

2022-01

# DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE CALEFACCION RESIDENCIAL CON MEDIO POROSO INTEGRADO A SU CAMARA DE COMBUSTION

ZAMORA SUEZ, TOMAS GONZALO

---

<https://hdl.handle.net/11673/53735>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

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



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN  
RESIDENCIAL CON MEDIO POROSO  
INTEGRADO A SU CÁMARA DE  
COMBUSTIÓN”**

**TOMÁS GONZALO ZAMORA SUEZ**

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

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.  
PROFESORA CORREFERENTE: DRA. KAREN YAÑEZ**

24 de enero de 2022

## Agradecimientos

A MI FAMILIA, DIRECTAMENTE A MI PADRE Y MADRE; A MI HERMANO ANDRÉS POR APOYARME Y EDUCARME DURANTE MI NIÑEZ; A CADA COMPAÑERO Y COMPAÑERA QUE CONOCÍ Y FORMAMOS LINDOS LAZOS DE AMISTAD Y COMPAÑERISMO AL COMPARTIR POR ESTA UNIVERSIDAD Y CARRERA; A MI PAREJA ALEJANDRA POR SU APOYO INCONDICIONAL; A MI ABUELO, GRACIAS.

## Resumen

El presente trabajo es parte del proyecto FONDEF IDeA 2020 código ID20I10319, el cual junto a las empresas asociadas BOSCA Chile S.A y Bosques del Norte S.A, buscan diseñar y construir un prototipo de estufa la cual tendrá como objetivo principal disminuir las emisiones contaminantes producto de la quema de leña utilizando medios porosos inertes al interior de la cámara de combustión del calefactor.

La empresa BOSCA nos entregó una de sus estufas comerciales de 10,8 kW para experimentar y lograr obtener datos relevantes para el próximo diseño de estufa esperado. Se usan dos configuraciones las cuales fueron la estufa tal cual se encuentra en el mercado y una modificación a la cámara interior misma de la estufa la cual se integran medios porosos en ambas paredes laterales. Se intervienen las vermiculitas interiores del calefactor para poder registrar valores de temperatura mediante termocuplas al interior de éstas y además, usar el mismo procedimiento para registrar temperaturas al usar medio poroso.

Se realizan 5 pruebas de combustión (3 línea base y 2 con el prototipo de medio poroso) las cuales duran alrededor de 45 minutos usando alrededor de 2,5[kg] de leña certificada de aproximadamente 15 % de humedad para cada caso de análisis.

Se logran registrar datos fiables de temperaturas interiores de la cámara de combustión de la estufa llegando a máximos de 700°C para temperaturas de gases durante los primeros 10 minutos. Para los datos de pared de vermiculita vs pared con medio poroso inerte los resultados fueron favorables al medio poroso superando en aproximadamente 80°C las temperaturas alcanzadas con sólo vermiculita.

Las conclusiones de este trabajo apuntan a seguir investigando el uso de medios porosos inertes en estufas comerciales para investigar como cambia la temperatura al interior y comprobar si éstas ayudan a reducir emisiones contaminantes, así como también indagar de otras configuraciones mezclando medio poroso con vermiculita además de la utilizada en este trabajo.

Palabras clave: Medio poroso inerte (MPI), Vermiculita, Artefacto de combustión

## Abstract

This work is part of the FONDEF IDeA 2020 project code ID20I10319, which together with the associated companies BOSCA Chile S.A and Bosques del Norte S.A, seeks to design and build a prototype stove whose main objective is to reduce pollutant emissions from wood burning by using inert porous media inside the combustion chamber of the heater.

The company BOSCA gave us one of its 10.8 kW commercial stoves to experiment and obtain relevant data for the next expected stove design. Two configurations were used which were the stove as it is on the market and a modification to the inner chamber of the stove itself which integrates porous media in both side walls. The inner vermiculites of the heater are intervened to be able to register temperature values by means of thermocouples inside them and also to use the same procedure to register temperatures when using porous media.

Five combustion tests are performed (3 baseline and 2 with the porous medium prototype) which last about 45 minutes using about 2.5 [kg] of certified firewood of approximately 15 % humidity for each case of analysis.

Reliable data are recorded for temperatures inside the combustion chamber of the stove reaching maximums of 700°C for gas temperatures during the first 10 minutes. For the vermiculite wall vs. inert porous media wall data, the results were favorable to the porous media, exceeding the temperatures reached with only vermiculite by approximately 80°C.

The conclusions of this work point to continue investigating the use of inert porous media in commercial stoves to investigate how the temperature changes inside and check if they help to reduce pollutant emissions, as well as to investigate other configurations mixing porous media with vermiculite in addition to the one used in this work.

Keywords: Inert Porous media (IPM), Vermiculite, Combustion artifact

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>10</b>
2.1. Objetivos Generales . . . . .	10
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	10
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
3.1. Leña . . . . .	11
3.1.1. Antecedentes en Chile . . . . .	11
3.1.2. Tipos de leña y su consumo . . . . .	13
3.1.3. Características de la leña . . . . .	13
3.1.4. Leña certificada . . . . .	14
3.1.5. Fases del quemado de leña . . . . .	15
3.2. Gases de combustión . . . . .	16
3.2.1. Analizador de gases . . . . .	16
3.3. Material particulado . . . . .	16
3.3.1. Método Gravimétrico . . . . .	17
3.3.2. Antecedentes en Chile . . . . .	17
3.4. Equipos de combustión residencial . . . . .	19
3.4.1. Tecnologías disponibles en el mercado . . . . .	19
3.4.2. BOSCA Spirit 380 . . . . .	21
3.5. Medios Porosos Inertes . . . . .	21
3.5.1. Combustión dentro de un Medio poroso inerte (MPI) . . . . .	22
3.5.2. Ventajas en el uso del MPI en combustión . . . . .	23
<b>4. Políticas y Normativa</b>	<b>24</b>
4.1. Material particulado . . . . .	24
4.1.1. Política nacional . . . . .	24
4.1.2. Política internacional (EPA) . . . . .	25
4.2. Política internacional (EUROPA) para emisiones de gases de combustión de artefactos de combustión residencial . . . . .	25
4.3. Políticas para certificación de leña . . . . .	26
4.3.1. Proyecto de ley regulación de Biocombustibles sólidos . . . . .	26
<b>5. Diseño Experimental</b>	<b>28</b>
5.1. Túnel de dilución . . . . .	28
5.1.1. Montaje Túnel de dilución . . . . .	29
5.2. Equipos externos . . . . .	30
5.3. Diseño propuesto de calefacción residencial . . . . .	32
<b>6. Desarrollo Experimental</b>	<b>35</b>
6.1. Metodología para monitoreo de temperaturas internas . . . . .	35
6.2. Precauciones a tomar antes del ensayo . . . . .	37
6.3. Metodología para combustión . . . . .	37

---

<b>7. Resultados Experimentales</b>	<b>39</b>
7.1. Temperaturas internas de la estufa . . . . .	39
7.1.1. Línea base . . . . .	39
7.1.2. Diseño propuesto con MPI . . . . .	41
7.2. Análisis y comparaciones de promedios . . . . .	42
7.2.1. Análisis comparativo de temperaturas . . . . .	44
7.2.2. Análisis de simetría de temperaturas . . . . .	45
7.3. Análisis de gases de combustión . . . . .	47
7.3.1. Decaimiento de masa . . . . .	48
<b>8. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>9. Recomendaciones y trabajos futuros</b>	<b>50</b>
<b>10. ANEXO I</b>	<b>51</b>

## Índice de figuras

1.	Consumo de leña nacional por región respecto al total de viviendas tipología casa (aproximadamente 4.5 millones) en sector residencial al año 2015 [2] . . . . .	9
2.	Composición de la oferta en la energía primaria [4] . . . . .	12
3.	Composición del consumo final [4] . . . . .	12
4.	Especies de leña más consumidas en el mercado nacional [2] . . . . .	13
5.	Extracto de las 10 ciudades más contaminadas por material particulado MP <sub>2,5</sub> en Sudamérica por sitio IQ Air[7] . . . . .	17
6.	Número de episodios de emergencia por mala calidad de aire en las 3 ciudades mas contaminadas de Chile [1] . . . . .	18
7.	Sistema de funcionamiento de una estufa de combustión doble [25] . . . . .	20
8.	Tipo de combustible principal usado para calefacción en el hogar por región (Porcentaje) . . . . .	21
9.	Teoría de llama con exceso de entalpía [17] . . . . .	23
10.	Entorno de pruebas, vista general del túnel de dilución montado en Sede JMC, UTFSM . . . . .	29
11.	Esquema vista frontal del túnel de dilución . . . . .	30
12.	Balanza KERN utilizada en el experimento . . . . .	31
13.	Medidor de humedad TESTO 606-2 . . . . .	31
14.	Analizador de gases Testo 350 . . . . .	32
15.	Fotografía y esquema de pared lateral de vermiculita al interior de la cámara de combustión, correspondiente a los ensayos de linea base . . . . .	33
16.	Fotografía y esquema de pared lateral del conjunto vermiculita y medio poroso al interior de la cámara de combustión . . . . .	33
17.	Intervención de vermiculita mediante canales y perforaciones, las flechas indica el lugar donde se perfora y posiciona la termocupla dentro de la vermiculita . . . . .	35
18.	Disposición termocuplas para ensayo linea base . . . . .	36
19.	Disposición termocuplas para ensayo con MPI . . . . .	36
20.	Niveles de regulación de aire primario que posee la estufa BOSCA Spirit 380	38
21.	Temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión de la estufa BOSCA Spirit 380 a lo largo del tiempo para ensayo de Linea base . . . . .	40
22.	Temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión de la estufa BOSCA Spirit 380 a lo largo del tiempo para ensayo de diseño propuesto con MPI . . . . .	41
23.	Promedios de termocuplas para Linea base . . . . .	43
24.	Promedios de temperaturas para diseño propuesto . . . . .	43
25.	Comparación termocuplas de pared laterales dentro de la estufa, diferenciando entre linea base y ensayo con medio poroso inerte . . . . .	45
26.	Diferencias de temperaturas entre termocupla frontal para T3 y T5 . . . . .	46
27.	Diferencias de temperaturas entre termocupla frontal para T4 y T6 . . . . .	47
28.	Toma de muestras de concentración de CO para 3 primeros ensayos de linea base, se demuestra el decaimiento en la precisión a medida que se pasa entre un experimento y otro . . . . .	48
29.	Decaimiento de masa para experimento linea base y prototipo de estufa . . . . .	49

30.	Diferencias entre los promedios de gases obtenidos en experimentos de línea base y medio poroso . . . . .	51
31.	Diferencias entre los promedios de paredes laterales obtenidas en experimentos de línea base y medio poroso . . . . .	52
32.	Diferencias entre los promedios de pared trasera obtenidos en experimentos de línea base y medio poroso . . . . .	52

## Índice de tablas

1.	Variación de poder calorífico inferior vs % de humedad para distintas especies consumidas en Chile [2] . . . . .	11
2.	Análisis elemental para 3 especies de árbol en base seca [12] . . . . .	14
3.	Análisis proximal y orgánico para 3 especies de árbol en base seca [12] . . . . .	14
4.	Tipos de estufa y su preferencia en zona sur de Chile y a nivel nacional para el año 2014 [1] . . . . .	20
5.	Tabla de especificaciones técnicas de la estufa Spirit 380 [24] . . . . .	21
6.	Propiedades térmicas de materiales más utilizados para medios porosos inertes	22
7.	Límites de emisión establecido por DS 46[20] . . . . .	24
8.	Resumen por año de la regulación por la EPA de material particulado emitido por artefactos de combustión residencial [14] . . . . .	25
9.	Valores límite de emisión y eficiencia para equipos en terreno Europeo [18] . . . . .	26
10.	Temperaturas máximas obtenidas para cada una de las termocuplas del ensayo línea base . . . . .	40
11.	Temperaturas máximas obtenidas para cada una de las termocuplas del ensayo con medio poroso inserto en la estufa . . . . .	41
12.	Tasa de quemado hasta tiempo 500[s] y total para cada configuración realizada	49

## 1. Introducción

Actualmente en Chile la leña es el combustible mas utilizado en la zona centro-sur tanto para calefactores residenciales como para cocinas a leña, y donde su consumo se estima vaya en aumento a lo largo de los años debido a su bajo costo y fácil obtención. Sin embargo la combustión residencial de leña corresponde a una importante fuente de contaminación atmosférica debido a la elevada emisión de contaminantes en fase gaseosa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , entre otros) y fase partícula ( $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2,5}$  y  $\text{MP}_{1,0}$ ).

Como se aprecia en la figura 1 la leña posee un 37,6 % en promedio de consumo a lo largo del país. Esta preferencia de utilizar la leña como combustible residencial es más abundante en las regiones centro-sur del país, siendo la región de Aysén (XI) la que presenta la mayor a nivel regional (99 %), seguida de la región de Los Lagos (X) y la región de los Ríos (XIV).[2]

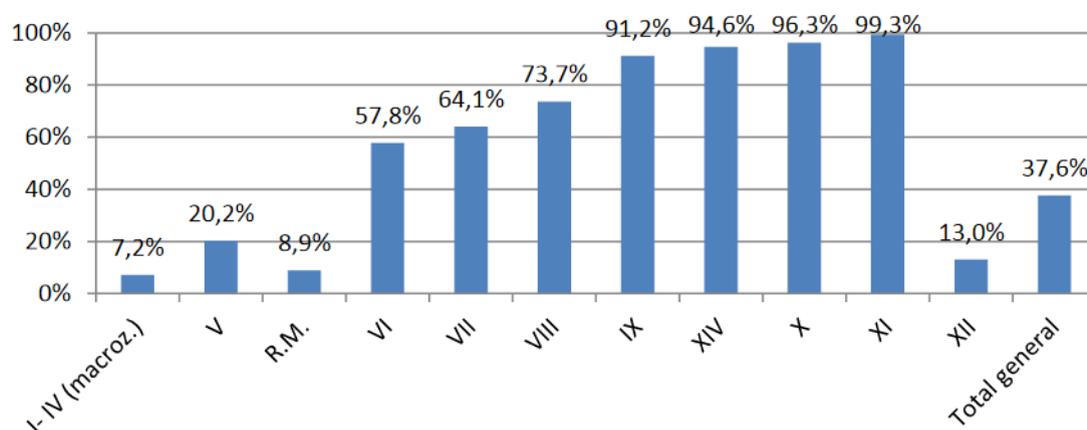


Figura 1: Consumo de leña nacional por región respecto al total de viviendas tipología casa (aproximadamente 4.5 millones) en sector residencial al año 2015 [2]

Cabe señalar que estudios tanto nacionales como internacionales registran en estas regiones alarmantes cifras de la peor calidad ambiental atmosférica tanto del país como de Sudamérica misma, donde las principales causas apuntan en la alta quema de leña húmeda debido a la compra/venta de leña no certificada y/o al uso de aparatos de calefacción no certificados.

Es por esto que resulta interesante y positivo estudiar e implementar tecnologías que ayuden a mitigar los contaminantes atmosféricos generados por la combustión residencial de leña. Por consiguiente, el presente trabajo de título consistirá en analizar como cambia térmica y energéticamente la combustión en la estufa al añadir un medio poroso inerte en su cámara de combustión.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivos Generales**

En el marco del proyecto FONDEF-IDEA código ID20I10319 denominado “Innovador prototipo de calefacción residencial integrado al pretratamiento de lavado de leña para la mitigación de contaminantes atmosféricos: carbono negro, material particulado y gases de combustión”, y en colaboración con las empresas BOSCA y Bosques del Norte. El objetivo general consiste en el diseño y construcción de un prototipo de calefacción residencial el cual consta de un medio poroso inerte integrado en la cámara de combustión.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del presente trabajo de título son:

1. Reconocer tanto la normativa nacional como internacional sobre emisiones de las estufas de combustión a leña.
2. Seleccionar el medio poroso inerte que es técnicamente viable para ser utilizado en estufas de combustión de leña.
3. Proponer diseño de prototipo de calefacción residencial con medio poroso integrado a la cámara de combustión.
4. Supervisar la construcción del prototipo de calefacción residencial seleccionado.
5. Desarrollar pruebas de combustión en el prototipo construido y comparar sus resultados con estufa convencional.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Leña

La leña es un recurso renovable que ha sido utilizado desde décadas por su fácil obtención a partir de la tala y manejo de bosques tanto nativos como forestales y su gran utilidad a la hora de calentar hogares y cocinas debido a su buen poder calorífico. Sin embargo entre sus desventajas y en el contexto en que nos encontramos, se debe entender que la tala indiscriminada de árboles ha provocado desequilibrios medioambientales importantes, y donde las emisiones debido a la combustión residencial de este combustible es el factor que más preocupa por la contaminación provocada. Además, mencionar que estudios han evidenciado que a mayores porcentajes de humedad en la leña provocará que el poder calorífico de ésta disminuya, esta tendencia se puede apreciar en la tabla 1 que señalan que este comportamiento es inversamente proporcional a la humedad de la leña. Cabe destacar que a mayor poder calorífico menor serán las emisiones contaminantes tanto en su fase gaseosa ( $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ , entre otros) como en su fase partícula ( $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$  y  $MP_{1,0}$ ), es por esto que se debe preferir la leña seca y certificada que nos asegurará un poder calorífico específico que provocará una combustión mucho más limpia que una leña no secada.

Tabla 1: Variación de poder calorífico inferior vs % de humedad para distintas especies consumidas en Chile [2]

% Hum.	PODER CALORÍFICO NETO [MJ/kg]							
	Roble	Coigüe	Lingue	Euc. Nitens	Euc. Globulus	Aromo	Radal	Ulmo
18	16,58	14,99	15,81	16,12	14,56	15,78	16,8	15,3
25	14,96	13,51	14,26	14,54	13,11	14,23	15,16	13,78
33	13,1	11,8	12,47	12,73	11,45	12,45	13,28	12,05

##### 3.1.1. Antecedentes en Chile

La leña debido a su alta disponibilidad y bajo costo en el mercado nacional es una de las principales fuentes de energía del país. En el Anuario estadístico de energías 2019, publicados por la Comisión Nacional de Energía (CNE)[4] se muestran los datos de la evolución y composición de la matriz energética primaria (producción) y final(consumo), donde la biomasa se posiciona en las primeras posiciones tanto de producción como consumo.

La matriz energética primaria registra el aprovisionamiento energético del país en [Tcal], esto considera la producción de recursos energéticos de Chile y sus exportaciones e importaciones. Como se muestra en la figura 2 los principales aportes vienen de los combustibles fósiles sumando un 67%, el resto lo componen la producción de biomasa con un 25% y en menor proporción la suma de hidroelectricidad, solar y eólica con un 9%.

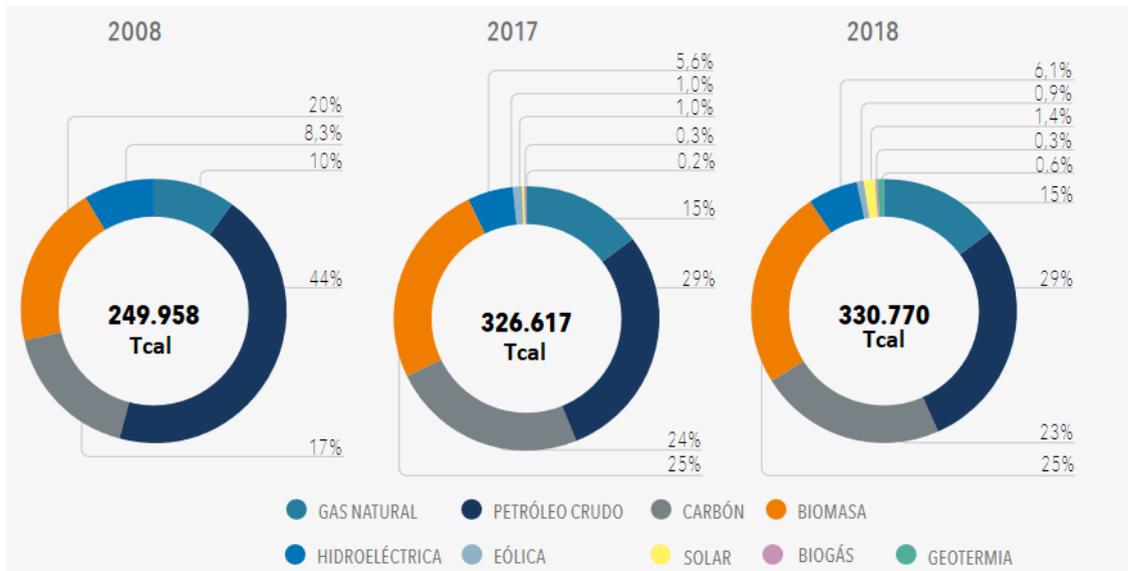


Figura 2: Composición de la oferta en la energía primaria [4]

Para el caso de la matriz energética final y como se aprecia en la figura 3 muestra el comportamiento del consumo de energía del país, es de esperar que los combustibles fósiles sean los más consumidos al ser la materia prima que más oferta existe en el país, por su parte la biomasa registra un 13% en el consumo nacional de la matriz energética, donde cabe señalar que este porcentaje incluye tanto Sector comercial, industrial, público y residencial.

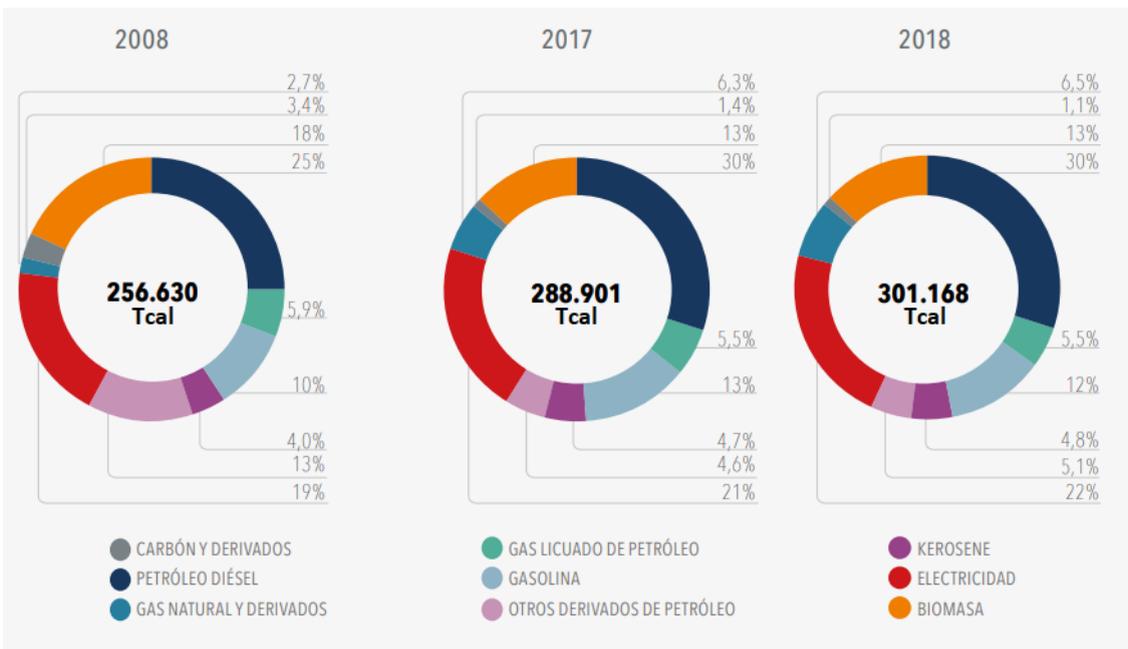


Figura 3: Composición del consumo final [4]

### 3.1.2. Tipos de leña y su consumo

Según estudios de medición del consumo nacional de leña[2] tres son los motivos principales por los cuales la gente consume la leña como fuente energética, siendo la respuesta más recurrente de este estudio la “sensación de un calor más duradero”, seguido por “que es combustible más económico” y como tercer lugar se menciona “que les gusta y porque los equipos que posee son a leña”.

Dicho estudio responde de igual forma la interrogante de saber cuál es el árbol de origen de la leña más vendida en el país, para este estudio se emplea la unidad de metro cúbico estéreo ( $m^3st$ ) donde dicha unidad consiste en una pila de aproximadamente 1 [m] de alto por 1 [m] de ancho y 1 [m] de largo, compuesto generalmente de tres secciones que contienen los trozos de leña ubicados uno sobre el otro, y equivalentemente 1 metro cubico estéreo es aproximadamente un 60 % de  $1m^3$  de madera[22].

Finalmente en la figura 4 se pueden apreciar las leñas más consumidas de acuerdo al estudio de medición del consumo nacional de leña :

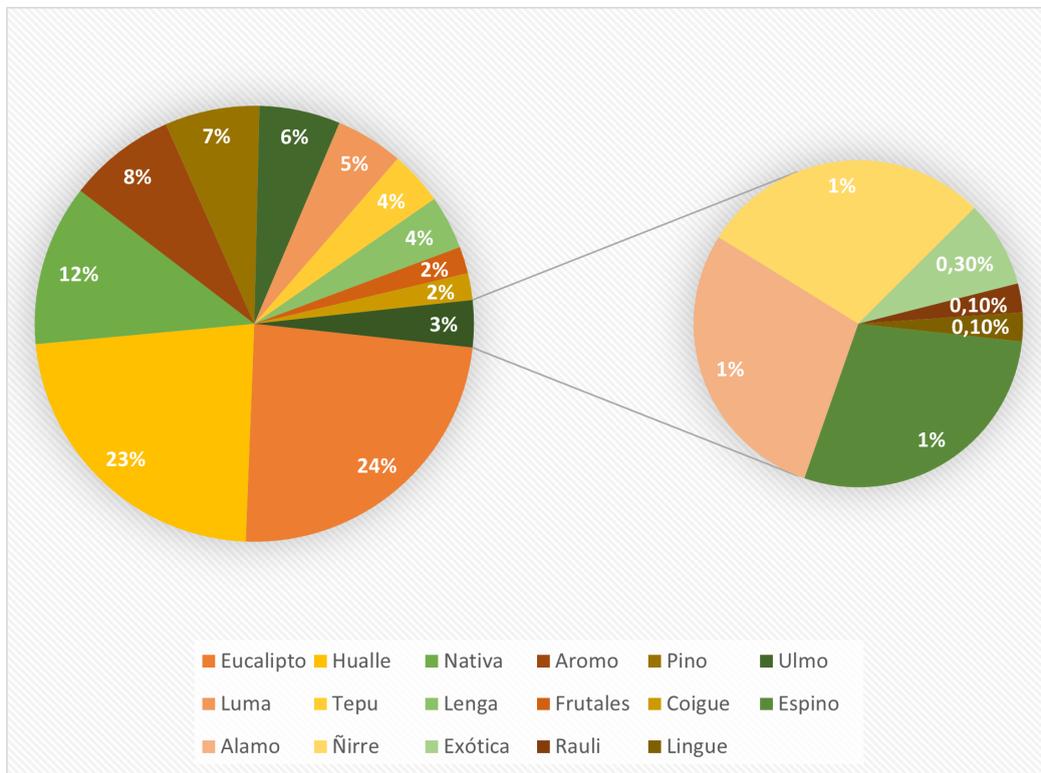


Figura 4: Especies de leña más consumidas en el mercado nacional [2]

### 3.1.3. Características de la leña

Si bien la composición particular de cada madera es propia y única del tipo de árbol, en general los elementos estructurales de su composición química son conocidos y esencialmente varían las proporciones de estos al interior de la madera. Dentro de estas estructuras que dan forma y características a la madera, se encuentran principalmente compuestos

orgánicos como la lignina, celulosa y hemicelulosa. Además, es posible encontrar pequeños porcentajes de resinas y ceniza dentro de los análisis.

El análisis elemental es una técnica que entrega el contenido total en porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas. Estos análisis se hacen con instrumentos analíticos de muestras especializados.

la tabla 2 muestran estos datos de análisis elemental para 3 tipos distintos de madera analizada en este estudio [12].

Tabla 2: Análisis elemental para 3 especies de árbol en base seca [12]

Especie de árbol( % de humedad)	Análisis elemental (%)				
	C	H	N	S	O
<i>Pinus Radiata</i> (7,12 %)	50,83	5,81	0,05	0,017	38,77
<i>Eucalyptus globulus</i> (5,95 %)	49,94	6,50	0,08	0,022	40,53
<i>Nothofagus obliqua</i> (7,83 %)	49,68	6,46	0,11	0,02	40,21

Mientras que en los análisis proximales se miden cuatro parámetros diferentes, estos datos son obtenidos gracias a un analizador proximal automatizado y son :

1. **Ceniza:** Material residual en el carbón que no logra combustionar.
2. **% de Humedad:** Humedad total de la muestra de material orgánico
3. **Carbono fijo:** El carbono residual que queda en el leño carbonizado tras la combustión. Se calcula restando los % en peso de humedad, ceniza y material volátil
4. **Material volátil:** Es esencialmente una medida de % en peso de los gases no acuosos que se forman en una muestra de carbón o leña durante la combustión.

Tabla 3: Análisis proximal y orgánico para 3 especies de árbol en base seca [12]

Especie de árbol (% de humedad, en base seca)	Análisis proximal (%)			Análisis químico (%)		
	Material volátil	Carbono fijo	Ceniza	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
<i>Pinus Radiata</i> (7,12 %)	81,6	13,88	4,52	39,9	24,2	27,4
<i>Eucalyptus globulus</i> (5,95 %)	87,93	9,14	2,93	41,0	19,4	28,1
<i>Nothofagus obliqua</i> (7,83 %)	87,51	8,97	3,52	35,8	28,7	27,3

### 3.1.4. Leña certificada

La certificación busca disminuir la venta informal, la evasión de impuestos, la contaminación del aire y además impulsar la correcta entrega de información a los consumidores para su compra. La certificación es una herramienta de mercado voluntaria, donde en este

caso, el Consejo Nacional de Certificación de Leña es la entidad a cargo de proporcionar una garantía escrita de que un producto cumple con ciertos estándares.

La leña es la tercera fuente de energía más importante del país, y junto a la energía hidroeléctrica, es el único energético renovable que se produce y se utiliza en forma significativa en Chile. Se calcula que al año se consumen en el país cerca de 20.3 millones de metros cúbicos de leña y que más del 50 % de los hogares desde Rancagua (VI Región) al sur la demandan para calefacción, llegando incluso a sobrepasar el 80 % de preferencia[3]. Por tal razón, y para que la leña no produzca problemas ambientales, se necesita de productores y consumidores responsables que elijan leña certificada.

Entre las ventajas de preferir el uso de leña certificada se encuentra que [3]:

1. Garantiza un contenido de humedad inferior al 25 %, que hace más eficiente la combustión, genera más calor, permite ahorrar en volumen y reducir la contaminación del aire.
2. La compra de leña por kilo, canasto o saco, tiene su equivalencia en metros cúbicos, lo que facilita la comparación de precios independiente de la unidad que se utilice.
3. Al comprar se debe entregar información sobre las principales características del producto, como volumen, contenido de humedad, etc. Lo anterior protege al comprador como consumidor, según la legislación administrada por el SERNAC.

### 3.1.5. Fases del quemado de leña

Es importante apreciar que existen dos mecanismos de combustión los cuales dependen del estado en que se encuentre el combustible a quemar. Un mecanismo de combustión homogéneo se presenta en combustibles gaseosos, en donde su reacción química ocurre inmediatamente al estar presente con el aire necesario. Para el caso de combustibles líquidos y sólidos se presenta un mecanismo de combustión heterogéneo, donde éstos necesitarán un mayor tiempo de ignición y en caso de los combustibles líquidos necesitarán una atomización previa.

La leña, al no presentar la propiedad de combustión homogénea hace necesario que se diferencien varias etapas al momento de su combustión[9] :

- **Secado de madera:** El proceso de secado ocurre inicialmente en el momento en que las llamas comienzan a transferir calor por radiación hacia la corteza de la madera, calentando el agua en interior por sobre el punto de ebullición. Mientras mayor porcentaje de humedad tenga la leña mayor será la cantidad de energía consumida en este proceso, y por ende más lenta será la etapa de calentamiento de la leña.
- **Oxidación de material volátil:** La madera al estar a una temperatura mayor a la temperatura de ebullición de agua comenzará a liberar material volátil, lo que provocará la aparición de humo, el cual es el resultado visible de la descomposición térmica de la madera, que se compone principalmente de hidrocarburos (Alquitrán) y pequeñas gotas combustibles. Este gas sólo se oxida a altas temperaturas y al tener suficiente oxígeno de por medio. En caso de que no se quemara por completo emitirá gases no quemados, los cuales se condensarán al tener contacto con la tubería de evacuación y darán paso a formar depósitos de cresota (hollín). Esta etapa genera una llama muy visible y extensa característica del quemado de la madera seca

- **Quemado del carbón residual:** Al momento de liberar todo el material volátil de la madera, se dará paso a un compuesto residual sólido de carbón junto con ceniza no combustible, este compuesto se caracteriza por una combustión superficial de resplandor rojo y llama muy poco intensa.

Estas etapas anteriormente mencionadas ocurren simultáneamente, esto quiere decir que al momento que los gases volátiles se están oxidando con grandes llamas, en la corteza de la madera se estará presentando el quemado del carbón residual con su resplandor rojizo y de igual forma al centro de la madera se estará secando parte del agua contenida en esta.

### 3.2. Gases de combustión

Al estudiar el proceso de combustión de leña, se ha señalado que se generan esencialmente gases producto y material particulado de distinto tamaño. Estos elementos resultantes tienden a aumentar en número mientras peor es la calidad del proceso de combustión o mayor es la cantidad de humedad contenida en la madera. Las consecuencias de una combustión de mala calidad se traducen principalmente en efectos al medioambiente y la salud de las personas, por un lado, la existencia de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , muestran que existe un aporte al calentamiento global con gases de efecto invernadero. Por otro lado, el material particulado (MP) genera problemas tanto a la atmósfera como a las personas, ya que al ser de tamaño micrométrico, sus partículas quedan suspendidas en el aire a baja altura (smog) y posteriormente, ingresar al sistema respiratorio de distintos seres vivos al inhalar aire.

#### 3.2.1. Analizador de gases

Un analizador de gases de combustión es un equipo que su función será medir la concentración de gases de un flujo determinado de aire contaminado, estas concentraciones serán dadas en [ppm] generalmente. Como se menciona anteriormente, los gases que medirá este equipo son generalmente  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  y  $O_2$  para los cuales dispone de distintos sensores para cada uno de estos gases

### 3.3. Material particulado

El Material particulado (MP) es un contaminante atmosférico que contempla partículas sólidas y líquidas en suspensión, se clasifica en función de su diámetro, siendo las mediciones más utilizadas las de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  en microgramos por metro cúbico ( $\mu g/m^3$ ). La exposición a concentraciones de  $MP_{2,5}$  sobre la norma afecta de forma significativa a la salud de las personas, ya que son partículas tan finas que penetran las vías respiratorias alcanzando los alveolos y afectando en gran medida el intercambio de oxígeno en la sangre, lo que se asocia con un aumento de las enfermedades cardíacas y respiratorias, donde dichas enfermedades incluyen la posible causante de algún tipo de cáncer.

Otra forma de clasificar al material particulado es por su origen, se denomina primario si esta fue emitida directamente al ambiente y secundario si se formó debido a reacciones químicas entre los contaminantes dentro de la atmósfera. Dentro de los primarios se encuentran los de combustión residencial debido a la combustión del leño. Se denominan

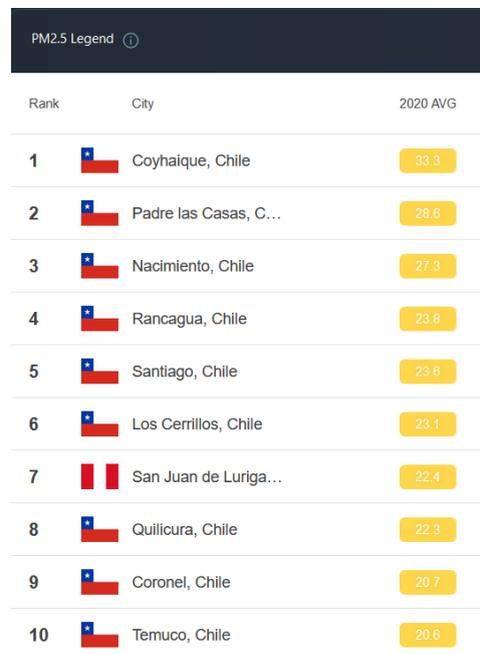
fuentes fijas a procesos industriales o domiciliarios y fuentes móviles a emisiones principalmente de vehículos ya sean a diésel o gasolina.

### 3.3.1. Método Gravimétrico

Método utilizado para la determinación de material particulado, ya sea sólido o líquido suspendido en el aire. El método consiste en tomar la muestra haciendo pasar un caudal conocido de aire a través de un filtro de microfibra de cuarzo o equivalente, el cual retiene las partículas que trae el aire, la cantidad retenida se conoce mediante la diferencia de peso del filtro antes y después del muestreo. Al saber esta diferencia de masa y conociendo el volumen de aire en la toma de muestra, se puede obtener la concentración del material particulado en el aire, en microgramos por metro cúbico. Cabe señalar que este método es estacionario, no podremos conocer a tiempo real la cantidad de material particulado que se va captando a través del filtro. Además, dependiendo del tipo de filtro podemos obtener las concentraciones para  $MP_{2,5}$  y  $MP_{10}$ .

### 3.3.2. Antecedentes en Chile

En Chile más de la mitad de sus habitantes están expuestos a concentraciones de material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ) por sobre los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud, llegando a la situación que dentro de las 20 ciudades más contaminadas de América latina por  $MP_{2,5}$ , 15 son ciudades a lo largo del sector centro-sur de Chile. [7]



Rank	City	2020 AVG
1	 Coyhaique, Chile	33.3
2	 Padre las Casas, C...	28.6
3	 Nacimiento, Chile	27.3
4	 Rancagua, Chile	23.8
5	 Santiago, Chile	23.6
6	 Los Cerrillos, Chile	23.1
7	 San Juan de Luriga...	22.4
8	 Quilicura, Chile	22.3
9	 Coronel, Chile	20.7
10	 Temuco, Chile	20.6

Figura 5: Extracto de las 10 ciudades más contaminadas por material particulado  $MP_{2,5}$  en Sudamérica por sitio IQ Air[7]

Es debido a esto que nace la necesidad por parte del gobierno de implementar planes

y estrategias para mitigar este efecto por parte de la población que ocupa artefactos de combustión residencial. Se han implementado los llamados Planes de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) que incluyen planes tales como:

1. Programa “Recambio de Calefactores”
2. Prohibición del uso de calefactores residenciales
3. Programa de mejoramiento térmico a viviendas
4. Regulación de productores de leña
5. Gestión de episodios críticos
6. Educación ambiental

A pesar de estas medidas utilizadas, estos planes parecen no haber conseguido el objetivo de mitigar emisiones de material particulado. La ciudad de Temuco siendo una de las más afectadas en cuanto a contaminación de particulado, consiguió ser la primera ciudad de Chile en implementar un PDA para  $MP_{10}$  el año 2010 y un segundo PDA para  $MP_{2,5}$  el año 2015, sin embargo los niveles de contaminación siguen siendo peligrosamente altos a la fecha y no muestra una tendencia decreciente en el tiempo, lo anterior se ve reflejado en la figura 6 :



Figura 6: Número de episodios de emergencia por mala calidad de aire en las 3 ciudades más contaminadas de Chile [1]

### 3.4. Equipos de combustión residencial

Como se menciona anteriormente, un factor importante a la hora de conocer las emisiones resultantes de la combustión de leña residencial, es conocer el tipo de leña y si ésta es certificada o no, ya que en caso de no ser certificada las emisiones resultantes serán mucho más contaminantes debido a la combustión pobre que se estará generando.

Por otro lado y no menos importante se encuentra el artefacto de combustión residencial, este aparato deberá cumplir ciertas normas vigentes que aseguren una buena combustión y parámetros de emisiones razonables. Sin embargo, en el mercado nacional e internacional no se han visto muchos avances tecnológicos en cuanto a estufas innovadoras que aseguren poca emisión de contaminantes, esto debido más que nada al costo de investigar y diseñar vs la poca demanda por parte de la ciudadanía a preferir estos equipos debido a su precio de venta. A continuación se mencionan los equipos de combustión mas comunes que se comercializan en el terreno nacional y una breve descripción de estos:

#### 3.4.1. Tecnologías disponibles en el mercado

1. **Chimeneas:** Son calefactores que se instalan o bien se construyen con ladrillos refractarios a pedido. Se caracterizan por tener cámaras de combustión de un gran volumen, no posee compuerta lo que provoca una combustión a cámara abierta lo cual no logra las eficiencias admisibles por el SEC.
2. **Salamandra:** Calefactores de hierro fundido, poseen limitada capacidad de control de ingreso de aire y poseen compuerta en su cámara de combustión, estos artefactos tampoco logran ser certificados por el SEC y están siendo reemplazados actualmente por estufas de combustión lenta.
3. **Cocina a leña:** Las cocinas de leña pueden considerarse la forma más convencional para cocer los alimentos. Este tipo de cocinas incluyen un sistema de combustión a base de madera, la cual es depositada en un contenedor inferior, justo por debajo de los hornillos y del horno en sí mismo. Suelen estar fabricadas de latón o acero. Empresas como AMESTI mencionan que sus productos, incluido la cocina a leña están certificados internacional y nacionalmente (por la SEC).
4. **Estufa combustión lenta:** Este tipo de calefactor es construido por planchas de acero soldadas para formar la cámara de combustión y dispone de un visor en la puerta de la cámara. Tiene sellos de aire los cuales son regulables por parte del usuario para permitir la entrada de aire necesaria para la combustión. Este tipo de calefactor es el de mayor uso, antes de la actual regulación emitida por la SEC
5. **Estufa doble-cámara de combustión lenta:** Esta tecnología es similar a la anterior y es la más utilizada actualmente en las estufas a leñas debido a que cumplen con la actual regulación del SEC, estos calefactores poseen una doble cámara de combustión con dosificación de aire secundario a través del templador de la estufa como se puede apreciar en la figura 7. La cámara extra permite generar una combustión más completa al aumentar el tiempo de quemado de los gases emitidos en la primera cámara, reduciendo así la emisión de material particulado .

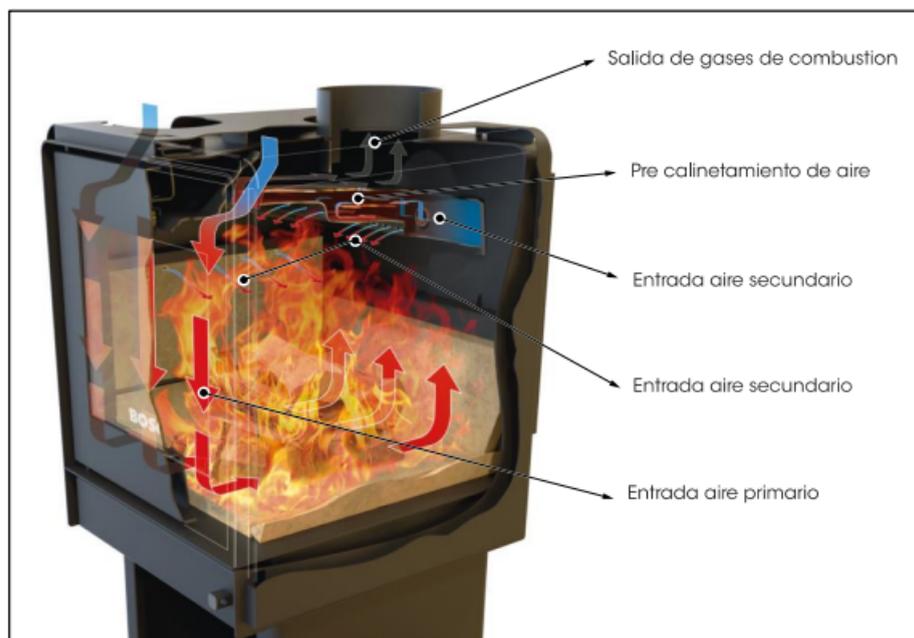


Figura 7: Sistema de funcionamiento de una estufa de combustión doble [25]

Si bien existen innovaciones de diseños en estufas como lo pueden ser el modelo de llama invertida de Bosca, estos tienen el inconveniente que son excesivamente caros, alejándose de lo que plantea el proyecto FONDEF de lograr disminuir emisiones con equipos que puedan ser más accesibles a la población.

Estudios a nivel nacional han analizado cuáles son los artefactos de combustión residencial más utilizados, en la tabla 4 se registran las preferencias obtenidas en dicho estudio:

Tabla 4: Tipos de estufa y su preferencia en zona sur de Chile y a nivel nacional para el año 2014 [1]

Región	Cámara Doble	Cocina a Leña	Salamandra	Cámara Simple	Equipo Hechizo	Chimenea	Caldera a leña	Total N° Equipos
O'higgins	37,0 %	11,3 %	26,7 %	11,1 %	9,9 %	4,1 %	0,0 %	165.372
Maule	56,6 %	12,0 %	12,6 %	8,7 %	7,1 %	3,1 %	0,0 %	234.279
Biobío	51,3 %	14,7 %	16,6 %	8,2 %	6,3 %	2,9 %	0,0 %	459.243
Araucanía	57,6 %	18,4 %	10,8 %	6,4 %	5,2 %	1,7 %	0,0 %	292.255
Los Ríos	49,4 %	28,6 %	3,0 %	16,9 %	1,2 %	0,5 %	0,4 %	254.569
Los Lagos	44,4 %	35,9 %	4,3 %	10,0 %	3,4 %	1,2 %	0,8 %	133.164
Aysén	35,8 %	38,3 %	1,3 %	23,7 %	0,0 %	0,6 %	0,3 %	38.505
Nacional	51,5 %	16,6 %	13,6 %	10,6 %	5,5 %	2,2 %	0,1 %	1.873.803

Mientras que otro estudio nacional[2] registra los datos de personas que tienen en su hogar artefactos de combustión a leña, gas o eléctricos, en donde se puede observar en el gráfico 8 la tendencia a usar artefactos eléctricos o gaseosos es mayor en las regiones del norte hasta la región metropolitana y siendo la combustión a gas la preferida, ya en regiones del centro-sur a sur (VI a XI) esta tendencia se empieza a invertir y da cuenta

que las regiones del sur ocupan en su gran mayoría artefactos que utilizan material vegetal como combustible y lo que deja en evidencia la mayor necesidad de calefacción debido a las bajas temperaturas en invierno y eventualmente, a la mayor disponibilidad de recursos forestales en estas zonas.

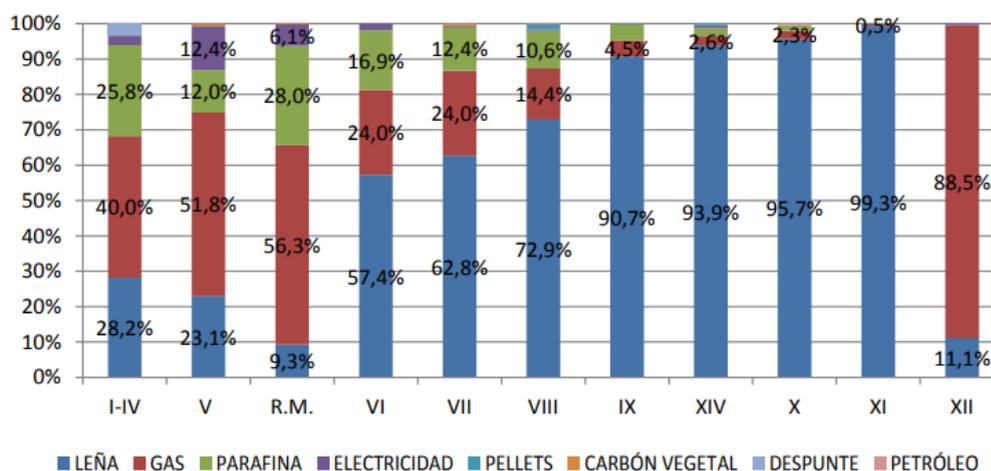


Figura 8: Tipo de combustible principal usado para calefacción en el hogar por región (Porcentaje)

### 3.4.2. BOSCA Spirit 380

Para el presente trabajo de título y en el marco del proyecto FONDEF IDEA adjudicado, se trabajó con dos empresas externas, de las cuales Bosques del norte proporcionó la leña a combustionar y BOSCA facilitó una de sus estufas más comercializadas en el mercado, dichas especificaciones se encuentran resumidas en la tabla 5:

Tabla 5: Tabla de especificaciones técnicas de la estufa Spirit 380 [24]

Características	SPIRIT 380
Potencia	10,8kW = 9.88 Kcal/h
Eficiencia	68 %
Rango de calefacción	Hasta 180 m <sup>2</sup>
Dimensiones	84,2 x 54,6 x 56,5 cm
Peso	87,2 kg
Diámetro del cañón	6"

Cabe señalar que esta estufa cuenta con la tecnología de combustión lenta con doble cámara.

### 3.5. Medios Porosos Inertes

Un Medio Poroso Inerte (MPI) es un material sólido similar a una esponja que, al poseer poros permitirá que un fluido pase a través de estos, intensificando el proceso de mezclado

del aire-combustible manteniendo la combustión en estos poros. Una característica no menor en estos materiales es la porosidad (se mide en [ppi] que significa poros por pulgada), por ejemplo un material con baja porosidad posee mayor conductividad térmica debido a que tiene mayor superficie sólida en contacto y también una buena convección, sin embargo una pobre radiación al tener menor superficie de contacto. Cuando se trabaja con un medio alta porosidad ocurrirá lo inverso, es decir, baja conductividad térmica y alta radiación .

Además de depender de la porosidad, un MPI adecuado para asegurar una buena transferencia de calor es aquel que presenta alta conductividad térmica, emisividad y coeficiente lineal de expansión térmica, estos son fabricados de cerámicas ya que pueden soportar altas temperaturas de operación y los materiales más comunes son la Alúmina (*SiC*), Carburo de Silicio ( $Al_2O_3$ ) y Dióxido de Zirconio ( $ZrO_2$ ).

En la tabla 6 se pueden apreciar las propiedades térmicas más relevantes en los medios porosos inertes, así como también su valor o rango dependiendo el tipo de cerámica utilizada.

Tabla 6: Propiedades térmicas de materiales más utilizados para medios porosos inertes

Propiedad	$Al_2O_3$	SiC	$ZrO_2$
Temperatura máxima de uso en aire [ $^{\circ}C$ ]	1900	1600	2300
Conductividad térmica a los $1000^{\circ}C$ [ $Wm^{-1} K^{-1}$ ]	5-6	20-50	2-4
Emisividad total a los 2000K [-]	0,28	0,9	0,31
Coficiente lineal térmico de expansión [ $10^{-6} K^{-1}$ ]	8	4-5	10-13

### 3.5.1. Combustión dentro de un Medio poroso inerte (MPI)

Para comprender de mejor forma el proceso de combustión dentro de un MPI se debe tener claro dos conceptos; El primero de ellos es el de "llama adiabática", que es definido como la temperatura teórica obtenida si todo el calor liberado por la reacción es utilizado para alcanzar la máxima temperatura de los productos de combustión; El segundo término se conoce como "exceso de entalpía", describe el proceso en donde la llama producida en la zona de combustión precalentará a los reactantes mediante convección, y debido a esta recirculación permitirá que en la entrada de la zona de combustión se igualen o superen la temperatura de llama adiabática.

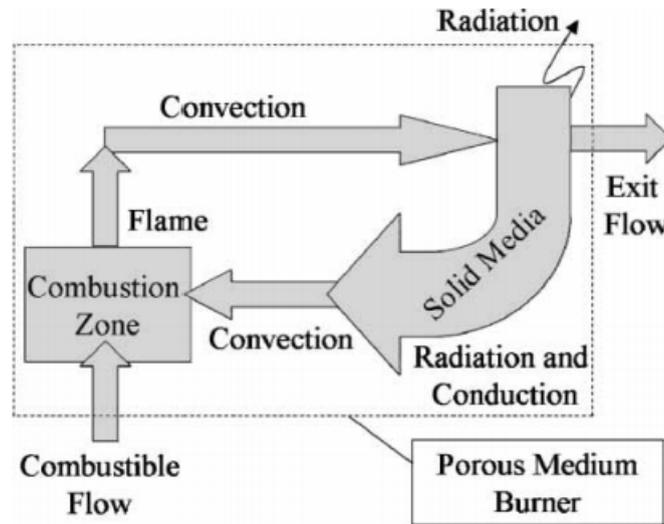


Figura 9: Teoría de llama con exceso de entalpía [17]

La figura 9 ilustra dicho concepto de exceso de entalpía y mecanismo de transferencia de calor, en el que la llama producida de la zona de combustión calienta convectivamente el medio sólido que, a su vez, transfiere el calor por conducción y radiación a la región aguas arriba de la llama para precalentar la mezcla de entrada. El calor recirculado desde la zona posterior a la llama resulta en temperaturas superadiabáticas locales que mantienen una mayor velocidad de reacción. Por lo tanto, las mezclas pobres de combustible - aire y los combustibles de bajo contenido térmico pueden ser quemados y sus límites de estabilidad se amplían al retener adiabáticamente todo el calor reciclado. Además de esta operación adiabática, una parte importante del calor puede irradiarse al entorno para el funcionamiento radiante del MPI.

### 3.5.2. Ventajas en el uso del MPI en combustión

El empleo principal de un medio poroso inerte es su capacidad de mejorar considerablemente todos los mecanismos de transferencia de calor conocidos, es decir tanto conducción, convección y radiación, aumentando así su eficiencia total gracias a que los MPI:

1. Maximizan el contacto físico con el combustible sólido, aumentando así la transferencia de calor y logrando que se establezca una combustión a mayor temperatura.
2. Pre-calienta el aire primario requerido en la combustión, provocando que los gases de escape producidos en el proceso de desvolatilización, se mezclen más fácilmente con el aire al reaccionar dentro de los poros del MPI.

## 4. Políticas y Normativa

La normativa tanto internacional como nacional en cuanto a artefactos de combustión residencial, coincide en que el factor clave a la hora de certificar estos equipos recae en las emisiones emitidas por dicho artefacto, es decir, puede existir diversos diseños de distintas geometrías posibles pero las emisiones que generan deben cumplir rangos admisibles de acuerdo a la potencia nominal generada, las cuales se explicarán a continuación.

### 4.1. Material particulado

Para efectos regulatorios, el material particulado se clasifica según su diámetro aerodinámico (en micrones [ $\mu m$ ]), debido a que el tamaño de las partículas es la variable crítica que determina la probabilidad y el lugar de decantación en el tracto respiratorio. Además cabe señalar que las normativas analizadas tienden a analizar el comportamiento de concentración de masa de material particulado en el tiempo, en unidades de [g/h] en la mayoría de los casos y, a raíz de estas concentraciones se determinará si el artefacto de combustión residencial es apto según la normativa analizada.

#### 4.1.1. Política nacional

En lo que respecta a la normativa que establece las cantidades máximas de material particulado respirable (MP<sub>2,5</sub> y MP<sub>10</sub>), existen los Decretos supremos N° 12 y 59 respectivamente, que tienen por objetivo fijar los niveles máximos diarios y anuales de MP suspendido en la atmósfera. Sin embargo, la metodología utilizada para cada uno de estos decretos establece una integral considerando el tamaño de todas las partículas hasta el establecido por la norma, es decir, DS59 considera todas las partículas menores a  $10\mu m$  y el DS12 por su parte, considera todas las partículas menores a  $2,5\mu m$ . Producto de lo anterior, es claro notar que la norma aplicable para MP<sub>2,5</sub> considera un espectro muy amplio de partículas en relación a las generadas por la combustión de leña, por lo mismo se cree necesario también una norma que establezca límites al material particulado ultrafino ( $< 1\mu m$ ) debido a las consecuencias que tiene para la salud de las personas.

Además, se implementa límites de concentración escalonados y descendentes en el tiempo: desde el año 2012, con  $25 \mu g/m^3$  como concentración anual y  $63 \mu g/m^3$  como concentración diaria; desde el año 2022 con  $20 \mu g/m^3$  como concentración anual y  $50 \mu g/m^3$  como concentración diaria, y desde el año 2032 con  $10 \mu g/m^3$  como concentración anual y  $25 \mu g/m^3$  como concentración diaria. [19][21]

Por otro lado, existe el Decreto Supremo N° 46 que establece límites al MP emitido por los artefactos que combustionan o puedan combustionar leña y pellet de madera dependiendo de su potencia térmica nominal.

Tabla 7: Límites de emisión establecido por DS 46[20]

Potencia Térmica Nominal [kW]	Emisión de MP [g/h]
Menor o igual a 8	2,5
Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5
Mayor que 14 y menor o igual a 25	4,5

#### 4.1.2. Política internacional (EPA)

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA en su sigla en inglés) es la agencia federal de los Estados Unidos responsable de supervisar las normas de emisión y el programa de certificación de las estufas de madera y pellets. Dicha agencia fue fundada a mediados de la década de 1980, culminando inicialmente una normativa denominada New Source Performance Standards (NSPS) el 26 de febrero de 1988 [14]. Para dicho año se establece un límite de 7,5[gr/h] para artefactos de combustión residencial, este límite es modificado para el año 2015 permitiendo un límite de 4,5[g/h] de material particulado emitido y, finalmente el 15 de mayo de 2020, entra el llamado "Paso 2" (step 2) de las directrices de emisiones establecidas por la EPA que señala que, los artefactos de combustión residencial (estufas de combustión simple, doble, de aire forzado y pellets, etc) fabricadas a partir del 15 de mayo de 2020 no deben emitir más de 2,0 g/h de partículas para obtener la certificación de la EPA.

Esta última modificación es para certificar a los nuevos artefactos que son comercializados a partir del año 2020 y que deben cumplir con dicha normativa, es decir que si un usuario tiene una estufa de leña o pellets, una chimenea, una caldera de leña u otro aparato de calefacción de leña que fue adquirido antes del 2020, puede seguir utilizándola.

Tabla 8: Resumen por año de la regulación por la EPA de material particulado emitido por artefactos de combustión residencial [14]

Año de regulación	Límite máximo de emisión de MP [g/h]
1988	7,5
2015	4,5
2020	2,0

Cabe señalar que es importante contar con la certificación de la EPA para comercializar estos artefactos de combustión, ya que, de caso contrario el vendedor estaría cometiendo un delito al vender dicho producto no certificado.

#### 4.2. Política internacional (EUROPA) para emisiones de gases de combustión de artefactos de combustión residencial

Actualmente en Chile no se tiene una regulación específica para emisiones producto de la quema de leña en artefactos de combustión residencial, sino que existe regulación para el conjunto de: equipos; vehículos; empresas; y artefactos de combustión.

La política Europea que se mencionarán en este apartado es parte del reglamento Eco-diseño 2020 [18] para calefactores residenciales con potencia térmica inferior a 50 kW, y estipula que los equipos fabricados en el continente (o que se instalen en territorio Europeo) deben cumplir unos requisitos mínimos. Estos están relacionados con la eficiencia energética y emisiones de partícula en el ambiente, así como monóxido de carbono y otros compuestos orgánicos.

Hay que tener en cuenta que el objetivo de estos reglamento no es otro que fomentar el uso de combustibles de origen renovable. Con estas normas se debe conseguir llegar a los mínimos marcados por los objetivos de eficiencia energética y ahorro de emisiones de la UE.

Por lo tanto, la implantación de todas estas normas es más que necesaria. Especialmente, en el contexto actual donde el planeta nos avisa del peligro que supone no apostar por políticas sostenibles.

Tabla 9: Valores límite de emisión y eficiencia para equipos en terreno Europeo [18]

Equipo	Valores a cumplir*				
	Eficiencia energética (%)	Partículas **	OGC (mg/Nm <sup>3</sup> )	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NOx [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Abierto	≥30	≤ 50 mg/Nm <sup>3</sup> ≤ 6 g/kg	≤120	≤ 2000	
Cerrado (estufa)	≥65	≤ 40 mg/Nm <sup>3</sup> (HF) ≤ 5 g/kg (DT) ≤ 2,4 g/kg para Biomasa ≤ 5 g/kg fósiles (UK)	≤120	≤ 1500	≤ 200 para biomasa y ≤ 300 para combustibles
Cerrado (Pellet)	≥79	≤ 20 mg/Nm <sup>3</sup> (HF) ≤ 2,5 g/kg para Biomasa (DT) ≤ 1,2 g/kg (UK)	≤60	≤ 300	sólidos fósiles
Cocinas	≥65	40 mg/Nm <sup>3</sup> (HF) ≤ 5 g/kg (DT) ≤ 2,4 g/kg para Biomasa ≤5 g/kg para fósiles (UK)	≤120	≤ 1500	

### 4.3. Políticas para certificación de leña

Si bien las políticas de emisión anteriormente mencionadas parecen ser dependientes de el diseño de la estufa, el factor más importante a la hora de analizar emisiones es el combustible a utilizar, es decir las características de la leña usada para el artefacto de combustión. En capítulos anteriores se menciona de la buena práctica y lo positivo de utilizar leña certificada, dicha certificación se rige a partir del Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL) y sus principales reglamentos son[23]:

1. Estar constituido legalmente como comerciante de leña, es decir, poseer un giro acorde a la actividad en el Servicio de Impuestos Internos. Se entiende por comerciante final de Leña a toda aquella persona que vende el producto al consumidor, a excepción de minimarkets, cadenas de retails y supermercados.
2. Cumplir con la legislación aplicable según CONAF.
3. Que la leña provenga de predios (conocido también como fundo o finca) con planes de manejo aprobados y bien ejecutados según lo autorice y acredite CONAF.
4. Contar con un plan de secado que permita la venta de leña bajo el 25 %.
5. cumplir con lo establecido en la ley del consumidor.
6. Además, el comerciante debe someterse a los monitoreos permanentes que realiza el personal técnico de la Secretaría Técnica Local o un auditor acreditado por el SNCL.

Para analizar en más detalle cada uno de estos reglamentos se recomienda ir directamente a la página de certificación de SNCL[23].

#### 4.3.1. Proyecto de ley regulación de Biocombustibles sólidos

En paralelo con lo descrito anteriormente para obtener la certificación de leña, actualmente en Chile existe un proyecto de ley en tramitación (actualmente en Segundo trámite

constitucional) que busca regular la compra/venta de biocombustibles sólidos, es decir, aquellos combustibles elaborados a partir de biomasa de origen leñoso o no leñoso, tales como: leña, pellets, carbón vegetal, briquetas y astillas, entre otros. Dicho proyecto de ley indica modificaciones a una serie de cuerpos normativos de forma de establecer un reconocimiento formal de los biocombustibles sólidos como fuente de energía, además de la electricidad y carbón ya consideradas en los reglamentos y decretos. Esto conlleva a especificaciones técnicas mínimas de calidad y métrica que serán exigidas para la comercialización de estos biocombustibles a nivel nacional, y que favorecerá a disminuir y eliminar el comercio ilegal de leña no certificada.

## 5. Diseño Experimental

Para trabajos anteriores, el entorno habitual donde estaba montado tanto el túnel de dilución como el tren de muestreo de material particulado fue el Laboratorio de Termofluidos de Casa Central-UTFSM, para el caso del presente trabajo se decide desmontar y trasladar dicho montaje a la sede de viña del mar JMC-UTFSM específicamente en el Laboratorio de Energías Renovables (LER).

Antes del montaje propiamente tal en el Laboratorio de Energías Renovables de la sede JMC, se procede a limpiar en profundidad cada uno de los ductos y la estufa, además también se realizó una mantención al ventilador del túnel de dilución, esto con objetivo de no que no hayan interferencias en las mediciones. Finalmente, el túnel queda instalado tomando como base las normativas CH-5G y CH-28 [16]

### 5.1. Túnel de dilución

La función principal del túnel de dilución, es mezclar con aire ambiente el flujo de humos proveniente de la chimenea de escape producto de la combustión de la leña en la estufa. Para cuando se requiera medir material particulado el túnel, además de diluir, otorgará una condición de flujo isocinético, es decir, que la velocidad del flujo succionado será igual a la velocidad dentro del túnel, con esto se logrará que no exista separación mecánica de partículas que pudiera intervenir en la toma de muestras, y además asegura que exista la misma concentración de partículas en el flujo succionado y dentro del túnel.

La velocidad de succión, el tiraje y así como otros parámetros están determinados por el tablero de control electrónico, que nos permitirá controlar estas variables cuando se requiera medir material particulado.

Para el presente trabajo sólo se usará el túnel de dilución para diluir el flujo de humos proveniente de la combustión de leña.

1. **Chimenea de gases de escape:** Conectado a la estufa, de acero inoxidable, con dos secciones una de 0,15 m de diámetro, aislada con relleno sólido hasta alcanzar los 0,23 m de diámetro, cubriendo gran parte del ducto. En una de las secciones de menor diámetro posee un orificio, el cual cumple como función ser puerto de muestreo para la sonda de presión estática en el ducto primario.
2. **Campana:** Pieza hecha de acero inoxidable con un diámetro mínimo en su extremo ancho de 0,3 m, un acoplamiento estándar de 0,15 m para conectarse a los tubos en el extremo angosto.
3. **Codos y deflectores:** Un total de 4 codos de acero inoxidable de 90°, de 0,15 m de diámetro para conectar el ducto mezclador y ductos estándar rectos.
4. **Ducto recto:** Ducto de acero inoxidable, de 0,15 m de diámetro y de 2,74 m de largo, el cual cumple la función de proporcionar la sección de muestreo del sistema de dilución. Este ducto debe estar instalado al menos a 1,2 m corriente abajo del codo. Posee dos orificios, los cuales son puertos de muestreo, en ellos van instalados el tubo Pitot tipo S y el tren de termocuplas. Además 1,2 m más abajo se encuentra otro puerto de muestreo el cual es ocupado por la sonda de muestreo.

5. **Ventilador:** Ventilador con la capacidad para extraer gas desde un túnel de dilución con el flujo suficiente para mantener la velocidad de dilución y llevar los gases de combustión a la atmósfera

#### 5.1.1. Montaje Túnel de dilución



Figura 10: Entorno de pruebas, vista general del túnel de dilución montado en Sede JMC, UTFSM

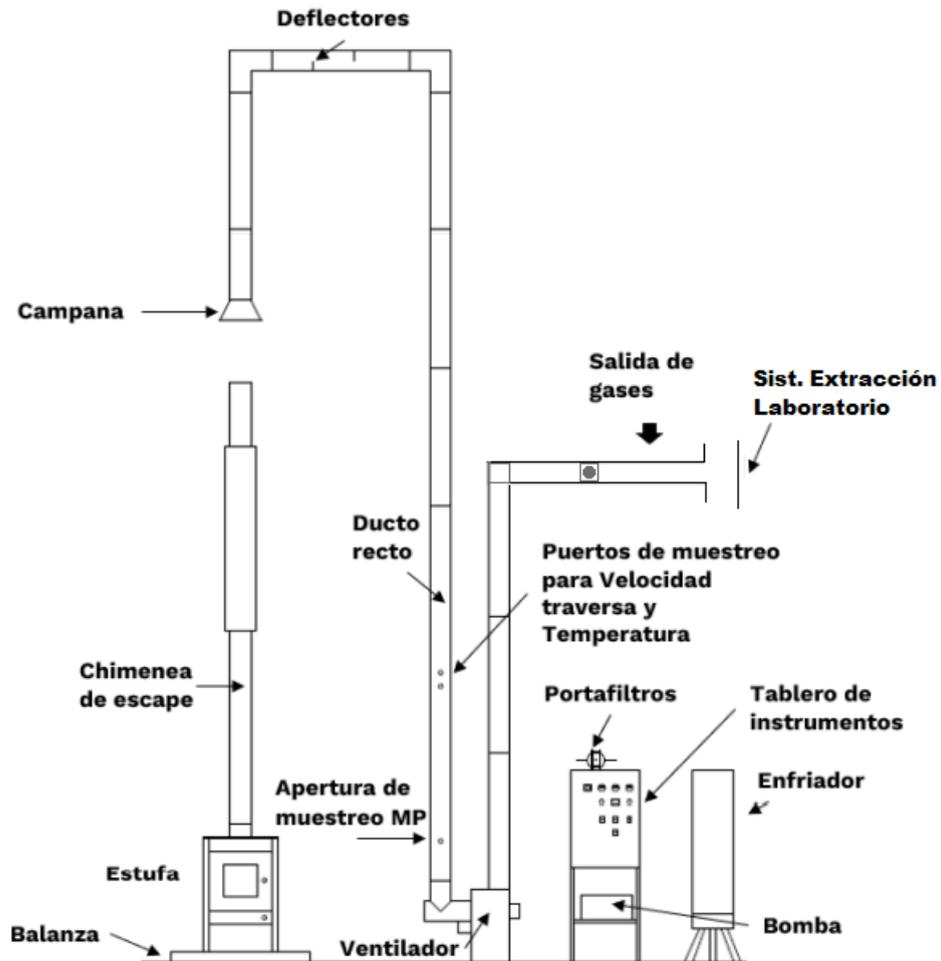


Figura 11: Esquema vista frontal del túnel de dilución

## 5.2. Equipos externos

1. Balanza KERN: Balanza que cumplirá la función de mostrar el decaimiento de masa de leña en la estufa a lo largo del ensayo. MODELO KERN IFB300K-2, Peso máximo admitido: 300[kg]



Figura 12: Balanza KERN utilizada en el experimento

2. Medidor de humedad TESTO 606-2: Cumplirá la función de medir humedad a los leños que se usarán para combustionar en cada ensayo.



Figura 13: Medidor de humedad TESTO 606-2

3. Analizador de gases TESTO 350:



Figura 14: Analizador de gases Testo 350

Este equipo está diseñado para el análisis de combustión y medición de emisiones contaminantes para diversos combustibles seleccionables, además se compone de dos unidades que le permiten llevar a cabo su función:

- **Unidad de Control Testo 350:** Posee pantalla gráfica y también es el elemento que sirve para controlar el analizador. Su manejo permite elegir el tipo de aplicación (quemador, turbina de gas, motores y aplicaciones personalizables por el usuario) y por otro lado, puede controlar a distancia la caja analizadora [26].
- **Caja Analizadora Testo 350:** Contiene todos los sensores y electrónica necesaria para la determinación de gases producto de la combustión. Posee un sensor de gas  $O_2$  como base, pero requiere la conexión de al menos un sensor más para su funcionamiento. Los demás gases que pueden medirse mediante la instalación de sensores opcionales son el  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  o  $C_xH_y$ . Para medir altas concentraciones de gas se permite la ampliación del rango de medición (dilución) para proteger los sensores[26].

### 5.3. Diseño propuesto de calefacción residencial

Con los beneficios que traen los medios porosos inertes en aumentar tanto temperaturas como en favorecer la mezcla aire-combustible resulta interesante comprobar su funcionamiento dentro de la cámara de la estufa y como se comportarán las temperaturas al interior de ésta al tener inserto un medio poroso. Anteriormente se han realizado trabajos de título buscando en cual lugar de la estufa ubicar el medio poroso para generar menos emisiones, la ubicación donde menos contaminantes se producía según dicho trabajo es alrededor de la parte baja de la cámara de combustión de la estufa [6].

A continuación se presentan en las figuras 15 y 16 dos esquemas y fotografías en terreno del experimento línea base y del experimento a comparar con éste utilizando medio poroso.

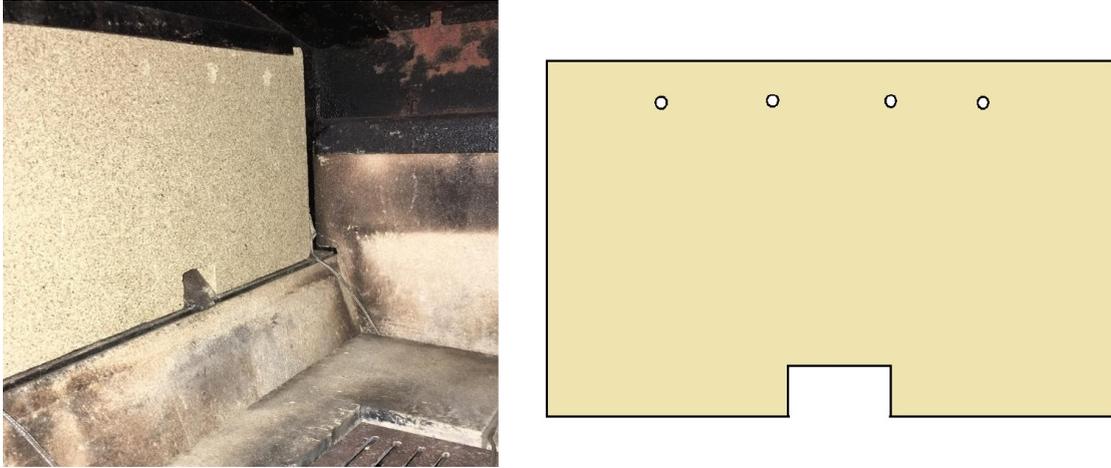


Figura 15: Fotografía y esquema de pared lateral de vermiculita al interior de la cámara de combustión, correspondiente a los ensayos de línea base

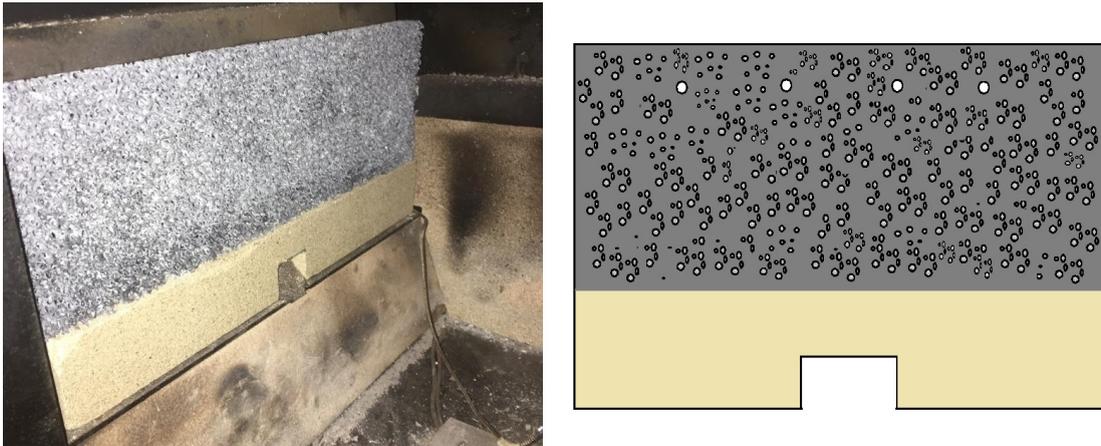


Figura 16: Fotografía y esquema de pared lateral del conjunto vermiculita y medio poroso al interior de la cámara de combustión

Las especificaciones del medio poroso utilizado en la figura 16 son:

- Material: SiSiC
- Porosidad: 80 %
- Poros por pulgada: 10-15ppi
- Espesor: 2cm

Siguiendo la lógica para favorecer la mezcla aire-combustible de mejor manera, se sugiere utilizar medio poroso en la parte alta de las paredes laterales de la estufa como se puede

apreciar en la figura 16, esto con el fin de aprovechar las entradas de aire secundario que posee ésta y comprobar si se logran mayores temperaturas.

## 6. Desarrollo Experimental

A continuación se presentan los pasos a seguir del experimento, el cual consta de una línea base que vendrá dada por la estufa BOSCA Spirit 380 sin modificaciones en su cámara de combustión como se menciona anteriormente, esta línea base será comparada con la modificación de sus paredes laterales como es mostrada en la figura 16. Para cada uno de los ensayos se tendrá un registro de masa, temperaturas internas de la cámara de combustión y se analizarán estos datos para corroborar el funcionamiento de los medios porosos inertes dentro de la estufa.

### 6.1. Metodología para monitoreo de temperaturas internas

Se procede a intervenir las paredes de vermiculita mediante perforaciones en su parte superior y canales como se puede apreciar en la figura 17, esto con el objetivo de insertar dentro de la vermiculita las termocuplas tipo K para conocer la distribución de temperaturas que existe en las paredes de ésta. La vermiculita es un material sencillo de intervenir por lo que estos canales se hicieron debastando con herramientas filosas y las perforaciones realizadas fueron hechas con taladro de banco.



Figura 17: Intervención de vermiculita mediante canales y perforaciones, las flechas indica el lugar donde se perfora y posiciona la termocupla dentro de la vermiculita

Una de las mejoras que se hizo a las termocuplas ocupadas fue fundir los polos negativos y positivos de éstas mediante un equipo de soldadura adecuadas para este proceso, esto con objetivo de que la señal que entrega la termocupla al data-logger sea mas precisa. Cabe señalar que las termocuplas tipo K tienen un polo positivo de aleación de Níquel-cromo y de polo negativo de Níquel-aluminio. Para cuando se quiera trabajar con el conjunto vermiculita-MPI se usará este mismo montaje de termocuplas pero se insertarán dentro del medio poroso mismo.

A continuación en las figuras 18 y 19 se aprecian los dos montajes de termocuplas que se utilizaron para obtener los datos de este trabajo, la idea fue de distribuir estas termocuplas

contenidas en las vermiculitas o mpi de manera tal que captaran la temperatura en la mayor superficie posible de cámara interna de la estufa.



Figura 18: Disposición termocuplas para ensayo linea base

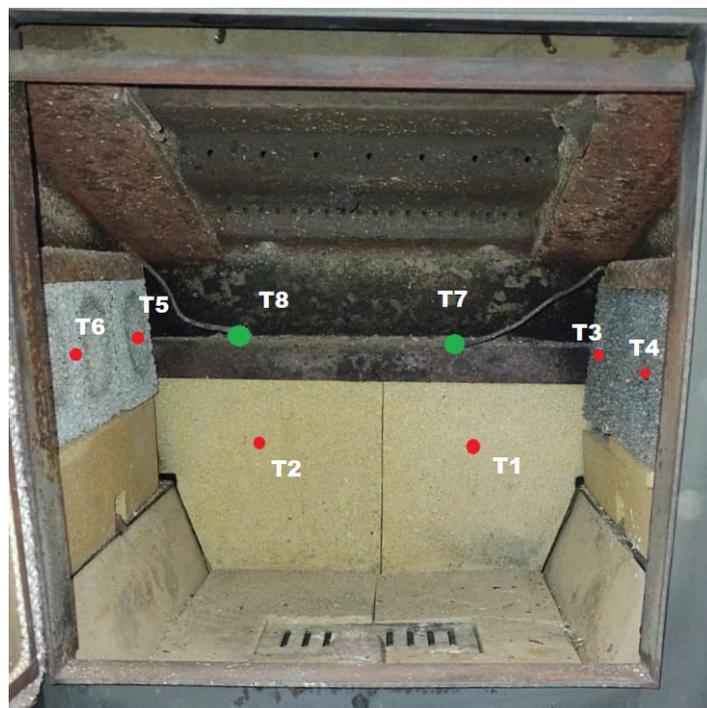


Figura 19: Disposición termocuplas para ensayo con MPI

Además de registrar las temperaturas que se alcanzarán dentro de la vermiculita y próximamente en el medio poroso inerte, se registrarán las temperaturas que se obtienen en los gases de combustión dentro de la estufa gracias a las termocuplas T7 y T8 que estarán en contacto con los gases de combustión y el fuego mismo como es apreciable en las figuras 18 y 19.

## 6.2. Precauciones a tomar antes del ensayo

- Tener previamente montadas las paredes de vermiculita o conjunto MPI-vermiculita (dependiendo si experimento es línea base o diseño propuesto) con sus termocuplas insertas dentro de éstas como fue explicado anteriormente.
- Mantener en suspensión la estufa gracias al sistema de izaje de gata hidráulica, es importante tener la estufa en suspensión mientras se hacen los trabajos de montaje.
- Conocer con anterioridad la masa de la carga a utilizar y además la humedad de los leños utilizados en dicha carga para el ensayo propiamente tal. Se recomienda registrar humedad en distintas partes del leño.
- Comprobar estado de termocuplas y conexiones de data loggers a utilizar. Corroborar de igual forma que el PC siempre esté conectado a la corriente.
- Conectar adquisidores de datos a puertos USB del PC, verificar la correcta conexión con el equipo (indicador led verde) e iniciar software asociado (“Personal Daq View” para OMEGA DAQ-56 o, “DAQ Central” para OMEGA USB 2401). Para el correcto almacenamiento de datos, crear carpetas según protocolo almacenado en carpeta FONDEF en el PC.
- Encender equipo TESTO 350 y mantenerlo energizado a la corriente.
- Diagnosticar sensores de medición del TESTO 350 así como también configurar los parámetros de:
  1. Tipo de combustible: Biomasa
  2. Método de medición: PdC (sólo gases de combustión)
  3. Dilución: x5
- Se debe regular el ventilador al máximo para disminuir las temperaturas en el túnel de dilución.
- Iniciar Software “Easy Emission” del analizador de gases TESTO 350 y comenzar registro en condiciones ambientales (previo al ingreso de la sonda al punto de muestreo en ducto).

## 6.3. Metodología para combustión

1. Se debe de cargar la estufa utilizando una cama de hojarasca, cartón y ramas y por sobre éstas colocar los leños formando una torre. Es importante conocer la masa de toda la carga puesta dentro de la estufa

2. Dar inicio a todos los sistemas de muestreo (Software de registro de masa, temperatura y concentración de gases) o bien tenerlos encendidos con anterioridad siempre y cuando se tenga clara la hora en cual se empieza el ensayo.
3. Se comienza a bajar la estufa gracias al sistema de izaje y dejar aproximadamente 1 minuto registrando el peso que corresponderá a la masa del conjunto estufa-chimenea-carga. A partir de este momento tener cuidado de no apoyar ni dejar objetos encima de la estufa y/o balanza debido a que alterarían la medición.
4. Antes de encender el fuego percatarse que la apertura de aire primario esté en su nivel máximo (E), luego comenzar a encender la carga de la estufa y registrar este tiempo.
5. Al momento en el que el fuego se esté activando y se haya cerrado la compuerta de la estufa, dejar 5 minutos en el nivel de Encendido (E) y pasado este tiempo bajar al nivel mínimo de entrada de aire (-), guiarse con la figura 20. Tener cuidado al realizar este cambio ya que podría afectar a la medición de masa.

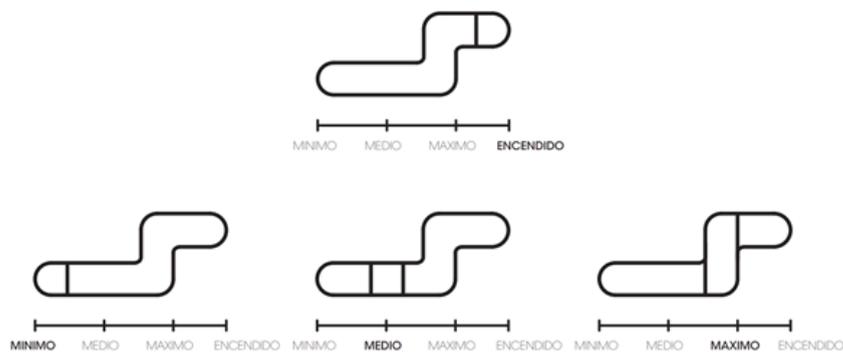


Figura 20: Niveles de regulación de aire primario que posee la estufa BOSCA Spirit 380

6. Ingresar sonda de medición de gases del TESTO 350 en el orificio de muestreo del túnel de dilución y dejar midiendo continuamente.
7. Verificar durante todo el proceso que los valores de temperatura, concentración de gases y masa sean coherentes a medida que se va consumiendo la leña. Registrar en bitácora el tiempo en que ocurra algún evento. Por ejemplo, apertura de puerta, variación en el ingreso de aire, modificación de algún parámetro, algún error en los registros de temperatura, gases o masa, etc
8. Dar fin al ensayo al momento que solo quede carbón residual y no exista llama visible, dejar aparte la carga remanente y enfriando y cuando baje su temperatura registrar dicha masa.
9. Finalmente junto con limpiar la cámara de combustión misma de la estufa, dejar el ventilador del túnel de dilución funcionando aproximadamente 30 minutos para limpiarlo de impurezas que pudieron quedar del ensayo.

## 7. Resultados Experimentales

Se realizaron un total de 5 experimentos de los cuales 3 correspondieron a línea base y 2 para el prototipo de estufa con medio poroso integrado a su cámara de combustión, para el análisis mostrado a continuación se escogieron aquellos experimentos más similares en cuanto a las cargas utilizadas ya que, según se analizaron en las experiencias un factor relevante en cuanto a las temperaturas alcanzadas dentro de la cámara depende notoriamente de la carga ingresada a la estufa misma.

De igual manera mencionar que la leña certificada utilizada fue cortada con hacha de mano de forma longitudinal para obtener especies de “lingotes” de leña que logran combustionar de manera más eficiente.

### 7.1. Temperaturas internas de la estufa

A continuación se presentan los resultados de temperaturas a lo largo de la quema de leña para, cabe señalar que tanto para los ensayos de línea base como de diseño propuesto se utilizó una carga muy similar de leña, la cual corresponde a 2,226 y 2,222 [kg] para los ensayos línea base y diseño propuesto respectivamente. Para estos ensayos se eliminó los datos de temperaturas registradas por la termocupla T1 ya que estos presentaban discordancia y no eran representativos.

#### 7.1.1. Línea base

La línea base que será nuestro parámetro de comparación para el diseño propuesto de estufa, constará de la estufa BOSCA spirit 380 tal cual se vende en el mercado, la única acotación que se podría diferenciar fue que se le quitaron unas paredes de seguridad externas debido al montaje de termocuplas alrededor de ésta. La carga utilizada para este ensayo fue de 2,226[kg] como se mencionó anteriormente y con una humedad promedio de 17 %.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos a partir de los datos registrados por los adquisidores de datos:

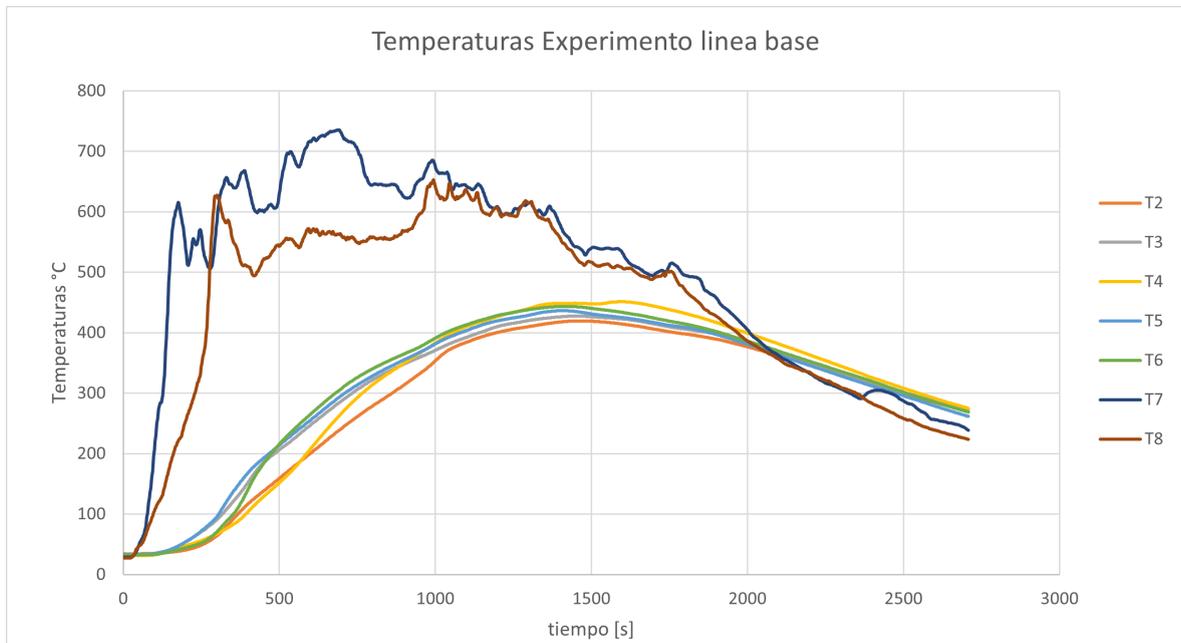


Figura 21: Temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión de la estufa BOSCA Spirit 380 a lo largo del tiempo para ensayo de Línea base

Tabla 10: Temperaturas máximas obtenidas para cada una de las termocupas del ensayo línea base

	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Tmax °C	419,47	427,61	451,40	436,45	443,51	735,35	653,20

Se puede apreciar en cada uno de los ensayos de Línea Base(LB) como el mostrado en la figura 21 que se genera un peak muy notorio en los primeros 300 segundos aproximadamente, este peak es más notorio para las termocupas de gases (T7 y T8) ya que se encuentran enfrentando la combustión misma dentro de la estufa, donde este aumento corresponderá al fuego generado en el encendido y según se explicó en el capítulo 3 de "Fases de quemado de leña" es debido a la fase a la cual el material volátil se está oxidando producto de las altas temperaturas que se está sometiendo la carga de leña, generando un cuerpo de llama muy extenso y alto alrededor de la cámara de combustión.

Este peak para las termocupas de gases comienza a decaer aproximadamente a los 1000[s], pero no así para las termocupas dispuestas dentro de la vermiculita, esto se puede explicar debido a que el cuerpo de llama va disminuyendo al liberar el material volátil contenido en la carga de leña y se empieza a concentrar más al centro de la cámara de combustión de la estufa, por ende la transferencia de calor que perciben las termocupas de gases irá disminuyendo al recibir menor calor por convección y conducción, pero recibiendo más por radiación. En cambio, las temperaturas correspondientes a las termocupas de pared (T2, T3, T4, T5 y T6) seguirán aumentando hasta aproximadamente los 1500[s], debido a que el cuerpo de llama sigue cercano a estas paredes y por ende, transfiriendo calor en todas las maneras posibles.

Finalmente, pasado el tiempo 1500[s] es evidenciable que todas las termocuplas empiecen a disminuir su temperatura ya que el cuerpo de llama comienza a disminuir al extraer gran parte del material volátil dispuesto en la carga de leña y donde la misma carga de leña comenzará a evidenciar en su mayoría el quemado del carbón residual con su resplandor superficial y con pequeñas llamas correspondiente a los últimas liberaciones de material volátil.

### 7.1.2. Diseño propuesto con MPI

Cómo se dijo anteriormente, la disposición de termocuplas dentro de la cámara de combustión será la misma que para línea base pero esta vez las termocuplas de pared (a excepción de T2 ubicada en la espalda de la cámara) serán reubicadas e insertas dentro de los medios porosos, pero siguiendo el mismo orden para facilitar su comparación. La masa de carga de leña utilizada para este ensayo fue de 2,222[kg] con una humedad relativa promedio de 14.5 %

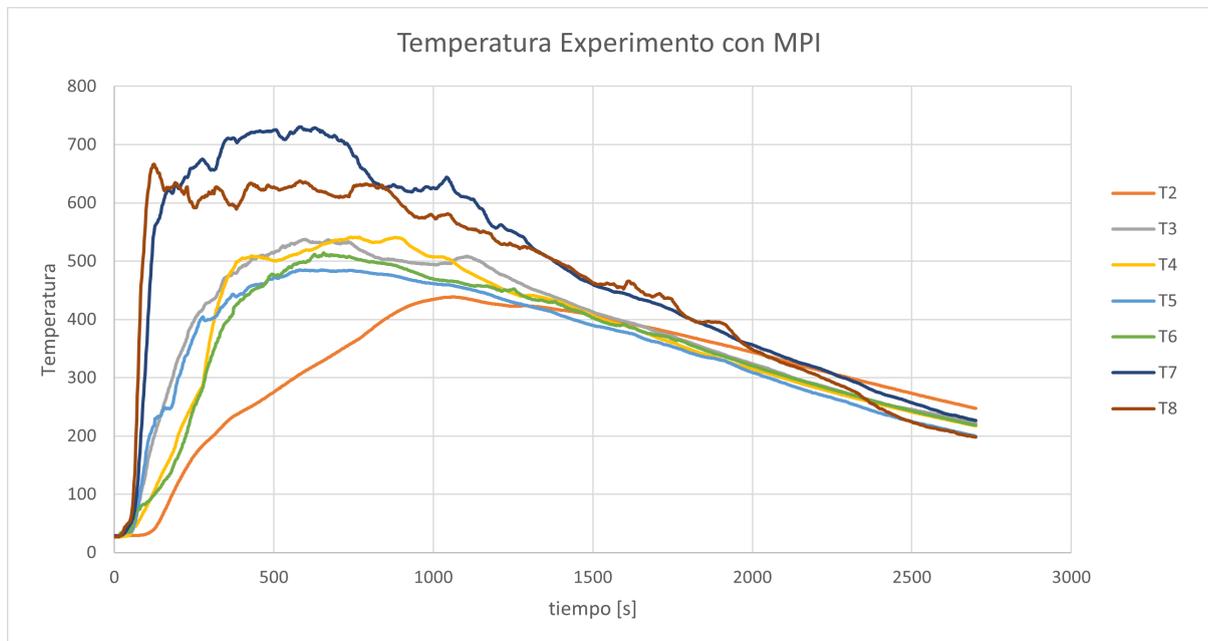


Figura 22: Temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión de la estufa BOSCA Spirit 380 a lo largo del tiempo para ensayo de diseño propuesto con MPI

Tabla 11: Temperaturas máximas obtenidas para cada una de las termocuplas del ensayo con medio poroso inserto en la estufa

	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Tmax °C	438,47	537,59	541,27	485,09	514,07	730,59	666,82

Para este caso, se observó que al igual que otras experiencias hechas con esta configuración de medio poroso inserto en la cámara, las termocuplas de gas presentan un comportamiento más regular y con una alza mucho más pronunciada en los primeros segundos del

experimento. Este comportamiento menos disperso en cuanto a las temperaturas captadas por las termocuplas de gases es asociado directamente a la presencia del medio poroso al hacer recircular mejor el flujo de aire que se está combustionando dentro de la cámara.

Lo más interesante que fue el reemplazar la vermiculita con el medio poroso se aprecia en como se desplazan hacia la izquierda todas las curvas correspondientes a las termocuplas de pared con MPI (T3,T4,T5 y T6), esto era esperable ya que la vermiculita funciona en gran parte como aislante térmico por ende la temperatura captada por la termocupla será menor.

Siguiendo la lógica del análisis de línea base, se aprecia que ahora tanto termocuplas de gas como las de pared de con MPI sufren un aumento considerable a sus inicios, y donde las temperaturas de pared con MPI obtienen mayores valores registrados de temperatura debido a la oxidación del material volátil contenido en la carga de leña, pero luego todo este conjunto empieza a decaer alrededor de los 1000[s], 500[s] antes en promedio de como se analizó en el caso de línea base. La termocupla 2 en este caso cumple un rol bastante interesante ya que se comporta de igual forma que el experimento de línea base ya que en teoría, esta no cambió de estar dentro de la vermiculita en la espalda de la cámara de combustión de la estufa.

Gracias a las tablas 10 y 11 podemos ver que para todas las temperaturas de pared se obtuvo un valor máximo mayor en el experimento con medio poroso inerte, para el caso de las temperaturas de gas no es tan notorio el cambio,

## 7.2. Análisis y comparaciones de promedios

Para intentar ir decantando los resultados de las termocuplas anteriormente mencionadas, y que sean más evidentes las conclusiones descritas se sacará un promedio para las termocuplas ubicadas en los gases, en la espalda de la estufa y finalmente para las paredes laterales de esta misma, donde se evidenciará de manera más sencilla el comportamiento del conjunto.

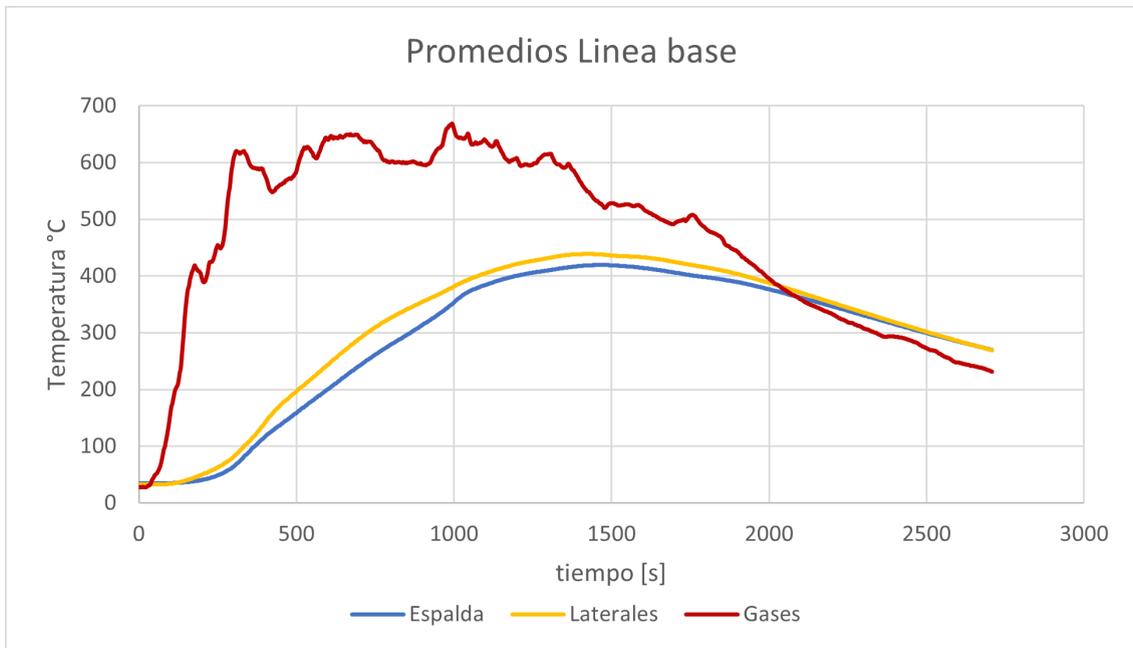


Figura 23: Promedios de termocuplas para Linea base

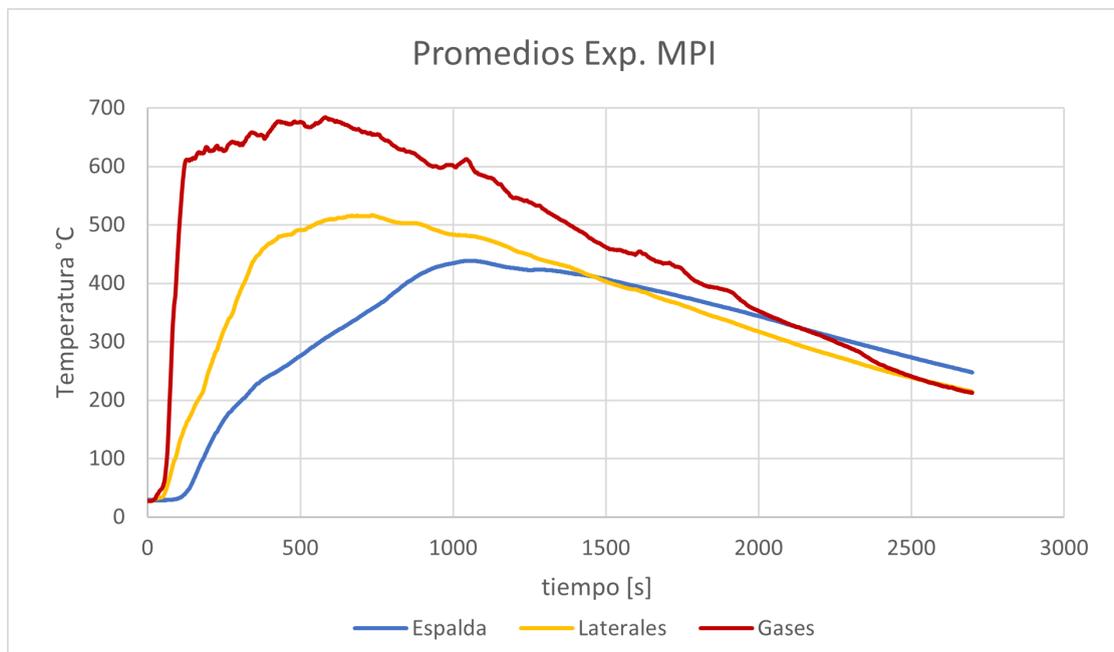


Figura 24: Promedios de temperaturas para diseño propuesto

En general en ambos gráficos presentados en las figuras 23 y 24 se reafirma lo descrito anteriormente, para el caso de línea base la curva correspondiente al promedio de temperaturas de gases es más dispersa que en el caso del experimento con medio poroso, pero ésta última al presentar un peak mucho mayor y más rápido que el visto en el caso de

línea base presenta una caída muy repentina de su temperatura desde los 500[s].

Para comparar cada una de estas curvas entre sí y ver sus diferencias con mayor claridad revisar el Anexo I. Para el caso del promedio de gases se evidencia que un poco antes de los 1000[s] la temperatura de gases para línea base supera al del experimento con medio poroso inerte, y luego presentan una diferencia constante hasta que el fuego se apaga. Esto se puede explicar netamente por la ausencia de vermiculita, ya que ésta logra retener el calor dentro de la cámara de la estufa en mayor tiempo y por ende mantiene el calor dentro de la estufa con mayor facilidad.

Tanto para los gráficos de las figuras 31 y 32 que están en el Anexo I se aprecia un comportamiento similar y en la cual también llegando a los 1500[s] la curva correspondiente a los promedios de línea base supera a los del ensayo con medio poroso

Esto nos indica que al parecer los medios porosos inertes calientan hasta el punto de oxidar la mayor cantidad de material volátil y, debido a su poca capacidad de aislante y de retener el calor como lo es la vermiculita, la temperatura dentro de la cámara empieza a decaer.

### **7.2.1. Análisis comparativo de temperaturas**

Debido al análisis global que se hizo anteriormente queda en evidencia que existe una diferencia comparable entre ambos experimentos, por ende se necesita un análisis más en profundidad para cada termocupla y en cada experimento.

A continuación se presentan gráficos comparativos en la figura 25 de las termocuplas de pared laterales correspondientes a T3, T4, T5 y T6 que irán rotando entre estar en vermiculita o en el MPI, dentro de la figura 25 los gráficos están ordenadas de tal forma que respetan la disposición de termocuplas que se ve en la figura 18 o 19, además de añadir color a las curvas para diferenciar tanto si se trata del ensayo de línea base o de la estufa prototipo.

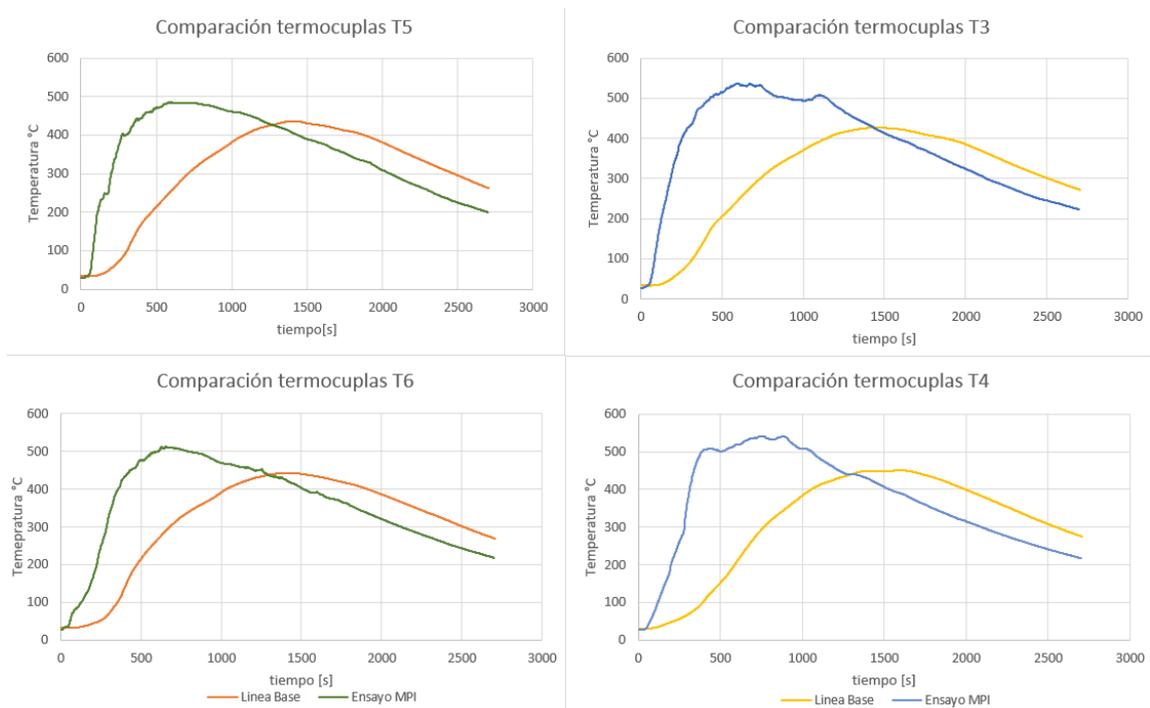


Figura 25: Comparación termocuplas de pared laterales dentro de la estufa, diferenciando entre línea base y ensayo con medio poroso inerte

Este tipo de análisis nos muestra de manera más certera como se comportan las temperaturas en cada porción de pared analizada, donde se puede apreciar notoriamente que el medio poroso ayuda desde un inicio a alcanzar un peak de temperatura mayor al alcanzado con solo vermiculita, la única desventaja de esto es que como se ha analizado antes, existe un momento cercano a 1500[s] en que la curva de temperatura producto del prototipo de estufa es superada por la línea base, pero si analizamos en cuanto a áreas abarcadas por ambas curvas, es evidente que la curva del ensayo con medio poroso abarcará más área y por ende mantuvo a la pared a mayor temperatura que con vermiculita.

### 7.2.2. Análisis de simetría de temperaturas

Para el siguiente análisis y para ahora analizar el comportamiento del cuerpo de llama o cuerpo de gases de combustión, se procede a usar las diferencias de cada una de las termocuplas que se encuentran frente a frente en la cámara de combustión, es decir siguiendo el orden de disposición de la figura 18 estas serían T3 vs T5 siendo las temperaturas de pared más cercanas a la espalda de la estufa, y T4 vs T6 siendo estas las temperaturas más cercanas a la compuerta de la estufa. Cada presenta por debajo la curva de temperatura de cada termocupla y arriba de ésta la diferencia que se genera entre ambas curvas por cada segundo.

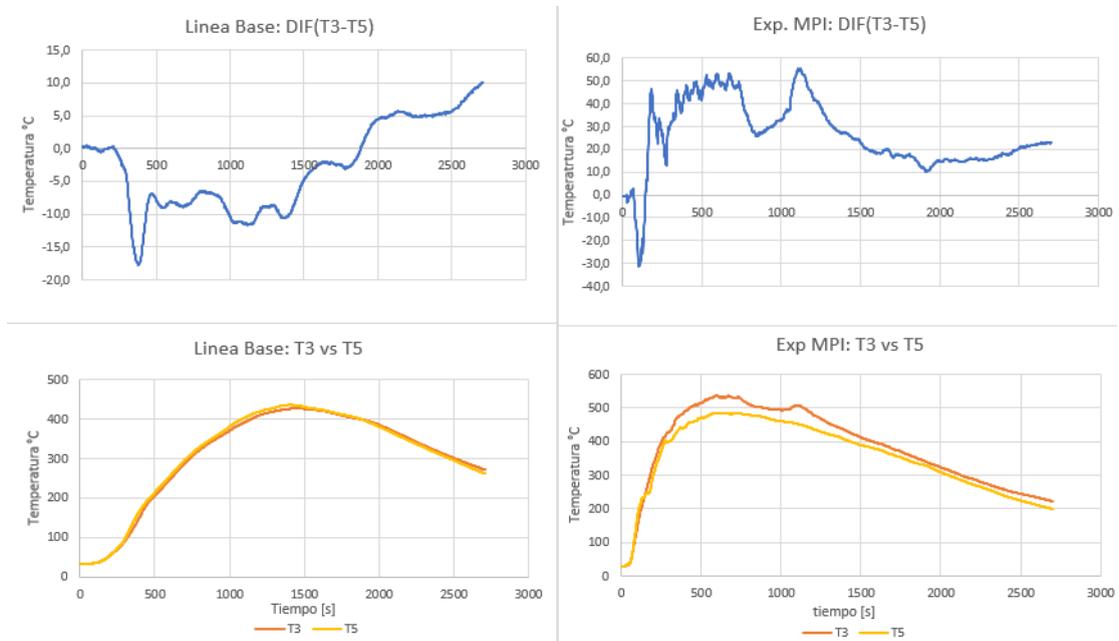


Figura 26: Diferencias de temperaturas entre termocupla frontal para T3 y T5

Las diferencias fueron medidas de manera tal como están evidenciadas en el título de la figura 26 es decir, que si el valor es positivo apunta a que el cuerpo de llama se acerca hacia T3, y de manera contraria si esta diferencia es negativa evidenciará que el cuerpo de llama se acerca a T5.

Es evidente que para el caso de linea base el cuerpo de llama pasa de estar inclinado hacia T5 (izquierda) hasta casi los  $t=2000[s]$  y luego este logre se incline hacia T3 (derecha) logrando mayores temperaturas, demostrando así el movimiento de calor que se genera dentro de la estufa. Lo interesante ocurre al momento de analizar el ensayo de la estufa prototipo, aquí se aprecia como al inicio el cuerpo de llama está inclinada hacia T5 y luego de aproximadamente  $100[s]$  cambia repentinamente hacia T

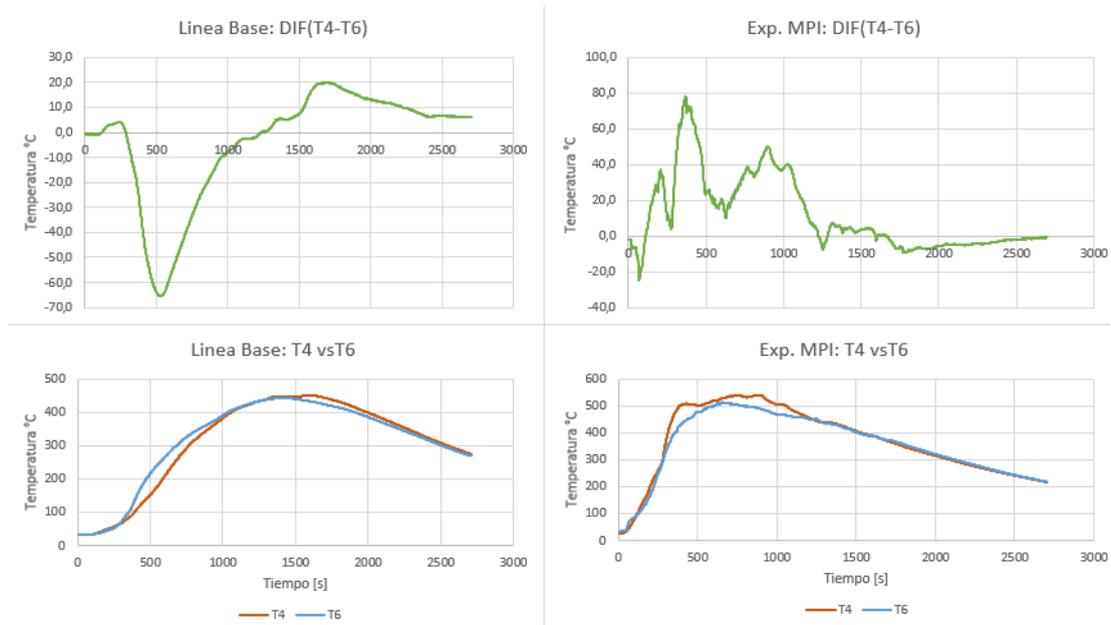


Figura 27: Diferencias de temperaturas entre termocupla frontal para T4 y T6

De la misma manera que fue explicada anteriormente la figura 27 representará las diferencias de las temperaturas medidas más cercanas a la compuerta de la estufa.

Analizando el comportamiento de la línea base en la figura 27 se ven que son similares en cuanto a lo analizado en la figura 26 pero acá se aprecia que el cambio del cuerpo de gases de combustión se inclina antes de T6(izquierda) hacia T4 (derecha). Ahora si analizamos lo que ocurrió con la estufa prototipo, también notamos dicha similitud con lo analizado en las temperaturas del fondo de la cámara, pero acá también ocurre que aproximadamente a los 1300[s] las temperaturas son más bien centradas al nivel de T4 y T6, pero como analizamos antes que T3 predominaba en valores a ese tiempo se puede esperar que el cuerpo de gases de combustión esté más centrado a la derecha pero en ese tiempo logró acercarse más hacia el centro.

### 7.3. Análisis de gases de combustión

Según se explicó en la metodología, se usó el analizador de gases TESTO 350 para medir la concentración de gases que se emite en cada uno de los ensayos realizados. Acá se comete un error y se omite utilizar una sonda de filtros de humedad que iba conectado directamente al TESTO 350, debido a esto las mediciones tomadas en cada ensayo fueron decayendo y presentando fallas en su precisión debido a que los filtros se fueron humedeciendo.

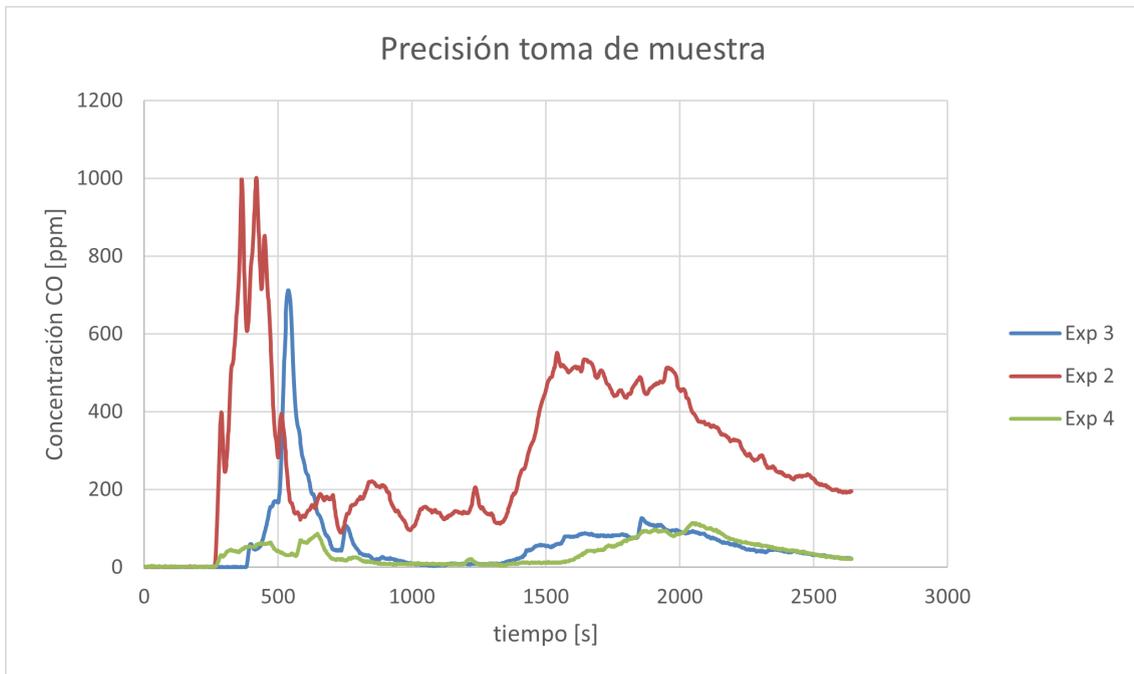


Figura 28: Toma de muestras de concentración de CO para 3 primeros ensayos de línea base, se demuestra el decaimiento en la precisión a medida que se pasa entre un experimento y otro

La curva roja presentada en la figura 28 es la más certera en cuanto a emisiones, y es evidente que las concentraciones de CO presenten estos dos picos mostrados en el gráfico, ya que coinciden al inicio con la fase humeante de la madera al iniciar el fuego y a la mitad de la combustión llegando a los 1500[s] se presenta el segundo peak que como se analizó anteriormente, cercano a ese tiempo ocurre la disminución de temperatura tanto de gases como de paredes internas de la estufa, por ende la combustión empieza a perder eficiencia al ir perdiendo temperatura y producto de esto la concentración de gases no quemados como lo es el CO empieza a volver a aumentar.

### 7.3.1. Decaimiento de masa

Para conocer cómo se consume la carga de leña dentro de la estufa se fue registrando cada segundo obteniendo los datos desde la balanza KERN hacia un software. Al tomar datos por cada segundo se logra notar que a veces la masa registrada por dicho software (y de igual forma la que marcaba la balanza misma) subía del valor exacto que se le cargaba, este error de medición se logró superar alineando bien el ducto de la chimenea y evitando toda clase de contacto del ducto mismo con cualquier elemento de sujeción que tuviera. El error se fue eliminando pero de igual forma se evidencian ciertos "aumentos de masa" que se asocian a dilataciones térmicas que puede sufrir la estufa o asociadas a la masa de aire que ingresa dentro de la estufa por las entradas de aire secundario.

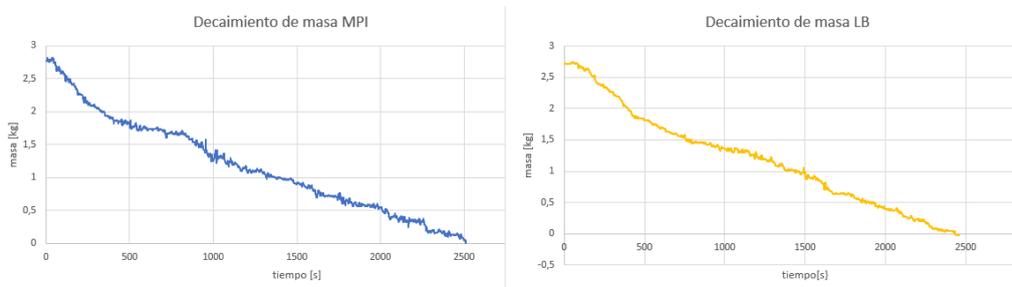


Figura 29: Decaimiento de masa para experimento linea base y prototipo de estufa

Se puede apreciar que en cada caso hasta  $t=500[s]$  el decaimiento de masa presenta una pendiente mucho más pronunciada que en el resto de la curva, esto es producto que en ese tiempo tanto para el ensayo de linea base como el del prototipo con MPI obtienen las mayores temperaturas registradas, y por ende provocarán el consumo más rápido de su carga, a continuación se medirá su tasa de quemado  $[kg/min]$ :

Tabla 12: Tasa de quemado hasta tiempo  $500[s]$  y total para cada configuración realizada

tiempo [s]	Configuración	Tasa de quemado $[kg/min]$
t=500 [s]	Linea base	0,11
	MPI	0,12
Total	Linea base	0,067
	MPI	0,064

Se analiza para ambos casos que la tasa de quemado es similar, y se obtiene que el dato hasta los  $500[s]$  si representa una mayor tasa de quemado que el general para cada caso.

## 8. Conclusiones

1. Nacionalmente se necesita entrar ya a una educación más ambiental y que se regulen de manera más específica los artefactos de combustión residencial, ya que actualmente no presenta una norma específica para concentración de gases, y además poseemos una regulación bastante atrasada de emisión de material particulado para estufas en cuanto a la analizada internacionalmente por la EPA.
2. Es importante obtener nuevos prototipos y modelos a comercializar a nivel país de artefactos de combustión que estén centrados en reducir emisiones y no en potencia térmica.
3. Se obtienen datos empíricos de temperaturas dentro de la cámara de combustión de una estufa comercial, y además de los gases de combustión dentro de la misma y como éstos se comportan en el tiempo hasta que se agota su carga de masa.
4. Los datos obtenidos de temperatura no habían sido evidenciados en otras investigaciones, por ende estos datos servirán a futuro para análisis y/o simulaciones computacionales.
5. Los medios porosos inertes le dan un comportamiento distinto a las temperaturas al solo utilizarlos dentro de la cámara de combustión.
6. Faltó realizar un análisis de gases de combustión certero para evidenciar de mejor forma si esta configuración de medio poroso inerte inserto en la cámara de combustión de la estufa funciona para disminuir emisiones en la estufa.

## 9. Recomendaciones y trabajos futuros

1. Seguir experimentando con diferentes configuraciones de MPI distinta a la utilizada en este trabajo, quizás ocupar un mix de espesor de 1[cm] de vermiculita y 1[cm] de medio poroso u ocupar medio poroso en lugares puntuales de la cámara. Además de lograr medir las emisiones tanto de partícula como gas para comprobar si los medios porosos realmente están disminuyendo emisiones
2. Medir la masa del MPI antes y después del ensayo para comprobar si dentro de éstos queda adherido material particulado.
3. Ocupar sonda de filtro de humedad para el Testo para obtener los datos de emisiones de gases.
4. Experimentar con la estufa ocupando las paredes laterales de seguridad que fueron quitadas para integración de termocuplas al exterior de ésta.
5. Realizar análisis computacionales más certeros con los datos recogidos y analizados en este trabajo.

## 10. ANEXO I

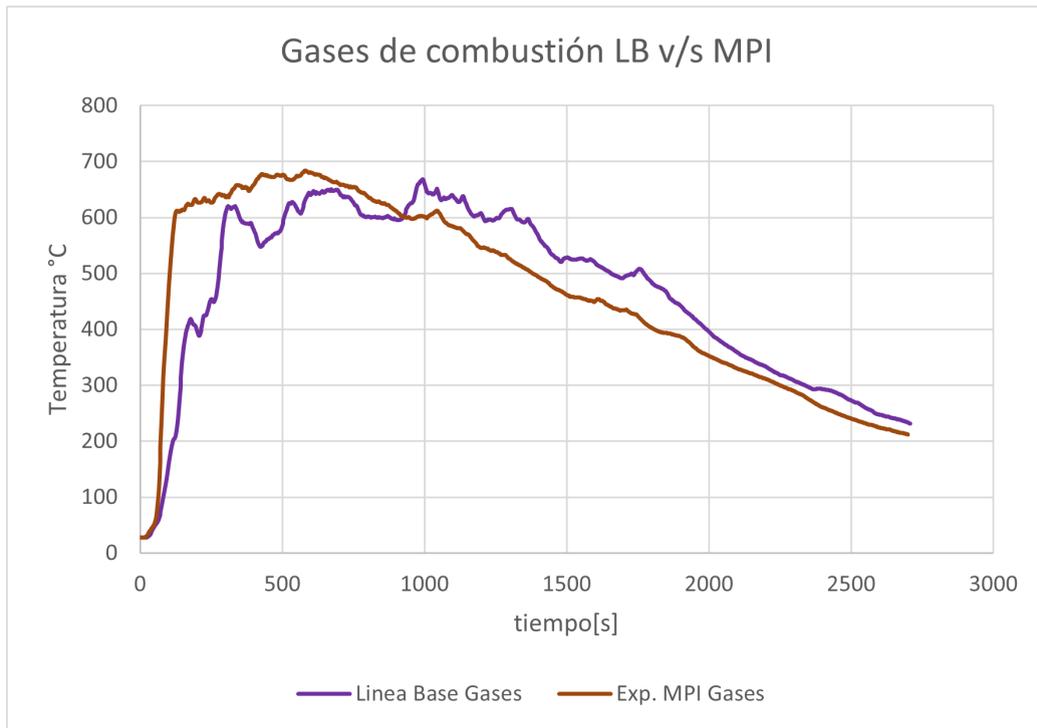


Figura 30: Diferencias entre los promedios de gases obtenidos en experimentos de linea base y medio poroso

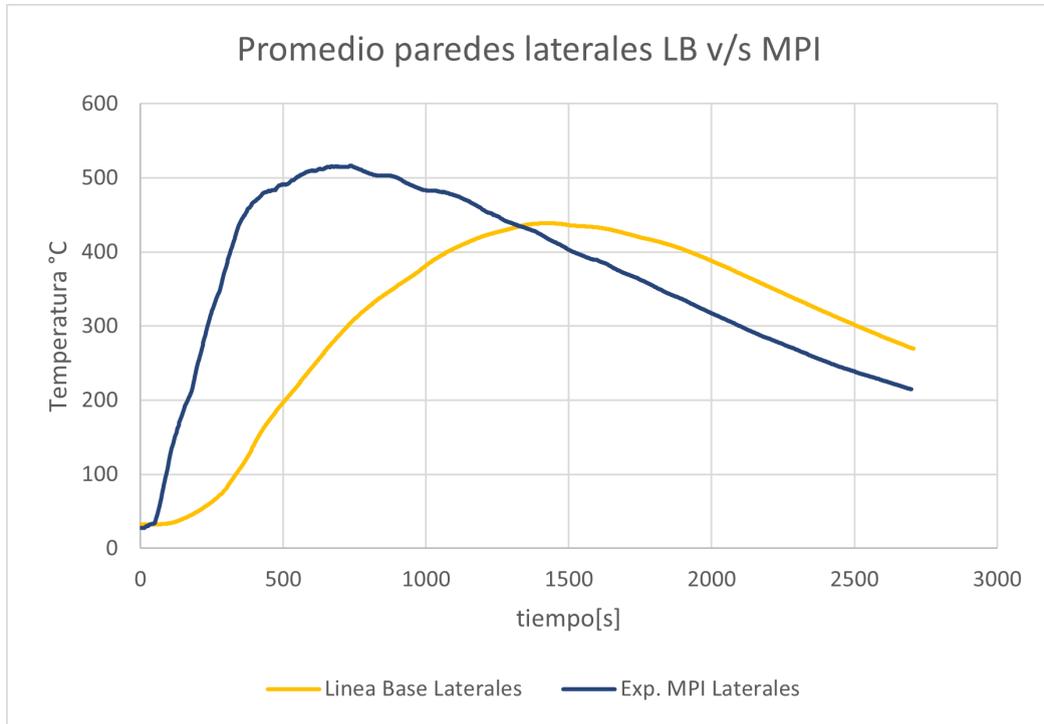


Figura 31: Diferencias entre los promedios de paredes laterales obtenidas en experimentos de linea base y medio poroso

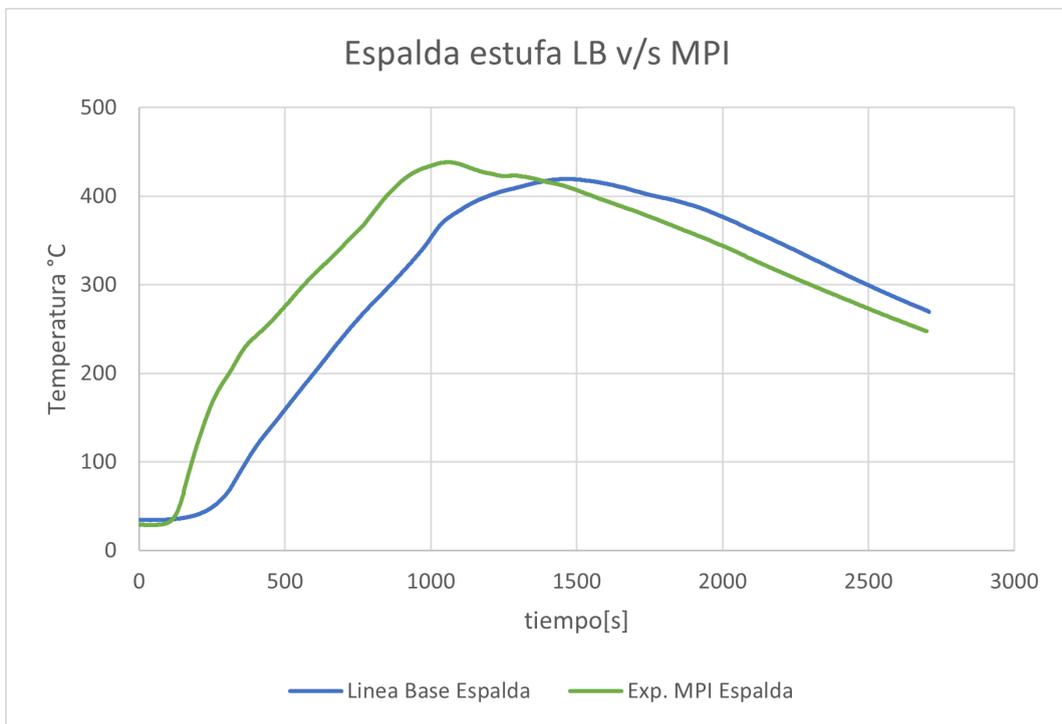


Figura 32: Diferencias entre los promedios de pared trasera obtenidos en experimentos de linea base y medio poroso

## Referencias

- [1] REDPE, 2020 *Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética*
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA, CDT- *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera, 2015*
- [3] SISTEMA DE CERTIFICACIÓN NACIONAL DE LEÑA - *¿Por qué usar leña certificada?*
- [4] CNE, 2019- *Anuario Estadístico de Energía*
- [5] MEMORIA UTFSM, PABLO SILVA - *Evaluación Técnica Del Uso De Esponjas Cerámicas En Proceso De Combustión De Leña En Estufa Comercial De Calefacción Residencial*
- [6] MEMORIA UTFSM, FELIPE MUÑOZ - *Análisis de emisión de material particulado en el proceso de combustión de leña en estufa de calefacción residencial con el uso de esponjas cerámicas*
- [7] IQ AIR - *World's most polluted cities 2020 (PM2.5)*
- [8] EXTRACTO DE CURSO "MÁQUINAS TÉRMICAS" *Por Ing. Jorge Felix Fernandez*
- [9] INFORME TÉCNICO, UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, 12 DICIEMBRE 2002 - *Priorización de medidas de reducción de emisiones por uso residencial de leña para la gestión de calidad del aire en Temuco y Padre las casas.*
- [10] REVISTA CHILENA DE PEDIATRÍA VOL.90 NO.2 , PATRICIA MATUS C., MANUEL OYARZUN G., SANTIAGO ABR. 2019 - *Impacto del Material Particulado aéreo (MP 2,5 ) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en niños: estudio caso-control alterno*
- [11] MINISTERIO DE SALUD, DR. CLAUDIO VARGAS R., JULIO 2011 - *Efectos de la fracción gruesa (PM10-2.5) del material particulado sobre la salud humana.*
- [12] FRANCISCO CERECEDA-BALIC, MARIO TOLEDO, VICTOR VIDAL, FABIAN GUERRERO, LUIS A. DIAZ- ROBLES, XIMENA PETIT-BREUILH, MAGIN LAPUERTA. - *Emission factors for PM 2.5, CO, CO2, NOx, SO2 and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3CE.*
- [13] MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE - *¿Qué es el material particulado?*
- [14] ALLIANCE FOR GREEN HEAT - *The EPA's role regulating wood stove emissions*
- [15] BIOSAIT EUROPE- LABORATORIO DE ANÁLISIS AGROALIMENTARIOS Y AMBIENTALES - *¿Qué son las PM 2.5 y las PM 10?*
- [16] MÉTODOS CH 5G Y CH28 ISP
- [17] KAMAL (2006) *Combustion in porous media.*
- [18] BIOMASS ENERGETIC - *Reglamento Ecodiseño 2020 ecológico para calderas y estufas, España*

- 
- [19] MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE, DECRETO SUPREMO N° 12 - *Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP 2,5*
- [20] MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE, DECRETO SUPREMO N° 46 - *Establece norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera.*
- [21] MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE, DECRETO SUPREMO N° 59 - *Norma que establece la calidad primaria para material particulado respirable MP 10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia.*
- [22] UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS - *Factor de conversión de unidades "estereo" a M3 para cuantificar volúmenes de leña. Un estudio de caso en el sur de Chile*
- [23] SISTEMA NACIONAL DE CERTIFICACIÓN DE LEÑA (SNCL), *Reglamento de certificación*
- [24] BOSCA- *Manual de usuario SPIRIT 380*
- [25] BOSCA - *Manual de usuario calefactores a leña BOSCA*
- [26] TESTO 350 - *Página web TESTO 350*