] & F25[[1]] & F26[[1]] \\ F31[[1]] & F32 & F33[[1]] & F34[[1]] & F35 & F36 \\ F41[[1]] & F42[[1]] & F43[[1]] & F44 & F45 & F46[[1]] \\ F51[[1]] & F52[[1]] & F53 & F54 & F55 & F56[[1]] \\ F61 & F62[[1]] & F63 & F64[[1]] & F65[[1]] & F66 \end{pmatrix}$

D.2 Estimación emisividad gases de combustión

La estimación de la emisividad del gas se lleva a cabo mediante el método de aproximación de las curvas de Hottel.

```
(*Para el cálculo de la emisividad del gas,
se necesita en primer lugar la composición del
combustible para calcular la composición de los gases de escape;
en este caso se utilizará gas natural cuya composición en volumen
es 81.86% metano, 11.61% etano, 1.92% propano, 0.22% butano,
0.23 pentano, 0.9% nitrógeno y 3.18% dióxido de carbono*)
```

```
Ych4 := 0.8186
Yc2h6 := 0.1161
Yc3h8 := 0.0192
Yc4h10 := 0.0022
Yc5h12 := 0.0023
Yn2 := 0.009
Yco2 := 0.0318
```

```
(*Cálculo de composición másica del combustible*)
```

```
Mch4 := 12 + 4 * 1
Mc2h6 := 2 * 12 + 6 * 1
Mc3h8 := 3 * 12 + 8 * 1
Mc4h10 := 4 * 12 + 10 * 1
Mc5h12 := 5 * 12 + 10 * 1
Mn2 := 14 * 2
Mco2 := 12 + 2 * 16
```

```
Mt := Mch4 + Mc2h6 + Mc3h8 + Mc4h10 + Mc5h12 + Mn2 + Mco2
```

```
Xch4 :=  $\frac{Mch4}{Mt}$  * Ych4
```

```
Xc2h6 :=  $\frac{Mc2h6}{Mt}$  * Yc2h6
```

```
Xc3h8 :=  $\frac{Mc3h8}{Mt}$  * Yc3h8
```

```
Xc4h10 :=  $\frac{Mc4h10}{Mt}$  * Yc4h10
```

```
Xc5h12 :=  $\frac{Mc5h12}{Mt}$  * Yc5h12
```

```
Xn2 :=  $\frac{Mn2}{Mt}$  * Yn2
```

```
Xco2 :=  $\frac{Mco2}{Mt}$  * Yco2
```

```
(*Análisis elemental*)
```

```
mc := (Xch4 + 2 * Xc2h6 + 3 * Xc3h8 + 4 * Xc4h10 + 5 * Xc5h12 + Xco2) * 12
```

```
mh := (4 * Xch4 + 6 * Xc2h6 + 8 * Xc3h8 + 10 * Xc4h10 + 12 * Xc5h12) * 1
```

```
mn := (Xn2 * 2) * 14
```

```
mo := (Xco2 * 2) * 16
```

```
mt := mc + mh + mn + mo
```

```

(*Composición másica gas natural*)
xc := mc / mt
xh := mh / mt
xn := mn / mt
xo := mo / mt

(*Cálculo volumen de aire estequiométrico*)
Vae :=  $\frac{22.4}{0.21} \left( \frac{xc}{12.01} + \frac{xh}{4.032} - \frac{xo}{32} \right)$ 

(*Cálculo composición molar gases de combustión,
se asume un exceso de aire del 10% *)
λ := 1.5

nco2 :=  $\frac{xc}{12.01}$ 
nh2o :=  $\frac{xh}{2.01}$ 
nn2 :=  $\frac{0.79 * λ * Vae}{22.4} + \frac{xn}{28.013}$ 
no2 :=  $\frac{0.21 * (λ - 1) * Vae}{22.4}$ 
yco2 :=  $\frac{nco2}{nco2 + nh2o + no2 + nn2}$ 
yh2o :=  $\frac{nh2o}{nco2 + nh2o + no2 + nn2}$ 
yn2 :=  $\frac{nn2}{nco2 + nh2o + no2 + nn2}$ 
yo2 :=  $\frac{no2}{nco2 + nh2o + no2 + nn2}$ 

(*Cálculo presiones parciales, al ser la presión variable dentro de la cámara,
se supondrá para los cálculos que la presión
total dentro de la cámara es atmosférica 1[atm]*)
P := 1
pco2 := yco2 * P
ph2o := yh2o * P

(*Cálculo largo equivalente*)
Vol :=  $\pi * 0.302^2 * 0.13 + \pi * 0.25^2 * 0.865$ 
Area :=
 $\pi * 0.302^2 + 0.13 * (2 * \pi * 0.302) + \pi * (0.302^2 - 0.25^2) + 0.865 * (2 * \pi * 0.25) + \pi * 0.25^2$ 
L :=  $\left( 3.6 * \frac{Vol}{Area} \right) * 3.28084$ 

(*Cálculo parámetros para aproximar la emisividad por las curvas de Hottel,
Temperatura gases resultantes se estima en 700°C*)
pco2 * L
ph2o * L
 $\frac{ph2o}{ph2o + pco2}$ 
ph2o * L + pco2 * L

```

0.111042

0.181855

0.620884

0.292897

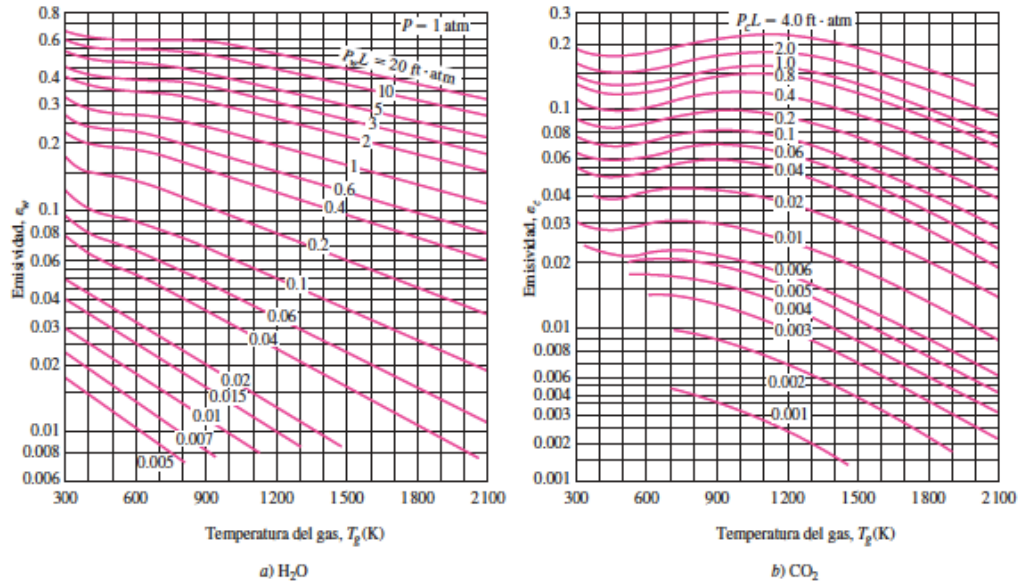


Figura 46 Emisividad de los gases H₂O y CO₂ - Figura 13.36 Transferencia de calor Cengel 7ma ed.

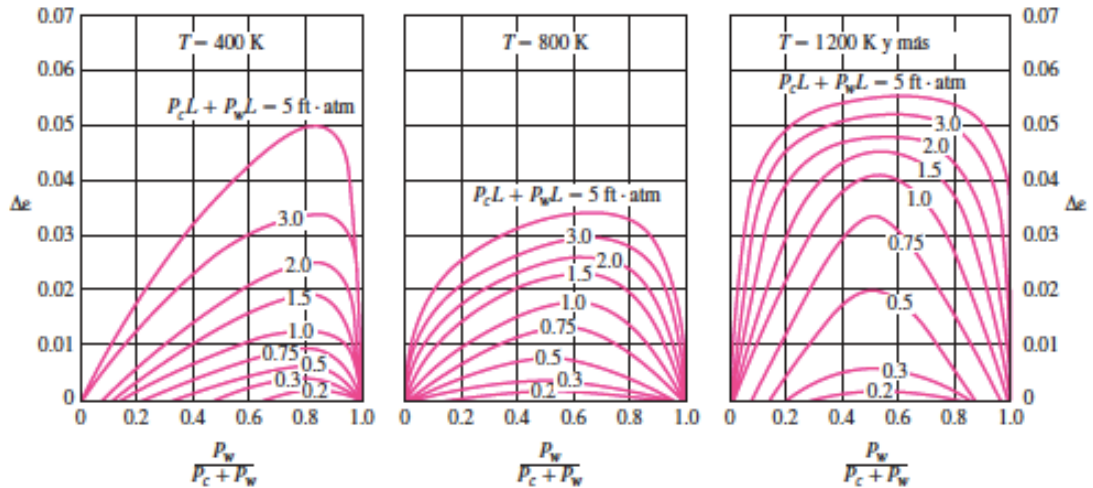


Figura 47 Corrección delta de la emisividad - Figura 13.38 Transferencia de calor Cengel 7ma ed.

Con esto, se aplica la siguiente fórmula donde los factores de corrección C se estiman con valor 1:

$$\varepsilon_g = C_c \varepsilon_c + C_w \varepsilon_w - \Delta \varepsilon$$

Reemplazando:

$$\varepsilon_g = 0.4$$

D.3 Resolución sistema radiativo

En primer lugar, se plantea el sistema matricial a resolver:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{61} & \cdots & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$C_{kj} = \frac{1}{\varepsilon_j} [\delta_{kj} - (1 - \varepsilon_j) F_{kj} \tau_g]$$

$$b_k = \sum_{j=1}^n (\delta_{kj} - F_{kj} \tau_g) E_{bj} - \varepsilon_g E_{bg}$$

(*Definición de parámetros*)

```
σ := 5.67 * 10-8
τ := 1 - eg
ealt1 := {0.3, 0.38, 0.28, 0.38, 0.38, 0.38}
ealt2 := {0.3, 0.28, 0.28, 0.28, 0.28, 0.28}
```

$$\delta := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Tg := 700 + 273.15
Ta := 20 + 273.15
Twi := {1200 + 273.15, Ta, Ta, Ta, Ta, Ta}
```

(*Cálculo elementos matriz Ckj para cada alternativa*)

```
Ckj1 := Table[ $\frac{1}{ealt1[[i]]} * (\delta[[i, j]] - (1 - ealt1[[i]]) * F[[i, j]] * \tau)$ , {i, 6}, {j, 6}]
```

```
Ckj2 := Table[ $\frac{1}{ealt2[[i]]} * (\delta[[i, j]] - (1 - ealt2[[i]]) * F[[i, j]] * \tau)$ , {i, 6}, {j, 6}]
```

(*Cálculo elementos matriz Bk*)

```
bk := Table[ $\sum_{j=1}^6 ((\delta[[i, j]] - F[[i, j]] * \tau) * \sigma * (Twi[[i]])^4) - eg * \sigma * Tg^4$ , {i, 6}]
```

(*Vector de tasas de calor unitarias para cada alternativa*)

```
q1 = bk.Inverse[Ckj1]
q2 = bk.Inverse[Ckj2]
{25920.2, -9233.98, -4332.95, -5447.05, -8153.11, -10902.5}
{25915.2, -7445.43, -5411.19, -4112.99, -6248.23, -8598.89}
```

(*Se evalúa la tasa total de calor que sale por las superficies 2 y 4 para ambas alternativas*)

$$Q_{21} = q_1[[2]] * A[[2]]$$

$$Q_{41} = q_1[[2]] * A[[4]]$$

$$-2277.82$$

$$-1813.09$$

$$Q_{22} = q_2[[2]] * A[[2]]$$

$$Q_{42} = q_2[[2]] * A[[4]]$$

$$-1836.62$$

$$-1461.91$$

D.4 Calculo transmisión de calor por convección a las paredes de la cámara

(*Cálculo de la tasa de transferencia de calor por convección: Gran diámetro del HDC hacen que localmente, sea homologable al caso de convección de flujo forzado en placa plana. Se distinguen dos casos, análisis del cilindro inferior y tapa de la cámara; la suma de los dos casos corresponderá a la tasa de transferencia de calor por convección desde los gases hacia la cámara*)

$$L_1 := 0.13$$

$$A_1 := 0.13 * (2 * \pi * 0.302)$$

$$L_2 := 0.865$$

$$A_2 := \pi * 0.25^2$$

(*Definición de temperatura de película y propiedades asociadas*)

$$T_f := (700 + 20) / 2$$

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
<i>Bióxido de carbono, CO₂</i>							
300	0.9358	1 060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1 112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458

$$\rho_{CO_2} := \left(\frac{0.7968 - 0.9358}{400 - 300} \right) * (T_f - 300) + 0.9358$$

$$k_{CO_2} := \left(\frac{0.04565 - 0.03814}{400 - 300} \right) * (T_f - 300) + 0.03814$$

$$\nu_{CO_2} := \left(\frac{3.842 * 10^{-5} - 2.866 * 10^{-5}}{400 - 300} \right) * (T_f - 300) + 2.866 * 10^{-5}$$

$$Pr_{CO_2} := \left(\frac{0.7458 - 0.7450}{400 - 300} \right) * (T_f - 300) + 0.7450$$

$$\rho_{H_2O} := \left(\frac{0.3262 - 0.3831}{400 - 300} \right) * (T_f - 300) + 0.3831$$

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
<i>Vapor de agua, H₂O</i>							
300	0.3831	1 997	0.04345	5.680×10^{-5}	2.045×10^{-5}	5.340×10^{-5}	0.9401
400	0.3262	2 066	0.05467	8.114×10^{-5}	2.446×10^{-5}	7.498×10^{-5}	0.9240

$$\kappa_{\text{H}_2\text{O}} := \left(\frac{0.05467 - 0.04345}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.04345$$

$$\nu_{\text{H}_2\text{O}} := \left(\frac{7.498 * 10^{-5} - 5.34 * 10^{-5}}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 5.34 * 10^{-5}$$

$$Pr_{\text{H}_2\text{O}} := \left(\frac{0.924 - 0.9401}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.9401$$

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
<i>Nitrógeno, N₂</i>							
300	0.5956	1 070	0.04309	6.758×10^{-5}	2.849×10^{-5}	4.783×10^{-5}	0.7078
400	0.5072	1 095	0.04848	8.727×10^{-5}	3.166×10^{-5}	6.242×10^{-5}	0.7153

$$\rho_{\text{N}_2} := \left(\frac{0.5072 - 0.5956}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.5956$$

$$\kappa_{\text{N}_2} := \left(\frac{0.04848 - 0.04309}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.04309$$

$$\nu_{\text{N}_2} := \left(\frac{8.727 * 10^{-5} - 6.758 * 10^{-5}}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 6.758 * 10^{-5}$$

$$Pr_{\text{N}_2} := \left(\frac{0.7153 - 0.7078}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.7078$$

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
<i>Oxígeno, O₂</i>							
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003×10^{-5}	3.350×10^{-5}	4.923×10^{-5}	0.7030
400	0.5793	1 025	0.05463	9.204×10^{-5}	3.744×10^{-5}	6.463×10^{-5}	0.7023

$$\rho_{\text{O}_2} := \left(\frac{0.5793 - 0.6804}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.6804$$

$$\kappa_{\text{O}_2} := \left(\frac{0.05463 - 0.04751}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.04751$$

$$\nu_{\text{O}_2} := \left(\frac{6.463 * 10^{-5} - 4.923 * 10^{-5}}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 4.923 * 10^{-5}$$

$$Pr_{\text{O}_2} := \left(\frac{0.7023 - 0.7030}{400 - 300} \right) * (Tf - 300) + 0.7030$$

```

rho_M := yco2 * rhoCO2 + yh2o * rhoH2O + yn2 * rhoN2 + yo2 * rhoO2
k_M := yco2 * kCO2 + yh2o * kH2O + yn2 * kN2 + yo2 * kO2
v_M := yco2 * vCO2 + yh2o * vH2O + yn2 * vN2 + yo2 * vO2
Pr_M := yco2 * PrCO2 + yh2o * PrH2O + yn2 * PrN2 + yo2 * PrO2

(*Cálculo de tasa de transferencia de calor para cilindro inferior*)
ReL1 := 
$$\frac{3 * L1}{v_M}$$

(*Reynolds del flujo es menor al crítico
para flujo forzado en placas planas: 105[-]*)
Nu1 := 0.664 * ReL10.5 * Pr_M1/3
h1 := 
$$\frac{Nu1 * k_M}{L1}$$

QL1 = h1 * A1 * (Tg - 293.15)
2666.38
(*Cálculo de tasa de transferencia de calor para cilindro inferior*)
ReL2 := 
$$\frac{3 * (L1 + L2)}{v_M}$$

(*Reynolds del flujo es menor al crítico
para flujo forzado en placas planas: 105[-]*)
Nu2 := 0.664 * ReL20.5 * Pr_M1/3
h2 := 
$$\frac{Nu2 * k_M}{(L1 + L2)}$$

QL2 = h2 * A2 * (Tg - 293.15)
767.153

Qconv = QL1 + QL2
3433.53

(*Finalmente para obtener el flujo total de calor se
suman los de radiación y convección. La tasa de transferencia
de calor por conducción es igual en ambos casos*)

(*Flujo de calor que entra a la pared 2[W/s]. Alt A-304L*)
QA304L2 := - (Q21 - QL1)

(*Calor requerido [W] para llevar al acero a la To crítica:850°C *)
QA304LC2 := 510 * (850 - 20) * 8650 * (0.13 * pi * (0.3202 - 0.3022))

(*Tiempo en alcanzar la ToC con un FS de 20% [min]*)
tA304L2 = ((QA304LC2 / QA304L2) / 60) * 0.8
45.1506

(*Flujo de calor que entra a la pared 2[W/s], Alt A36*)
QA362 := - (Q22 - QL1)

(*Calor requerido [W] para llevar al acero a la To crítica:550°C*)
QA362C := 460 * (550 - 20) * 7900 * (0.13 * pi * (0.3202 - 0.3022))

```

```

(*Tiempo en alcanzar la T°C con un FS de 20% [min]*)
tA362 = ((QA362C / QA362) / 60) * 0.8
26.0767

(*Flujo de calor que entra a la pared 4[W/s]. Alt A-304L*)
QA304L4 := - (Q41 - QL2)

(*Calor requerido [W] para llevar al acero a la T° crítica:850°C *)
QA304LC4 := 510 * (850 - 20) * 8650 *  $\pi$  * 0.52 * 0.008

(*Tiempo en alcanzar la T°C con un FS de 20% [min]*)
tA304L4 = ((QA304LC4 / QA304L4) / 60) * 0.8
118.884
(*Flujo de calor que entra a la pared 2[W/s]. Alt A-36*)
QA364 := - (Q42 - QL2)

(*Calor requerido [W] para llevar al acero a la T° crítica: 550°C *)
QA36C4 := 460 * (550 - 20) * 8650 *  $\pi$  * 0.52 * 0.008

(*Tiempo en alcanzar la T°C con un FS de 20% [min]*)
tA364 = ((QA36C4 / QA364) / 60) * 0.8
79.2587

```

E. Cálculo presión máxima dentro de la cámara de combustión

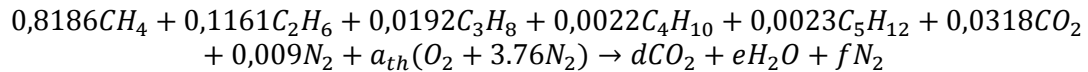
Para estimar la presión dentro de la cámara, se trabajará como si los gases resultantes de la combustión del gas natural cumplieran con la teoría de gases ideales, específicamente la Ley de Dalton, que dice que la suma de las presiones de los componentes es igual a la presión de la mezcla a temperatura y volumen constante:

$$P_m = \sum P_i(V_m, T_m)$$

Por otro lado, para conocer las presiones de cada elemento se utiliza la siguiente forma de la ecuación de los gases:

$$P_i = \frac{n_i[mol] \cdot R_u \left[\frac{atm \cdot L}{molK} \right] \cdot T_m[K]}{V_m[L]}$$

Para conocer el número de moles de los componentes de los productos, se hace un balance en la ecuación de la combustión del gas natural. Se considerará la ecuación con aire estequiométrico por lo tanto los gases resultantes combustión contienen solamente CO_2 , H_2O y N_2 . Por lo tanto, la ecuación a balancear es la siguiente: (Composición volumétrica del gas natural comercial se encuentra en la Tabla 1)



Balance de masa para elementos constituyentes:

$$C: 0,8186 + 0,1161 \cdot 2 + 0,0192 \cdot 3 + 0,0022 \cdot 4 + 0,0023 \cdot 5 + 0,0318 = d$$

$$H: 0,8186 \cdot 4 + 0,1161 \cdot 6 + 0,0192 \cdot 8 + 0,0022 \cdot 10 + 0,0023 \cdot 12 = 2e$$

$$O_2: 0,0318 + a_{th} = d + e/2$$

$$N_2: a_{th} \cdot 3,76 + 0,009 = f$$

El resultado de las ecuaciones planteadas anteriormente indica que:

$$d = 1,1605 = n_{CO_2}$$

$$e = 2,0871 = n_{H_2O}$$

$$a_{th} = 3,2158$$

$$f = 8,176 = n_{N_2}$$

Se estima que la temperatura de los gases resultantes es de 993,15 K, se conoce que la constante de gases universal tiene un valor de 0,082 $[atm \cdot L/molK]$ y el volumen de la cámara se puede conocer mediante la siguiente expresión:

$$V = \pi 0,302^2 \cdot 0,13 + \pi 0,25^2 \cdot 0,885 = 0,2123[m^3] = 212,3 [L]$$

Por lo tanto, conociendo las presiones se estimar la presión absoluta dentro de la cámara:

$$P_m = P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{N_2} = 0,4 + 0,7198 + 2,82 = 3,94 [atm] \approx 4[bar]$$

F. Cálculo de consumo calorífico nominal del quemador

El consumo calorífico nominal se calcula mediante una de las siguientes expresiones:

$$Q_n = 0.278 \cdot M_N \cdot H_i$$

$$Q_n = 0.278 \cdot V_N \cdot H_i$$

Donde:

- Q_n : Consumo nominal [kW]
- M_N : Consumo másico nominal obtenido en condiciones de referencia [kg/h]
- V_N : Consumo volumétrico nominal obtenido en condiciones de referencia [m^3/h]
- H_i : Poder calorífico inferior del gas en [MJ/kg] para la primera fórmula y [MJ/kg] para la segunda fórmula

En la práctica los valores obtenidos durante los ensayos no son los que corresponderían con estas condiciones de referencia. Es por esto que se debe corregir mediante la utilización de las siguientes expresiones:

$$\frac{M_o}{M} = \sqrt{\frac{1013,25 + p}{p_{atm} + p} \times \frac{273.15 + t_g}{288.15} \times \frac{\rho_r}{\rho}}$$
$$\frac{V_o}{V} = \sqrt{\frac{1013,25 + p}{1013,25} \times \frac{p_{atm} + p}{1013,25} \times \frac{288.15}{273.15 + t_g} \times \frac{\rho}{\rho_r}}$$

Donde:

- M_o : Consumo másico de referencia [kg/h]
- M : Consumo másico medido en condiciones de ensayo [kg/h]
- V_o : Consumo volumétrico de referencia [m^3/h]
- V : Consumo volumétrico medido en condiciones de ensayo [m^3/h]
- p_{atm} : Presión atmosférica [mbar]
- p : Presión de alimentación [mbar]
- t_g : Temperatura del gas en el punto de medición de consumo [°C]
- ρ : densidad del gas de ensayo en relación con el aire seco [-]
- ρ_r : densidad del gas de referencia en relación con el aire seco [-]

G. Diagrama de funcionamiento y ensayos para quemadores de potencias variables.

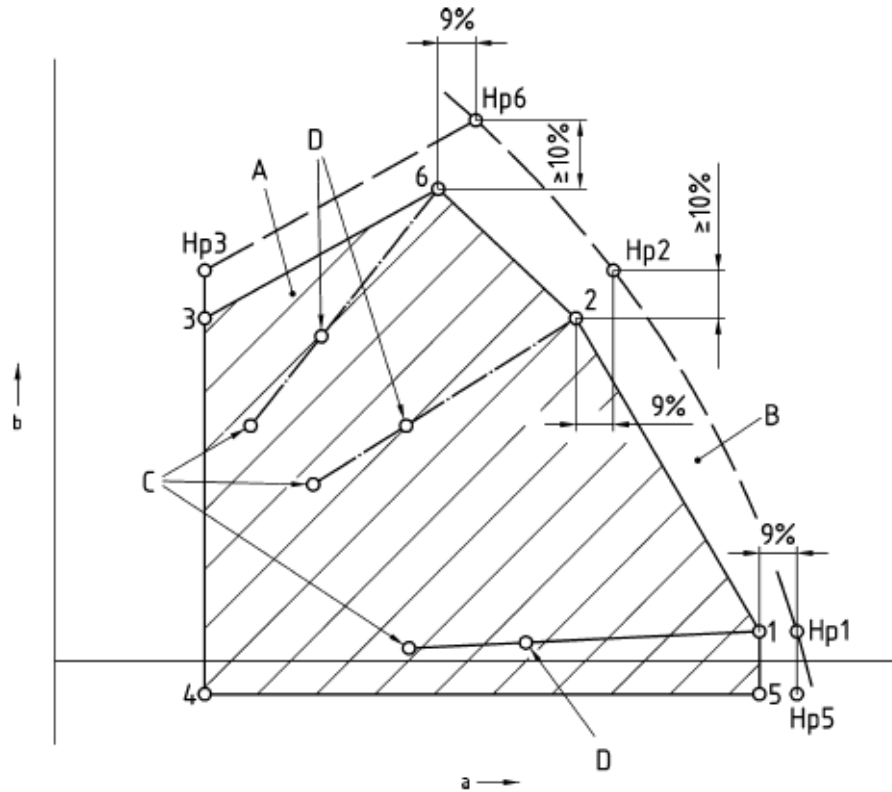


Figura 48 Diagrama de funcionamiento y diagrama de ensayos para quemadores de potencia variable

Donde:

- a: Consumo calorífico [kW]
- b: Presión en la cámara de combustión [mbar]
- A: Diagrama de funcionamiento
- B: Diagrama de ensayos
- C: Puntos de consumo calorífico mínimo
- D: Puntos de consumo calorífico máximo

H. Check list ensayos extracto certificado de aprobación quemador

El siguiente anexo corresponde a un extracto del certificado de aprobación de quemadores de aire forzado autorizado según Resolución Exenta de la SEC. En el extracto se seleccionaron solo los ensayos que competan a los parámetros capaces de ser medidos en el banco de pruebas que se detallan en el punto 2.4 y se anexa a modo de enlazar los ensayos descritos en este informe en con el documento oficial que maneja la superintendencia.

N°	ENSAYO	REQUERIMIENTO (Cualitativo)	VALOR MEDIDO	OBSERVACION
4.4.1.2	Prebarrido			
	Se debe realizar un prebarrido de la cámara de combustión antes de que se active el dispositivo de encendido.	✓		
	La duración del prebarrido debe:			
a)	mayor o igual que 20 [s] con el caudal de aire de combustión total correspondiente al consumo calorífico nominal máximo; o	✓		
b)	si se reduce el caudal de aire, la duración se debe incrementar de forma inversamente proporcional a la reducción del caudal de aire.	✓		
c)	una parada por seguridad del quemador y un rearme; o	✓		
d)	la continuación del prebarrido hasta que se restablezca el caudal de aire requerido, con la condición de que no haya disminuido el tiempo total de prebarrido con el caudal de aire requerido.	✓		
	Los quemadores con dos o varios escalones, con clapetas de aire controladas por cualquier clase de servomotor, deben estar provistos de posiciones de caudal de aire alto y bajo.	✓		
	Según el caudal de aire elegido una de estas posiciones indica la posición correcta durante la secuencia de prebarrido. Si, durante el prebarrido, esta posición es incorrecta se debe originar una parada durante la secuencia de prebarrido y evitar el rearme del quemador hasta que se restablezca el caudal de aire.	✓		
	la duración del prebarrido puede ser diferente, o el prebarrido se puede no realizar, cuando lo permiten los requisitos de las normas relativas al generador de calor.	N.A.		

	Después de una parada por regulación, se pueden volver a poner en funcionamiento sin prebarrido los quemadores:			
e)	de consumo calorífico menor o igual que 70 kW, si están provistos de dos válvulas de seguridad de clase A en serie, o de dos válvulas de seguridad de clase B en serie y de un dispositivo de control de estanquidad;	N.A.		
	de consumo calorífico mayor que 70 kW, si están provistos de dos válvulas de seguridad de clase A en serie y de un dispositivo de control de estanquidad	N.A.		
	El prebarrido se debe realizar después de:			
g)	un bloqueo firme	✓		
h)	una parada de más de 24 horas;	✓		
i)	un corte de la energía eléctrica;	✓		
j)	una parada por falta de gas	✓		

Figura 49 Extracto documento oficial de inspección

Nº	ENSAYO	REQUERIMIENTO (Cualitativo)	VALOR MEDIDO	OBSERVACION
4.4.1.3	Consumo calorífico de encendido			
	Los quemadores se deben poner en funcionamiento con un valor del factor de aire mayor o igual a los indicados en la tabla 7. Los quemadores de consumo calorífico nominal menor o igual que 120 kW se pueden encender directamente.	✓		
	Para los quemadores de consumo calorífico nominal mayor que 120 kW, el consumo calorífico de encendido debe ser inferior o igual a 20 kW, o al calculado con la ecuación	N.A.		
	$t_s \times Q_s \leq 100$	N.A.		
	Si los quemadores se encienden mediante un quemador de encendido independiente, el consumo calorífico de encendido del quemador de encendido debe ser menor o igual al valor calculado con la ecuación	N.A.		
	$t_s \times Q_s \leq 100$	N.A.		
	t_s =tiempo de seguridad, expresada en segundos			
4.4.2.2	Resistencia del quemador al sobrecalentamiento			
	En las condiciones de ensayo de 5.3.2, las diferentes piezas del quemador no deben presentar ningún deterioro que no sea la alteración superficial originada por la combustión.	✓		
4.4.2.3	Temperatura de los dispositivos de regulación y de seguridad			
	En las condiciones de ensayo de 5.3.3, la temperatura de los dispositivos de ajuste, y de los dispositivos de regulación y de seguridad, no debe sobrepasar el valor indicado por el fabricante, y su funcionamiento debe permanecer correcto.	✓		
	La temperatura de la superficie de los mandos y palancas destinadas a ser manipulados, no debe sobrepasar la temperatura ambiente en mas de:			
	35 [k] para los metales;	N.A.		
	45 [k] para la porcelana o materiales equivalentes;	N.A.		
	60 [k] para los plásticos o materiales equivalentes.	✓	30 (°C)	
4.4.2.4	Encendido, funcionamiento y estabilidad de las llamas			
	En las condiciones de ensayo de 5.3.4 y 5.3.5, según el caso, el encendido se debe realizar sin oscilaciones, correcta y rápidamente. Las llamas deben ser estables, y no deben producir ruido excesivo. Se admite una ligera tendencia al desprendimiento en el momento del encendido, pero las llamas deben ser estables después del mismo.	✓		
	Para los quemadores regulables, estos requisitos se deben cumplir para el consumo calorífico nominal máximo y para el consumo calorífico nominal mínimo, indicados por el fabricante.	✓		
4.4.3	Rango de consumo calorífico del quemador			
	El consumo calorífico nominal máximo y el consumo calorífico nominal mínimo, medidos en las condiciones de 5.7, no se deben desviar en $\pm 5\%$ de los valores indicados por el fabricante	✓		

Figura 50 Extracto documento oficial de inspección

Nº	ENSAYO	REQUERIMIENTO (Cualitativo)	VALOR MEDIDO	OBSERVACION
4.4.5	Diagramas de funcionamiento y de ensayos			
4.4.5.1	Diagrama de funcionamiento			
	El diagrama de funcionamiento representa el rango de utilización admisible del quemador según la presión de la cámara de combustión, expresado en función del consumo calorífico del quemador.	✓		
	Sus límites están definidos por una serie de puntos del 1 al 5 incluidos, como se indica en la figura 5 para los quemadores de un escalón, o del 1 al 6 incluidos, como se indica en la figura 6 para los quemadores con varios escalones.	✓		
4.4.5.2	Diagrama de ensayos			
	El diagrama de ensayos representa los rangos de presión en la cámara de combustión, y de consumo calorífico del quemador, en los que se ensaya el quemador para verificar su conformidad con la norma.	✓		
	Se compone del diagrama de funcionamiento, y de una zona de ensayos definida por una serie de puntos Hp1, Hp2, Hp3 y Hp5 para los quemadores de un escalón, y Hp1, Hp2, Hp3, Hp5 y Hp6 para los quemadores con varios escalones, como se indica respectivamente en Figura 5 y 6.	✓		
	Estos puntos se determinan según 5.4, 5.5, 5.6 y Tabla 6.	✓		

4.4.7	Valores límites de las emisiones			
	En las condiciones de ensayo de 5.5, las concentraciones de CO y de NOx en los productos secos de la combustión neutra, no deben pasar los valores indicados en 4.4.7.1.			
4.4.7.1	Monóxido de carbono			
a)	La concentración de CO no debe sobrepasar 100 mg/kWh (93 ppm) cuando el quemador funciona a la tensión de alimentación eléctrica indicada por el fabricante, con el gas de referencia de la familia o de los grupos para los que ha sido diseñado.	✓	06 (ppm)	
b)	La concentración de CO no debe sobrepasar 2140 mg/kWh (2000 ppm) cuando el quemador se ensaya a 0,85 veces la tensión de alimentación eléctrica indicada por el fabricante, con el gas de referencia de la familia o de los grupos para los que ha sido diseñado.	✓	12 (ppm)	
c)	La concentración de CO no debe sobrepasar 2140 mg/kWh (2000 ppm) cuando el quemador se ensaya en las mismas condiciones que en a) a la tensión de alimentación eléctrica indicada por el fabricante, con el gas límite de combustión incompleta de la familia o del grupo para el que ha sido diseñado.	✓	22 (ppm)	

Nº	ENSAYO	REQUERIMIENTO (Cualitativo)	VALOR MEDIDO	OBSERVACION
d)	El quemador debe estar provisto de medios adecuados, de forma que si la tensión de alimentación eléctrica es menor que 0,85 veces el valor indicado por el fabricante, o continúa funcionando con total seguridad con una concentración de CO en los productos de la combustión menor que 1% en volumen, o se origina una parada por seguridad.	✓		

Figura 51 Extracto documento oficial de inspección

I. Listado de piezas requeridas para armar los módulos.

I.1 Listado de piezas módulo principal

Tabla 26 Listado de piezas módulo principal

Pieza	Designación	Cantidad	Largo [mm]
Corte Vertical	40 x 40	4	920
Corte Horizontal Corto	40 x 40	8	570
Corte Horizontal Mediano	40 x 40	2	670
Corte Horizontal Largo	40 x 40	3	750
Bracket	30x30	12	-
Conector Rápido	N10, D17	14	-
Rueda	D10-D50	4	-
Elemento Torsión	N10	2	-
Plantilla Perforación	N10	1	-

I.2 Listado de piezas columna porta pirómetro

Tabla 27 Listado de piezas columna pirómetro

Pieza	Designación	Cantidad	Largo [mm]
Corte Horizontal Corto	40x40	1	440
Brazo	40x40	1	300
Columna	40x40	1	1000
Junta giratoria 180°	40x40	1	-
Unión giratoria -90/90°	40x40	1	-
Palanca	L40	2	-
Bloque deslizante	N10	1	-
Resorte para bloque	N10	1	-