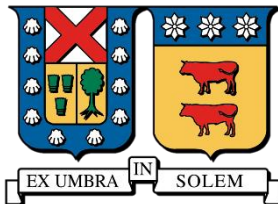


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO – CHILE**



**“INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LEÑA HÚMEDA  
EN ESTUFA DE CALEFACCIÓN RESIDENCIAL”**

**FERNANDA INOSTROZA ARAYA**

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

**PROFESOR GUÍA : DR. ING. MARIO TOLEDO T**

**PROFESOR CORREFERENTE : DR. FABIÁN GUERRERO C**

**ENERO 2021**

## AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer al equipo de trabajo formado por profesores, alumnos y exalumnos que hicieron posible la realización de las pruebas experimentales, en el poco tiempo permitido por las circunstancias del COVID-19.

Por último, a mi familia y amigos que me apoyaron y creyeron en mí para poder lograr finalizar esta etapa a pesar de los inconvenientes.

Gracias a todos por el esfuerzo y por mantenerme con la confianza que poder llegar a este punto.

## Resumen

El presente trabajo de investigación se enmarca en el desarrollo del proyecto FONDEF IDeA ID20I10319. Esta iniciativa considera el uso de medios porosos inertes dentro de la cámara de combustión de un calefactor de leña residencial de una potencia de 10,8 kW, con el fin de mitigar las emisiones de material particulado.

Se realizaron ensayos experimentales del calefactor de leña con el prototipo de túnel de dilución proporcionado por BOSCA Chile S.A. Las pruebas de combustión tuvieron una duración aproximada de 2,5 a 4,5 horas, para posteriormente esperar 24 horas previo al pesaje de los filtros con material particulado. Se ejecutaron 4 ensayos con distintos porcentajes de humedad de 11 y 30 %, reconocidos como leña seca y húmeda, y con y sin medios porosos inertes, utilizando el Método CH-5G, normativa vigente para la determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña. El combustible utilizado para los procedimientos fueron leños de *Eucalyptus Globulus* con características y medidas según el Método CH-28, normativa vigente para la determinación de material particulado y certificación de calefactores a leña. Respecto a los medios porosos inertes se utilizaron 9 bloques de Carburo de Silicio ubicados en las paredes interiores de la cámara de combustión.

En general los resultados con leña seca lograron las mayores temperaturas de operación. Además, al implementar los medios porosos inertes, los factores de emisión (FE) se ven disminuidos en porcentajes mayores al 15%. Sin embargo, el análisis de gases las 4 pruebas experimentales demuestran la existencia de una combustión imperfecta dadas las altas concentraciones de metano y monóxido de carbono.

Las conclusiones preliminares de este trabajo de investigación experimental permiten deducir que existen modificaciones en el proceso de combustión de leña utilizando los medios porosos inertes. Adicionalmente, y considerando la carga de leña consumida, se obtiene que a mayor humedad en la leña su factor de emisión crece.

## Abstract

This research work is part of the development of the FONDEF IDeA ID20I10319 project. This initiative considers the use of inert porous media inside the combustion chamber of a residential wood heater with a power of 10,8 kW, in order to mitigate particulate matter emissions.

Experimental tests of the wood heater were carried out with the dilution tunnel prototype provided by BOSCA Chile S.A. The combustion tests had a duration of approximately 2.5 to 4.5 hours, to later wait for 24 hours before weighing the filters with particulate material. Four tests were carried out with different percentages of humidity of 11 and 30%, recognized as dry and wet firewood, and with and without inert porous media, using the CH-5G Method, current regulations for the determination of particulate emissions from wood-fired heaters. The fuel used for the procedures were *Eucalyptus Globulus* logs with characteristics and measurements according to Method CH-28, current regulations for the determination of particulate matter and certification of wood heaters. Regarding the inert porous media, 9 blocks of silicon carbide were used, located on the inner walls of the combustion chamber.

In general, the results with dry firewood achieved the highest operating temperatures. In addition, when implementing the inert porous media, the emission factors (EF) are reduced by more than 15%. However, the gas analysis of the 4 experimental tests shows the existence of imperfect combustion given the high concentrations of methane and carbon monoxide.

The preliminary conclusions of this experimental research work allow us to deduce that there are modifications in the firewood combustion process using inert porous media. Additionally, and considering the load of firewood consumed, it is obtained that the higher the humidity of the firewood, the higher its emission factor increases.

## Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS .....	i
Resumen.....	ii
Abstract .....	iii
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	2
2.1. Leña .....	2
2.1.1. Antecedentes en Chile.....	2
2.1.2. Composición elemental.....	4
2.1.3. Normativa legal.....	5
2.2. Estufas a leña.....	6
2.2.1. Normativa legal.....	6
2.2.2. Tecnología disponible .....	7
2.2.3. BOSCA Spirit 380.....	8
2.2.3.1. Funcionamiento .....	8
2.2.3.2. Características.....	9
2.3. Material particulado.....	10
2.3.1. Antecedentes en Chile.....	11
2.3.2. Leña y COVID-19.....	12
2.4. Medios porosos inertes .....	13
2.4.1. Combustión en MPI .....	13
3. Objetivos.....	15
3.1. Objetivo general .....	15
3.2. Objetivos específicos.....	15
4. Diseño experimental .....	16
4.1. Túnel de dilución.....	16
4.2. Funcionamiento .....	18
4.3. Instrumentos externos.....	20
4.4. Condiciones de trabajo .....	22
4.4.1. Condiciones del combustible .....	22
4.5. Cálculos relevantes.....	23

4.5.1.	Flujo en la chimenea .....	23
4.4.2.	Emisión de material particulado.....	24
5.	Procedimiento experimental .....	25
5.1.	Consideraciones iniciales .....	25
5.1.1.	Del combustible .....	25
5.1.2.	Equipos e instrumentos .....	26
5.1.3.	Filtros y sistema portafiltros.....	26
5.2.	Encendido.....	28
5.3.	Pre ensayo.....	29
5.4.	Ensayo .....	30
5.5.	Pesaje de filtros.....	31
6.	Resultados experimentales.....	32
6.1.	Temperaturas de la cámara de combustión .....	32
6.2.	Análisis de gases.....	34
6.2.1.	Según % humedad.....	35
6.2.1.1.	Leña seca.....	35
6.2.1.2.	Leña húmeda.....	36
6.3.	Material particulado gravimétrico .....	38
7.	Conclusiones.....	41
8.	Recomendaciones .....	42
	Referencias.....	43
	<b>Anexo A</b> .....	47

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Oferta de energía primaria, 2018. ....	3
Figura 2.2. Consumo de energía por combustible total país (%) .....	3
Figura 2.3. Distribución del volumen consumido por especie en el sector residencial. ....	4
Figura 2.4. Funcionamiento estufa de doble combustión .....	9
Figura 2.5. Comparación de tamaño de las partículas de PM. ....	10
Figura 2.6. Composición de las emisiones al aire de <i>MP2.5</i> , <i>NOx</i> y <i>SO2</i> según tipo de fuente, 2018.....	11
Figura 2.7. Promedio trianual de concentraciones de material particulado fino ( <i>MP2.5</i> ) entre 2016 y 2018. ....	12
Figura 2.8. Medios porosos inertes, <i>SiC</i> .....	13
Figura 2.9. Teoría del exceso de entalpía.....	14
Figura 2.10. Proceso de combustión en medio poroso.....	15
Figura 4.1. Representación del túnel de dilución.....	17
Figura 4.2. Localización de aperturas de muestreo.....	18
Figura 4.3. Tren de muestreo Método CH-5G .....	19
<i>Figura 4.4. Termo higrómetro EXTECH, modelo MO297 .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4.5. Analizador de gases de combustión TESTO350 .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4.6. Medidor de humedad TESTO 606-2 .....</i>	<i>21</i>
Figura 4.7. Balanza analítica de laboratorio RADWAG.....	21
Figura 4.8. Balanza de plataforma KERN .....	21
Figura 4.9. Filtro fibra de cuarzo .....	21
Figura 5.1. Disposición de la leña para el testo de combustible (Minsal, 2013) .....	26
Figura 5.2. Procedimiento de armado del sistema portafiltros.....	27
Figura 5.3. Disposición de carga para el encendido.....	28
Figura 5.4. Lecho de brasas y carga de combustible para el pre ensayo.....	29
Figura 5.5. Sistema portafiltros.....	31
Figura 5.6. Pesaje filtros impactados .....	31

Figura 6.1. Posiciones de las termocuplas lo más cercanas a la cámara de combustión .....	32
Figura 6.2. Temperaturas superficiales de la cámara por termocupla.....	34
Figura 6.3. Concentraciones de gases para ensayos de leña seca .....	35
Figura 6.4. Concentraciones de gases para ensayos con leña húmeda.....	36
Figura 6.5. Leños remanentes de los ensayos con leña húmeda .....	37
Figura 6.6. Condensación en las copas del portafiltros.....	38
Figura 6.7. Temperatura de los gases y el promedio de la cámara de combustión .....	39
Figura 6.8. Factor de emisión de cada procedimiento .....	39
Figura 6.9. Factores de emisión por carga consumida .....	40

## Índice de Tablas

Tabla 2.1. Poder calorífico superior e inferior .....	5
Tabla 2.2. Límites de emisión según potencia .....	7
Tabla 2.3. Características y especificaciones técnicas BOSCA Spirit 380.....	9
Tabla 2.4. Propiedades mecánicas de alúmina ( $Al_2O_3$ ), carburo de silicio (SiC) y óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ).....	13
Tabla 4.1. Características bomba de vacío para toma de muestras .....	19
Tabla 4.2. Categorías de velocidad de quemado CH-28.....	22
Tabla 6.1. Composición elemental Eucalyptus Globulus, [%m/m] (Guerrero, 2017)	34
Tabla 0.1. Masas de partículas impactadas en los filtros ensayados.....	47

# 1. Introducción

Actualmente más de 2.000 millones de personas dependen de la dendroenergía para cocinar y calefaccionarse, en especial en hogares de los países en desarrollo. La madera sigue siendo la fuente de energía renovable más importante, esta proporciona más del 6% del suministro total de energía primaria a nivel mundial según las Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura en el año 2019. (FAO, 2019)

La biomasa forestal es la principal fuente de energía renovable del país y ocupa el 25 % de la matriz primaria según el balance de energía del 2019. En Chile se observa un consumo de leña creciente mientras más al sur se ubica la región, variando entre 50% a 94,7% de penetración en el sector residencial, debido a las bajas temperaturas y la calidad de las viviendas. A pesar de utilizar como medio energético un recurso renovable y de fácil acceso, es una fuente importante de contaminación atmosférica al generar compuestos en fase gaseosa ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , entre otros) y en fase partículas ( $MP_1$ ,  $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ). (Cereceda-Balic, y otros, 2017)

Es por esto que la presente investigación tiene como fin medir las emisiones de contaminantes al ambiente y mejorar las condiciones del combustible (humedad) y de las tecnologías de combustión incorporando material poroso inerte.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Leña

Biomasa se define como la materia orgánica renovable de origen vegetal o animal que es obtenida de manera directa o resultado de un procesamiento.

La leña es la parte de los árboles o arbustos, de las especies vegetales forestales o agrícolas leñosas que trozadas, se pueden destinar a fines energéticos.

Cuando se habla de leñas, generalmente se asocia su origen a especies forestales, motivado tanto por el aspecto histórico como la abundancia de superficies forestales. Las leñas son importantes ya que de ellas se pueden obtener otros biocombustibles sólidos y líquidos, como astillas, carbón vegetal, bioetanol, etc. ([Plantas de Biomasa, 2013](#)) ([CEUPE, s.f.](#))

#### 2.1.1. Antecedentes en Chile

La leña es una fuente de primera necesidad y de amplio uso para calefacción y cocción de alimentos, siendo el segundo energético más usado en Chile después del petróleo.

A nivel nacional la biomasa presenta el segundo lugar dentro de la matriz energética primaria, que muestra la participación que tienen los energéticos capturados directamente de recursos naturales en el consumo total del país, donde la biomasa abarca un 25 % de participación con una variación de consumo final de 81.585 Tcal, según se indica en el *Anuario Estadístico de Energía*, ver Figura 2.1 del ([CNE, 2019](#)).

Al 2016 el sector residencial rural es el que tiene mayor consumo de leña con un 44%, seguido del sector industrial con un 27%, el residencial urbano con un 25%, del cual el 62% es atribuible al consumo de leña y sus derivados. Esto se debe a su bajo costo respecto a otros combustibles y a su versatilidad de uso, ya que permite calefaccionar, cocinar, calentar agua, entre otras cosas.

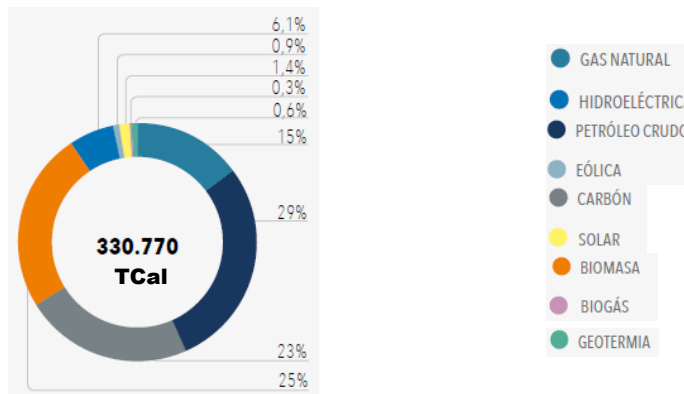


Figura 2.1. Oferta de energía primaria, 2018.

Se estima que en Chile alrededor de 1.8 millones de hogares utilizan biomasa como principal combustible de calefacción, siendo aproximadamente un tercio del total de hogares. Sin embargo, si se considera desde O'Higgins al sur, la proporción aumenta al 77 %. De esta manera, se sabe que la calefacción es el principal consumo y gasto energético de las familias en la zona centro-sur llegando a un 75 %. El principal formato de biomasa utilizado es leña (90 %), seguido del carbón (6 %) y pellet/briqueta (4 %), ver Figura 2.2. (MinEnergía, 2016)

El 2018, el sector residencial a nivel país consumió un total de 50.763 GKWh, lo que equivale a una demanda promedio por vivienda a 8.083 kWh al año, considerando un total de 6,28 millones de viviendas e incluyendo todos los energéticos, siendo la leña la principal fuente con 39,6%, seguido del GLP con 31,4%, electricidad (25,7%), parafina (2,8%) y pellets (0,8%). (Electricidad, 2019)

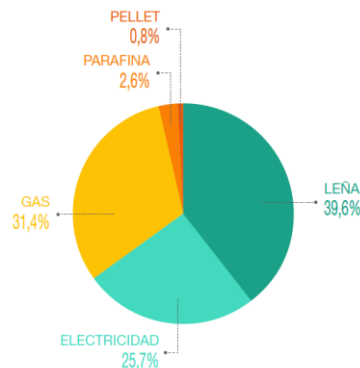


Figura 2.2. Consumo de energía por combustible total país (%)

A su vez, el volumen de consumo para calefacción tanto a nivel residencial como público y comercial alcanza casi 12 millones de metros cúbicos estéreo al año, siendo la región de Los Lagos la de mayor consumo bordeando los 3,3 millones de  $m^3st$  de leña.

A partir de la información disponible en el sector residencial es posible apreciar que las especies de leña más consumidas a nivel nacional corresponden al Roble o Hualle (*Nothofagus obliqua*, 29%), seguida del Eucalipto (*Eucalyptus globulus*, 24%) y el Pino (*Pinus radiata*, 9%), como se observa en la Figura 2.3. (Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), 2015).

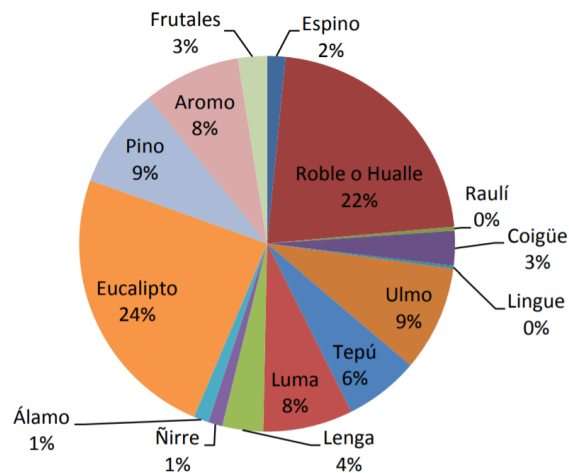


Figura 2.3. Distribución del volumen consumido por especie en el sector residencial.

### 2.1.2. Composición elemental

La madera se puede clasificar como blandas cuando provienen de las gimnospermas (árbol con semillas que no tienen revestimiento y caen al suelo) como pinos y abetos; y maderas duras que provienen de las angiospermas (plantas con flores) que corresponden a aquellas especies de hojas caducas, como robles, fresnos, álamos, eucaliptos y árboles tropicales. (Guerrero, 2017)

La madera es el resultado químico de la mezcla de polímeros: celulosa, lignina y hemicelulosa, que se presentan en proporción de 50, 25 y 25 por ciento respectivamente. Estas composiciones pueden variar dependiendo del tipo de árbol y

las condiciones de crecimiento. Con respecto a la composición química elemental, no hay diferencia entre los bosques o entre maderas duras o blandas. La proporción de elementos, en porcentaje en peso de madera, es de 49-50% de carbono, 6% de hidrógeno, 44-45% de oxígeno y 0.1-1% de nitrógeno.

La característica más importante de un combustible es el poder calorífico, que corresponde a la cantidad de energía producida en la combustión completa por unidad de masa o volumen. Este depende de las características químicas del combustible y se clasifica por poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), los que provienen de la condensación del vapor de agua y contenido de humedad en los productos de combustión, respectivamente.

Para las especies de leña con mayor consumo en el país los poderes caloríficos superior e inferior en base seca, se muestran en la Tabla 2.1. ([Facultad de Ciencias Forestales, 2015](#)), ([Universidad de la Frontera, 2015](#))

*Tabla 2.1. Poder calorífico superior e inferior*

<b>Especie</b>	<b>PCS (H=0%) [kJ/kg]</b>	<b>PCI Base seca [kJ/kg]</b>
Pinus Radiata	20674	16749
Eucalyptus Globulus	19335	15313
Nothofagus Obliqua	19209	16134

### 2.1.3. Normativa legal

Desde el año 2004, la Corporación de Certificación de Leña comenzó a trabajar en el diseño de una herramienta que permitiera regular el mercado de este combustible. Con el nacimiento del Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL) que fija estándares de calidad para la certificación del proceso de comercialización, considerando el origen, negocio y el servicio al cliente. Incluyendo las exigencias del contenido de humedad definidas por el Instituto Nacional de Normalización (INN), entidades que establecen las siguientes normas para la leña:

- La NCh2907.2005 Combustible sólido – Leña, que establece requisitos de clasificación y de calidad para la leña empleada como combustible. Esto se

aplica para sectores residenciales, comercial e institucional, no para casos de desechos forestales o de origen de madera densificada como briquetas y pellets.

- La NCh2965.2005 Combustible sólido – Leña, describe los procedimientos de muestreo e inspección que permiten verificar que un lote de leña cumpla con los requisitos establecidos en la norma NCh2907, así como su clasificación en grado de calidad (Química, 2011).

Mientras en 2016 se publicó la Política de Uso de la Leña y sus derivados (MinEnergía, 2016) que busca dar lineamientos y definir las líneas de trabajo de corto, mediano y largo plazo para mejorar la forma en que se produce, comercializa y consume la leña y sus derivados, considerando las características de la zona centro-sur.

## 2.2. Estufas a leña

En Chile, existe una gran variedad de calefactores a leña. De acuerdo al Estudio de Consumo Nacional de Leña y otros derivados sólidos de la madera, encargado por el Ministerio de Energía del año 2015 y ejecutado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), el 50,6% de los artefactos a leña en la zona centro-sur del país corresponde a calefactores de doble cámara, el segundo corresponde a las cocinas a leña (19,4%), lo siguen las salamandras, junto con los equipos de cámara simple con 12,2% y 10,2%, respectivamente.

### 2.2.1. Normativa legal

El 16 de mayo del 2012, comenzó a regir la Ley N° 20.586 que Regula la Certificación de los Artefactos para Combustión de Leña y otros Productos Dendroenergéticos, de potencia menor a 25 kW y que establecen límites de emisión entre 2,5 y 4,5 gr/h de material particulado, dependiendo de la potencia térmica nominal (kW) del calefactor, como se muestra en la Tabla 2.2, elaborada en base al DS 39.2012, donde se establece la *Norma de Emisión de Material Particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar Leña y derivados de la Madera*. Posteriormente, se introduce la modificación por el DS N° 46.2013 que revisa la *Norma de Emisión de Material*

*Particulado, para los Artefactos que combustionen o puedan combustionar Leña y Derivados de la Madera*, contenida en el Decreto N° 39.2011, la que establece que la entrada en vigencia de tal exigencia para los calefactores a leña es a partir de octubre del 2014 y para calefactores a pellets, a partir de octubre del 2016.

Dentro de esta nueva atribución, la SEC tiene la misión de instaurar las bases de un Sistema de Certificación para asegurar tales productos comercializados en el país hayan pasado necesariamente por el proceso de certificación. (SEC, 2020)

Tabla 2.2. Límites de emisión según potencia

Potencia térmica nominal (kW)	Emisión de MP (gr/h)
$\geq 8$	2.5
$8 > P_t \geq 14$	3.5
$14 > P_t \geq 25$	4.5

### 2.2.2. Tecnología disponible

#### *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, pueden o no tener compuerta para introducir la leña. (Universidad Austral de Chile, 2013)

#### *Cocinas a leña*

La capacidad calórica de las estufas a leña depende de la carbonización de la madera o de cualquier otro material orgánico. Esta debe ser depositada en un contenedor especial en la parte inferior de la cocina, que cuenta con entradas y salidas de aire que permiten el avivamiento del fuego. Estos artefactos son capaces de funcionar para calefaccionar y preparar cualquier comida. (MAPFRE, 2020)

#### *Salamandras*

Poseen cámaras de combustión con paredes de fierro fundido y se caracterizan por la limitada capacidad de control de ingreso de aire de combustión. Suelen ser reemplazadas por modelos de estufas de combustión lenta, pero se siguen comercializando debido a su menor costo. (Universidad Austral de Chile, 2013)

### *Combustión lenta*

Este modelo posee una cámara de combustión construida con planchas de acero soldadas, dispone de un visor de vidrio, sellos de aire en las puertas que permiten regular completamente la cantidad de aire de combustión que ingresa al hogar. (Blogger, 2011)

### *Combustión lenta de doble cámara*

Producen considerable ahorro de combustible del orden del 40% comparado con un modelo tradicional, ya que, tras quemar la leña, las partículas y gases quemados generados se someten a una segunda combustión, disminuyendo la velocidad de combustión. También son las estufas más económicas en el mercado y cuentan con un rendimiento que ronda el 80%. (Universidad Austral de Chile, 2013) (Sodimac, s.f.)

## 2.2.3. BOSCA Spirit 380

### 2.2.3.1. *Funcionamiento*

La estufa BOSCA Spirit 380, es una estufa de doble combustión o combustión lenta, proceso que utiliza los gases resultantes de la primera combustión del fuego de origen (primera combustión). Toma esos gases, y antes de que salgan por el tiraje los hace recircular y los vuelve a quemar dentro de la caja de fuego (segunda cámara de combustión).

En la primera etapa, el aire frío proveniente desde la puerta del cenicero pasa a través de unos pequeños agujeros en la base del hogar de combustión, el cual está conformado por una puerta con cristal cerámico resistente hasta 1000 °C y tres paredes revestidas con ladrillo refractario para mantener una temperatura promedio y una menor velocidad de quemado. Se genera una serie de residuos, en forma de gas y sedimentos que se van a incorporar a la segunda cámara junto al aire secundario precalentado.

La segunda cámara está ubicada justo sobre el hogar dejando que existan unos centímetros de separación llenos de aire precalentado por el deflector y los gases de

combustión de la primera etapa. Aquí se desarrolla la combustión completa para aprovechar mejor el calor y reducir el consumo de leña.

Como resultado de ese doble proceso de quemado la estufa genera mucho más poder calórico, en un tiempo más corto y utilizando menos madera. Reduce la emisión de partículas y gases nocivos casi 20 veces más que cualquier salamandra convencional.

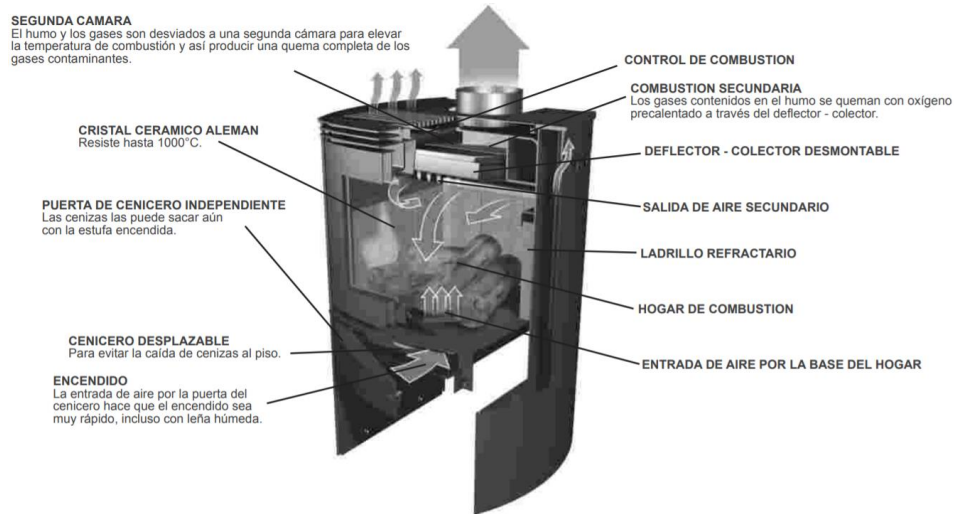


Figura 2.4. Funcionamiento estufa de doble combustión

### 2.2.3.2. Características

Las características de la estufa BOSCA Spirit 380 se presentan en la Tabla 2.3 obtenidas de la ficha técnica y manual de uso. (BOSCA, s.f.)

Tabla 2.3. Características y especificaciones técnicas BOSCA Spirit 380

Potencia	10,8 [kW] - 9,888 [Kcal/h ]
Eficiencia	67,5 %
Rango de Calefacción	Hasta 180 [ $m^2$ ]
Dimensiones (alto×ancho×prof.)	84,2×54,6×56,5 [cm]
Peso	87,2 [kg]
Diámetro Cañón	6"
Tiraje calentador	12 [Pa]
Caudal de humos	176,5 [g/s]
Temperatura humos	337 [°C]

### 2.3. Material particulado

Se denomina material particulado a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran suspendidas en el aire. Su composición es muy variada y es posible encontrar sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro sódico, carbón, polvo de minerales, cenizas metálicas y agua, además estas partículas pueden producir reacciones químicas.

Se catalogan en función del tamaño y en el ámbito de calidad del aire, las partículas  $PM_{10}$  son las de mayor tamaño, cuyo diámetro aerodinámico teórico es  $10 \mu m$  y las partículas finas conocidas como  $PM_{2.5}$ , con diámetro  $2.5 \mu m$ , mientras que el cabello humano está dentro de los  $50$  a  $70 \mu m$  de diámetro. (Instituto para la Salud Geoambiental, 2020)



Figura 2.5. Comparación de tamaño de las partículas de PM.

Cabe mencionar los efectos en la salud producidos se deben al nivel de exposición a las partículas, ya que la exposición crónica aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer al pulmón. Las partículas  $PM_{10}$  quedan retenidas en las vías respiratorias, produciendo efectos a nivel respiratorio, las partículas menores, como las  $PM_{2.5}$ , tienen la capacidad de pasar al torrente sanguíneo por lo que podrían dañar cualquier órgano o sistema (Oyarzún, 2010). En 2013, el IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) ha clasificado el aire contaminado de las ciudades como cancerígeno humano.

### 2.3.1. Antecedentes en Chile

Para el año 2018, la combustión de leña residencial es la fuente primordial de material particulado fino, explicando 81,5 % de las emisiones nacionales, con 85.528 toneladas anuales según el Informe del Estado del Medio Ambiente (IEMA) del 2020. (MMA, Informe del Estado del Medio Ambiente, 2020)

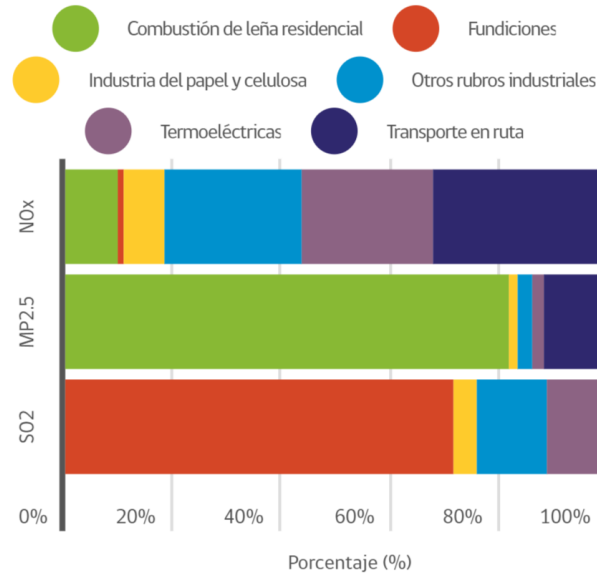


Figura 2.6. Composición de las emisiones al aire de MP<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> según tipo de fuente, 2018

El 2018, a nivel nacional el 63% de las estaciones de monitoreo con representatividad poblacional presentaron concentraciones superiores al valor de la norma primaria anual para MP<sub>2.5</sub>. Las estaciones ubicadas en la zona sur del país registraron las mayores concentraciones, debido principalmente a la combustión de leña residencial, alcanzando el valor más alto (56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la ciudad de Coyhaique, seguido de Padre las Casas, Osorno, Valdivia las que se ubican en los cinco primeros lugares de ciudades más contaminadas con PM<sub>2.5</sub> según un informe de (AirVisual, 2018).

Figura 2.7. (MMA, 2019)

Las mayores emisiones de PM<sub>2.5</sub> del país, en el 2017, se observan en la zona sur sumando 76 mil toneladas por la combustión de leña residencial, lo que represente el 88% del total para la zona. En cambio, en la zona norte las mayores fuentes emisoras son las actividades industriales (termoeléctricas) y el transporte de ruta.

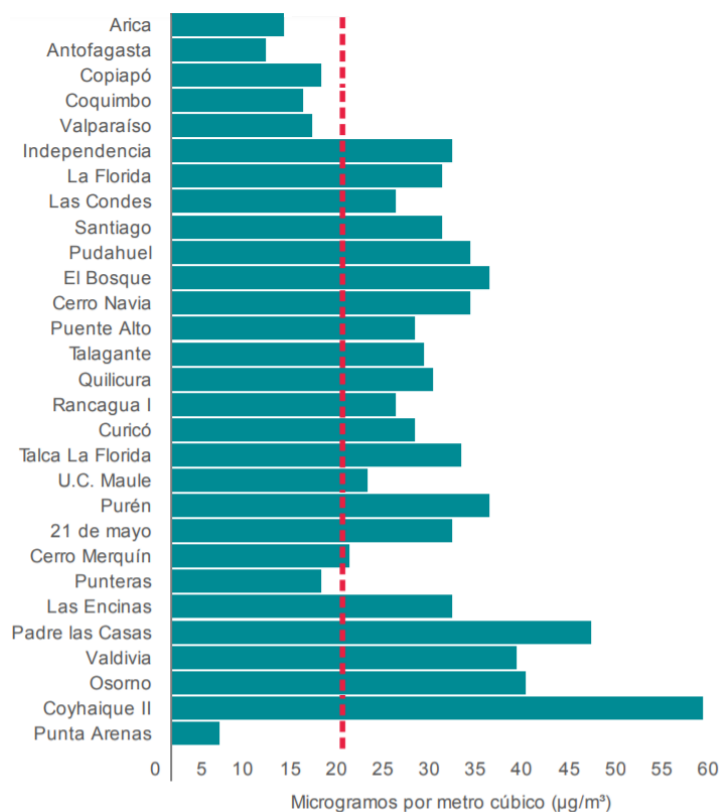


Figura 2.7. Promedio trianual de concentraciones de material particulado fino ( $MP_{2.5}$ ) entre 2016 y 2018.

### 2.3.2. Leña y COVID-19

En vista de que el material particulado es un vehículo para la propagación del coronavirus es que el Ministerio del Medio Ambiente en su campaña comunicacional de Gestión de Episodios Críticos (GEC) y COVID-19, junto al Ministerio de Energía en su campaña Más Leña Seca 2020 plantean como llamado a la acción de uso de leña seca y a la paulatina transición energética a otros combustibles.

Plantean medidas que permitan disminuir las emisiones, como:

- Utilizar tiraje abierto en las estufas a leña
- Encender el fuego sólo con papel y astillas de leña seca
- Vigilar que no se emitan humos visibles
- Realizar limpieza de ductos de evacuación de humos y mantención a las estufas a leña

## 2.4. Medios porosos inertes

Por lo general, los materiales porosos utilizados en los quemadores de medios porosos (QMP) consisten en espumas cerámicas u otras conductoras de calor. Estas tienen grandes relaciones superficie – volumen, por lo tanto, permiten el intercambio de calor directo entre las fases sólida y gaseosa, y las altas porosidades para minimizar la caída de presión.

Éstos sólidos cerámicos pueden ser de carburo de silicio (SiC), alúmina ( $Al_2O_3$ ), y óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ). Todos comparten propiedades de gran dureza, alta conductividad térmica y excelente resistencia al choque térmico, el óxido de zirconio es el único que no tiene baja expansión térmica. En la Tabla 2.4 se pueden apreciar algunas propiedades mecánicas para estos tres tipos de cerámicas. (Olaya, 2017)

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas de alúmina ( $Al_2O_3$ ), carburo de silicio (SiC) y óxido de zirconio ( $ZrO_2$ )

Material	Densidad ( $g/cm^3$ )	Resistencia a tensión (psi)	Resistencia a compresión (psi)	Tenacidad a la fractura (psi/in)	Punto de fusión ( $^{\circ}C$ )	Coef. expansión térmica ( $\times 10^6$ cmm/cmm)/ $^{\circ}C$
$Al_2O_3$	3.98	30000	400000	5000	2000	-6.8
SiC	3.1	25000	560000	4000	2732	-3.7
$ZrO_2$	5.8	65000	270000	10000	2700	10.5

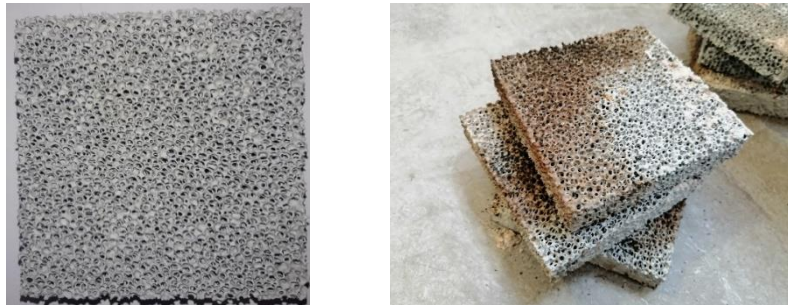


Figura 2.8. Medios porosos inertes, SiC

### 2.4.1. Combustión en MPI

La combustión en medios porosos implica la combustión dentro de las cavidades de una matriz inerte. Los QMP facilitan la recirculación interna de calor de los productos de combustión a los reactivos aguas arriba por conducción y radiación en la matriz

porosa sólida, esto se explica a través del principio de exceso de entalpía y se puede ver en la 2.9. (Sobhani, y otros, 2020)

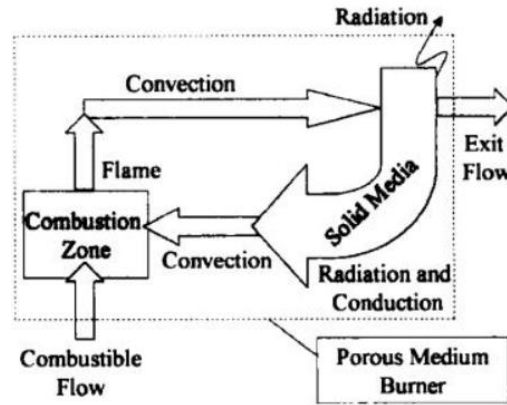


Figura 2.9. Teoría del exceso de entalpía

El exceso de entalpía describe la cantidad de energía entregada por los productos de la combustión a los reactivos para incrementar su temperatura con efectos importantes sobre las velocidades de combustión, límites de inflamabilidad y las temperaturas de llama.

Durante la combustión en MPI se pueden diferenciar 3 zonas principales. La primera es donde ingresa la premezcla aire-combustible y es precalentada. En la segunda zona ocurre la reacción química transformando la mezcla en productos y liberando energía. La tercera zona, es donde los productos de la combustión transfieren su entalpía al medio poroso.

Las ventajas obtenidas de la combustión en medios porosos son:

- Incremento en la eficiencia de combustión.
- Disminución en las emisiones de  $CO$  y  $NO_x$ .
- Gran estabilidad del proceso de combustión.
- Obtención de hidrógeno y gas de síntesis desde mezclas ricas.
- Valorización de los gases de desechos con bajo poder calorífico a partir de mezclas pobres.
- Lograr amplios rangos de modulación (se puede trabajar con mezclas en un mismo equipo).

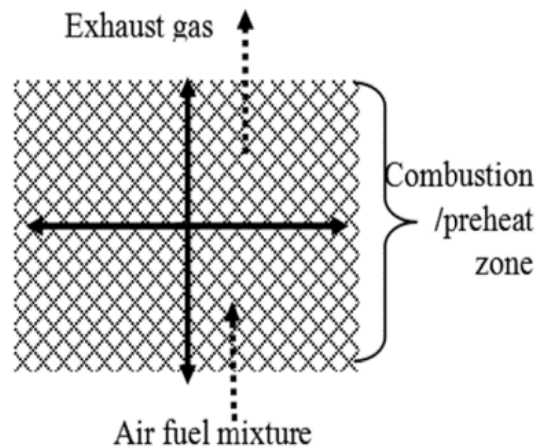


Figura 2.10. Proceso de combustión en medio poroso

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo general

En el marco del proyecto de innovación PI\_19\_IN\_12 USM denominado “*Innovadora y eficiente estufa de combustión de leña que reduce la contaminación atmosférica*”, el objetivo principal es investigar el proceso de combustión de leña húmeda, evaluar las emisiones de material particulado, y realizar modificaciones al hogar de combustión en una estufa de calefacción residencial.

#### 3.2. Objetivos específicos

1. Implementar un túnel de dilución en el Laboratorio de Termofluidos para la medición de material particulado, considerando la normativa nacional vigente.
2. Instalar estufa de calefacción residencial con sistemas de medición y control de masa de leña y temperaturas.
3. Desarrollar pruebas experimentales utilizando leña certificada y con distintos porcentajes de humedad.
4. Proponer mejoras y modificar el hogar de combustión de leña.

## 4. Diseño experimental

Para esta investigación se ha seleccionado madera de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) la que tendrán distintos porcentajes de humedad y provienen de Concón, región de Valparaíso. Al ser recepcionadas se transportarán al Laboratorio de Termofluidos y se les medirá el porcentaje de humedad contenido y se dimensionarán.

### 4.1. Túnel de dilución

El túnel de dilución será usado, como bien dice su nombre, para diluir los gases de escape de la combustión de leña con aire ambiental. El tipo de túnel a utilizar es iso-cinético, ya que, la velocidad de la muestra tiene que ser la misma velocidad que los gases del túnel, esto, para evitar la separación de las partículas y que la muestra sea lo más fidedigna posible. Por medio de un soplador manualmente regulado los gases de escape son enfriados alrededor de 30 a 32 °C. El túnel está compuesto por ductos de acero inoxidable de 0,15 m de diámetro y de 1 m de largo.

Se colocarán termocuplas en las secciones de muestreo para monitorear continuamente la temperatura del flujo de gas, de los gases de escape.

El túnel de dilución incluye:

- Una campana con el diámetro mínimo de 0,3 m en el extremo ancho para diluir los gases de escape con aire atmosférico provenientes de la estufa
- 2 codos de 90 grados, un ducto recto donde se ubicaron los puertos de muestreo de MP, temperatura y velocidad
- Ducto con deflectores para mezclar
- Soplador que mantiene la velocidad y el rango de dilución según las especificaciones.
- Ducto recto para ventear los gases de escape fuera del laboratorio. (Jimenez, Farias, Quiroz, & Yañez, 2017) (Muñoz, 2019)

Las descripciones antes mencionadas fueron extraídas del método CH-5G. (MINSAL, 2012)

A continuación en la Figura 4.1 se puede ver un esquema del túnel de dilución.

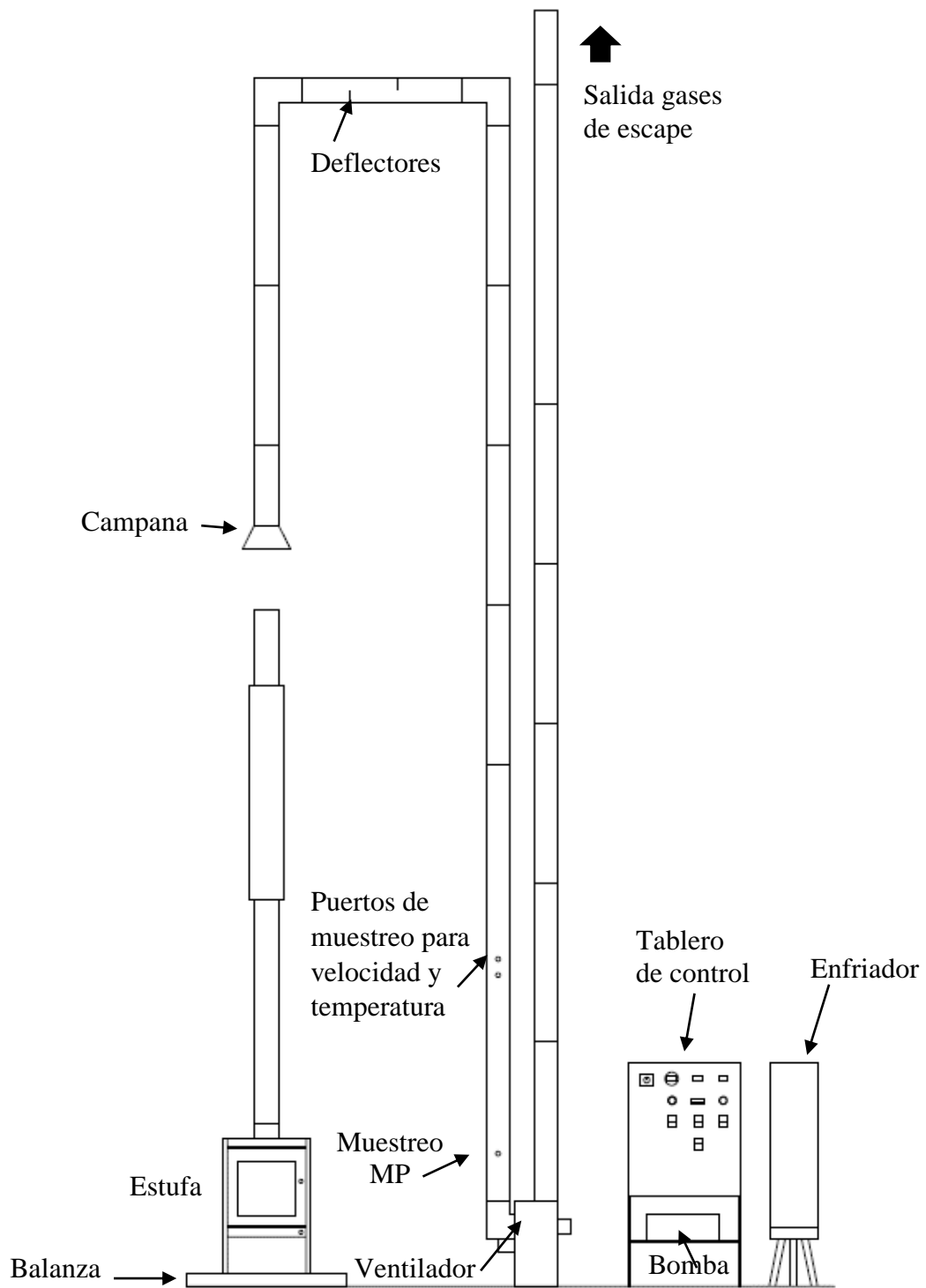


Figura 4.1. Representación del túnel de dilución

Fuente: (Muñoz, 2019)

## 4.2. Funcionamiento

A continuación se describirá el funcionamiento de la toma de muestras para las componentes mencionadas en el Método CH-5G y en base al Reporte realizado en Noruega sobre los *Factores de emisión de partículas para la combustión de estufas a leña*. (Seljeskog & Goile, 2013)

El flujo diluido recorre el túnel hasta llegar al punto de muestreo donde una sonda de acero inoxidable y diámetro interior de 9,5 mm y largo 0,6 m capta la muestra en el centro del ducto, ver Figura 4.2. Luego, el flujo extraído por una bomba de vacío es guiado hacia el porta filtros y finalmente expulsado por el ducto de escape (ver características de la bomba en la Tabla 4.1).

El porta filtros está compuesto por 2 copas de vidrio de borosilicato, una termocupla ubicada al centro del cilindro y disco plástico que sirven de soporte para el filtro; además cuenta con empaquetaduras de caucho para evitar las filtraciones desde el exterior o de los bordes del filtro. Este porta filtros puede sostener filtros de hasta 100 mm de diámetro.

Ahora hablando de las condiciones físicas del flujo, la temperatura promedio del túnel es posible medirla por una sonda con 5 termocuplas tipo K. También es posible encontrar un tubo Pitot tipo S para medir la presión total, estática y dinámica, con las cuales se obtiene la velocidad y caudal, según la superficie, del fluido en [m/s] y [m<sup>3</sup>/h] respectivamente.



Figura 4.2. Localización de aperturas de muestreo

Tabla 4.1. Características bomba de vacío para toma de muestras

<b>Marca</b>	VALUE
<b>Modelo</b>	VE-180N
<b>Flujo</b>	226 l/min
<b>Vacío máx.</b>	2 Pa
<b>Poder</b>	¾ HP

El tablero de control, permite controlar los sistemas de muestras y está conformado por:

- 1 Flujómetro marca OMEGA, modelo FMA 5526
- 1 Módulo de adquisición de datos USB OMEGA, modelo OMB-DAQ-2416-4AO
- 1 Barómetro con sonda para temperatura y humedad OMEGA, modelo i.BTHX
- 3 Transmisores de presión diferencial ultra baja ASHCROFT, modelo XLdp
- 4 Switch ON/OFF para el ventilador, flujómetro, bomba y encendido general
- 3 Pantalla Display SENSE, modelo LCDD-03
- 1 Manómetro
- 1 Interruptor de 3 fases
- 2 Reguladores de voltaje

A continuación, se puede ver la representación del tren de muestreo presentado por el método CH-5G

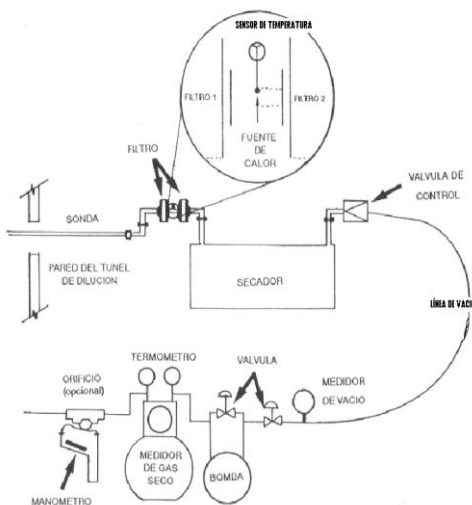


Figura 4.3. Tren de muestreo Método CH-5G

### 4.3. Instrumentos externos

- **Termo higrómetro**

Marca: EXTECH

Modelo: MO297

Parámetros de medición: Humedad, temperatura en el aire, temperatura IR



Figura 4.4. Termo higrómetro EXTECH, modelo MO297

- **Analizador de gases de combustión**

Marca: TESTO

Modelo: 350

Parámetros de medición: ppm ( $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $C_xH_y$ ), vol.% ( $O_2$ ,  $CO_2$  – IR), temperatura (*Tipo K*, *Tipo S*), presión, flujo



Figura 4.5. Analizador de gases de combustión TESTO350

- **Xilohigrómetro**

Marca: TESTO

Modelo: 606-2

Parametros de medición: Humedad y temperatura ambiente, humedad de materiales



Figura 4.6. Medidor de humedad TESTO 606-2

- **Balanza analítica**

Marca: RADWAG

Modelo: AS 220.R2

Resolución: 0,01 mg

Rango de medición: 1mg – 62g



Figura 4.7. Balanza analítica de laboratorio RADWAG

- **Balanza de plataforma**

Marca: KERN

Modelo: KFP\_V20

Panel de control: KFB-TAM

Carga máxima: 300 kg



Figura 4.8. Balanza de plataforma KERN

- **Filtros de fibra de cuarzo**

Marca: TISCH

Grado: Q-MA

Diámetro: 118 mm

Tamaño de poro: 2,2  $\mu$ m



Figura 4.9. Filtro fibra de cuarzo

#### 4.4. Condiciones de trabajo

La temperatura en el portafiltros durante cada partida de medición se debe mantener entre 18 y 32 °C.

Las velocidades del aire en el espacio del artefacto de prueba y del sistema de salida de gases deben ser inferiores a 0,25 m/s. Mientras que el flujo inicial de la muestra debe ser aproximadamente 0,015 m<sup>3</sup>/min.

Toda campana o artefacto similar utilizado para purgar los productos de combustión no deben inducir un tiraje superior a 1,25 Pa en el calefactor a leña, cuando no esté operando.

##### 4.4.1. Condiciones del combustible

El contenido de humedad debe estar entre 12 a 18% en base húmeda (15 a 23% base seca). Mientras que las dimensiones de cada unidad de combustible para la prueba deben cumplir con las medidas nominales de la madera, aproximando a 5/6 las dimensiones del largo de la cámara de combustión.

Para obtener valores de MP se requiere una corrida de medición de emisiones en cada una de las siguientes categorías de quemado. (Minsal, 2013)

Tabla 4.2. Categorías de velocidad de quemado CH-28

<b>Categorías de velocidad de quemado (Promedio kg/h, base seca)</b>			
Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
< 0,80	0,80 a 1,25	1,25 a 1,9	Velocidad máxima de quemado
< 1,76	1,76 a 2,76	2,76 a 4,19	

La densidad del combustible para la medición de ser de  $112 \pm 11,2 \text{ kg/m}^3$  del volumen de la cámara de combustión.

## 4.5. Cálculos relevantes

### 4.5.1. Flujo en la chimenea

Para calcular la cantidad de flujo dentro del túnel es necesario recurrir al Método CH-1A, que describe la velocidad del gas a través del ducto y el método CH-2 para determinar el flujo volumétrico de los gases de chimenea.

1. Velocidad promedio del gas [m/s] se obtiene por:

$$V_s = K_p \cdot C_p \sqrt{\frac{\Delta P_{prom} \cdot T_s}{P_s \cdot M_s}} \quad (4.1)$$

- $K_p$  = Constante del tubo Pitot, 34,97
- $C_p$  = Coeficiente del tubo Pitot, se asumirá 1
- $M_s$  = Peso molecular del gas seco en el túnel, 29 g/g-mol. Método CH-2
- $T_s$  = Temperatura absoluta del túnel, [K]
- $\Delta P_{prom}$  = Presión de velocidad promedio del gas [mm  $H_2O$ ]
- $P_s$  = Presión absoluta del túnel en [mmHg], y se calcula:

$$P_s = P_{bar} + P_g \quad (4.2)$$

Donde:

- $P_{bar}$  = Presión barométrica en el sitio de medición
- $P_g$  = Presión estática de la chimenea

2. Flujo volumétrico del gas seco del túnel, [ $m^3/s$ ]:

$$Q_s = 3600 \cdot v_s \cdot A \cdot \frac{298[K] \cdot P_s}{T_s \cdot 760 [mmHg]} \quad (4.3)$$

- $A$  = Área transversal del ducto [ $m^2$ ]
- $v_s$  = Velocidad promedio del gas [m/s]

3. Contenido de humedad del combustible, en base humedad:

$$\%M_w = \frac{100 \cdot \%M_d}{100 + \%M_d} \quad (4.4)$$

Donde:

- $\%M_d$ = Contenido de humedad en base seca [%]

4. Un dato infaltable es la tasa en que se consume el combustible, y es la velocidad de quemado, [kg/h]:

$$BR = \frac{60 \cdot W_w}{\Theta} \cdot \frac{(100 - \%M_w)}{100} \quad (4.5)$$

- $W_w$ = Masa total de madera quemada, [kg]
- $\Theta$ = Tiempo total de la medición, [min]
- $\%M_w$ =Humedad promedio en la carga de combustible, base húmeda [%]

#### 4.4.2. Emisión de material particulado

Para poder saber la cantidad y concentración de material particulado atmosférico total del proceso, es necesario conocer los siguientes parámetros.

1. Volumen captado por la lanza, [ $Sm^3$ ]:

$$V_m = \frac{SLPM \cdot T_m}{1000} \quad (4.6)$$

- SLPM= Caudal de muestreo o flujo de gases, en [L/min]
- $T_m$ = Tiempo de duración del ensayo, [min]

2. La concentración de material particulado, [ $g/Sm^3$ ]:

$$C_s = \frac{m_n}{V_m} \quad (4.7)$$

- $m_n$ = Cantidad de material particulado, [g]
- $V_m$ = Volumen de muestra de gas obtenido por medidor de gas seco, [ $Sm^3$ ]

3. Velocidad de emisión de material particulado, [g/h]:

$$E = c_s \cdot Q_{sd} \quad (4.8)$$

- $Q_{sd}$ =Velocidad del flujo de gas total

Este resultado debe ajustarse para fines de información con el factor de ajuste de métodos que se indica a continuación:

$$E_{adj} = 1.82 \cdot E^{0.83} \left[ \frac{g}{h} \right] \quad (4.9)$$

## 5. Procedimiento experimental

En esta sección se describen los pasos a seguir según los métodos CH-5G y CH-28 dictados por el Ministerio de Salud. (Minsal, 2013)

### 5.1. Consideraciones iniciales

Encender la balanza de plataforma antes de montar el calefactor sobre ella.

Se debe regular el ventilador y flujómetro para obtener la velocidad de succión calculada.

El sistema portafiltros debe estar armado como se indica en la sección 5.1.3 y se verifica que esté bien sellado.

Se conecta el portafiltros al tren de muestreo segundos antes de comenzar el ensayo para que el filtro no se impacte antes de la medición.

#### 5.1.1. Del combustible

- a. Se debe limpiar el ducto, portafiltros y sonda del portafiltros antes del encendido.
- b. Calcular las dimensiones de los leños según la capacidad de la cámara de combustión del calefactor, (Minsal, 2013). En este caso el volumen utilizable es inferior o igual a  $0.043 \text{ m}^3$  y se debe usar madera de 2x4 in.
- c. La carga de combustible se determina a través de:

$$Carga = (112 \pm 11,2) \cdot volumen$$

Donde el volumen, corresponde a la cámara de combustión.

- d. Conociendo la carga y el largo requerido para la medición, se dimensionan los leños (con un nivel de humedad menor al 23% en base seca).
- e. El combustible para el pre ensayo y ensayo deben poseer las mismas características y peso, de modo que la disposición de los leños en cada proceso, sea equivalente, como se muestra en la Figura 5.1.

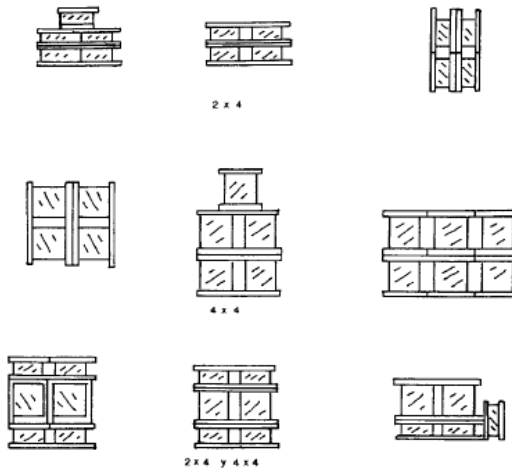


Figura 5.1. Disposición de la leña para el testeo de combustible (Minsal, 2013)

### 5.1.2. Equipos e instrumentos

Se instala el calefactor sobre la balanza, centrando la chimenea bajo la campana del túnel. El montaje se realiza con un sistema telescópico accionado por poleas, que para este caso se utilizó el puente grúa del laboratorio de Termofluidos de la universidad.

Se instalan 5 termocuplas en las paredes externas del calefactor: laterales, superior, inferior y trasera, lo más cerca posible de la cámara de combustión. Como forma de comprobación se midieron temperaturas en las paredes con un termo higrómetro.

Se instala la sonda de muestreo de MP en el ducto recto y la sonda de presión en el ducto primario de la chimenea.

Teniendo todo instalado, se procede a encender el tablero, se ajusta la velocidad del ventilador, de modo que la presión diferencial en el tubo pitot sea de 2 mmca.

Se tara la balanza antes de introducir la carga de combustible.

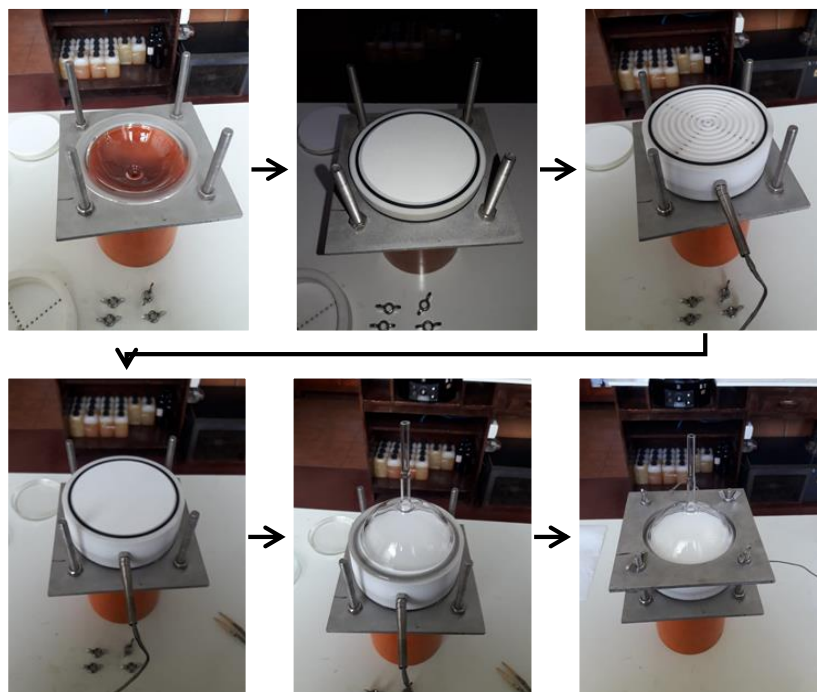
### 5.1.3. Filtros y sistema portafiltros

Para este paso, se recomienda realizarlo con anterioridad para poder monitorear correctamente los procedimientos anteriores al ensayo.

Se debe limpiar la sonda de muestreo, manguera de conexión y el sistema portafiltros con acetona o en su defecto con alcohol etílico.

Los filtros son pesados en la balanza analítica midiendo 5 veces, a los 20, 40, 45, 50 y 60 segundos, para tener un rango de estabilización. Se reconocen como filtro interior y exterior según el orden de impacto, siendo el exterior el que primero impacta.

Se arma el sistema portafiltros con los filtros pesados, Figura 5.2. Procedimiento de armado del sistema portafiltros



*Figura 5.2. Procedimiento de armado del sistema portafiltros*

Se conecta al tren de muestreo, pero considerando que la bomba de succión debe permanecer apagada hasta que comience la fase del ensayo. Como precaución se puede dejar desconectada la manguera de salida del portafiltros, hasta que no comience la medición. Y se conecta la termocupla a un DAQ proporcionado en el laboratorio para controlar la temperatura dentro del sistema para que se mantenga entre 18 y 32 °C

## 5.2. Encendido

Se incorporan astillas y leños menores en la estufa en la disposición antes presentada en la Figura 5.1. Disposición de la leña para el testeo de combustible (Minsal, 2013) Figura 5.1, además se agregaron tres pastillas de parafina y papel de diario con motivo de acelerar el proceso, Figura 5.3. Los leños y astillas deben cumplir con las condiciones de especie y humedad que se usará en la medición. La carga de ignición corresponderá entre el 50% y 80% de la carga de combustible para el ensayo.

Se permite la activación de la combustión manteniendo al máximo la entrada de aire y se abre la puerta de la cámara durante 2 minutos y el cenicero por 1 minuto, luego se cierra y se deja consumir hasta que la masa llegue a un 20-25% de la carga inicial.

Hasta 15 min antes del inicio del ensayo, no se debe abrir la puerta del calefactor por más de 1 minuto en total. Y se podrá usar atizador para acomodar el lecho de brasas.

Se mide la humedad de la carga a ensayar con el xilohigrómetro, en 5 caras de cada trozo para obtener un promedio de humedad. Según la normativa existente el combustible no debe superar el 23% de humedad, pero para este trabajo se utilizarán leños que cumplan y que se encuentren fuera de norma.

Cuando la carga llegue a un 20-25% de la masa y se observen pequeños trozos de leña, se atiza el lecho uniformemente para incorporar la carga de pre ensayo, Figura 5.4.



Figura 5.3. Disposición de carga para el encendido



*Figura 5.4. Lecho de brasas y carga de combustible para el pre ensayo*

### 5.3.Pre ensayo

Se incorpora la carga de pre ensayo y se tara la balanza, para que el proceso parta en cero. O simplemente no tarar y considerar que el pre ensayo deberá llegar hasta que la balanza marque la misma cantidad del inicio del proceso. Los leños se disponen paralelamente entre si y a lo largo de la cámara, Figura 5.4.

Se le dan 3 minutos de activación, 2 minutos con la puerta de la cámara abierta y 1 minuto con el cenicero abierto, luego gradualmente se cierra la entrada de aire al mínimo. Esto se realiza para asegurar que se ha producido la ignición de la carga.

Se cierra la puerta y se ajustan los controles para el pre ensayo. El selector del tablero se coloca en posición L1, correspondiente a la Traversa, para que se enciendan los indicadores necesarios para el cálculo de la velocidad del humo dentro del túnel.

A partir de aquí no se permiten modificaciones en los suministros de aire.

Cada 10 minutos se controlan la temperatura dentro del túnel y que la presión diferencial de los gases en el ducto se mantenga cercano a 0,65 mmca, con alrededor de 8 mediciones se calcula el caudal de muestreo para el ensayo.

Es posible acomodar la carga sólo una vez y si se ha consumido más del 60% del peso y si han transcurrido a lo más 10 minutos sin cambios en el peso ( $< 0,05$  kg de variación). Y el ajuste no puede tardar más de 15 segundos.

El proceso termina cuando la masa llegue a cero en caso que se haya tarado la balanza o al 20-25% de la carga del pre ensayo.

#### 5.4. Ensayo

Con los datos obtenidos en el pre ensayo, se calcula la velocidad de succión isocinética del material particulado y el caudal de muestreo.

El sistema portafiltros debe estar conectado a la lanza de muestreo. El selector se coloca en posición L2.

Se carga el calefactor y se tara la balanza. Se abre la entrada de aire y la puerta de la cámara se mantiene abierta durante 2 minutos y al momento de cerrar la puerta comienza el ensayo. Se enciende la bomba de vacío y se regula el caudal de muestreo calculado, el cenicero se mantiene abierto por 1 minuto para la activación de la carga y se cierra. Se registran las condiciones ambientales.

Pasados 5 minutos se registran las temperaturas de la superficie de la cámara por termocuplas y termo higrómetro. Además, se registran la temperatura de los gases en el ducto y portafiltros, presión diferencial de los gases y la presión de vacío de la bomba cada 10 minutos durante toda la experiencia.

Pasado el periodo de activación, no se permitirán modificaciones. Se debe registrar el tiempo que la puerta se mantuvo abierta, como también los ajustes de los controles de aire.

Es posible acomodar la carga del ensayo sólo una vez durante la medición y si se ha consumido más del 60% y han pasado más de 10 min sin cambios medibles ( $<0,05$  kg). El arreglo no debe tardar más de 15 segundos. Chequear constantemente que no haya variaciones del flujómetro para mantener condición isocinética.

El ensayo termina cuando la balanza marque que la carga se consumió completamente. Se detiene el registro y se desconecta el portafiltros.

Terminado el proceso, se procede a limpiar los artefactos e instrumentos.

## 5.5. Pesaje de filtros

El sistema portafiltros (Figura 5.5) es llevado al laboratorio de Termofluidos para permanecer por 24 horas en un ambiente controlado.

Luego se desarma el sistema y con guantes y una pinza para manipular los filtros se masan de la forma mencionada en la Sección 5.1.3. Para obtener un margen de tolerancia en los valores de masa de los filtros impactados, se mide a los 20, 40, 45, 50 y 60 segundos, de no estabilizarse el valor se registra una sexta medición a los 90 segundos.

Luego de ser pesados, estos filtros se congelan para mantener condiciones y no se alteren características de partículas adheridas.



Figura 5.5. Sistema portafiltros



Figura 5.6. Pesaje filtros impactados

## 6. Resultados experimentales

Se realizaron 4 ensayos de combustión (2 línea base y 2 con incorporación de MPI) de *Eucalyptus Globulus* con diferentes porcentajes de humedad, todos siguieron el procedimiento mencionado en la sección anterior.

La configuración de instalación de los MPI en la cámara de combustión se determinó de acuerdo al análisis presentado en el trabajo de (Muñoz, 2019). La disposición de los MPI en las paredes laterales y trasera fue la que obtuvo los mejores resultados con mínima admisión de aire.

Para este trabajo el material combustible fue trozado con hacha, asegurando condiciones de dimensionado del método CH-28, para simular el uso cotidiano de calefacción residencial.

### 6.1. Temperaturas de la cámara de combustión

Se instalaron termocuplas en las paredes externas lo más cercanas a la cámara de combustión (superior, inferior, derecha, izquierda y trasera), para medir las temperaturas del proceso. La posición de instalación se puede ver en la Figura 6.1.

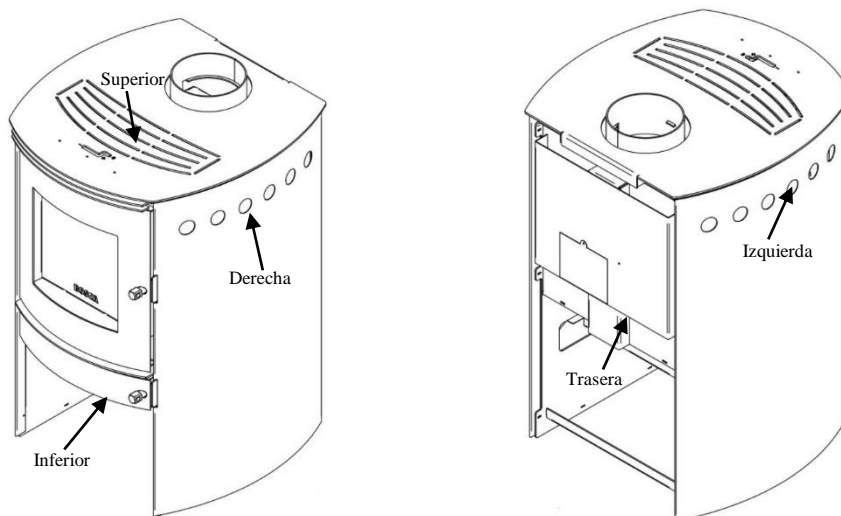


Figura 6.1. Posiciones de las termocuplas lo más cercanas a la cámara de combustión

En la Figura 6.2 se muestra el comportamiento de las temperaturas superficiales.

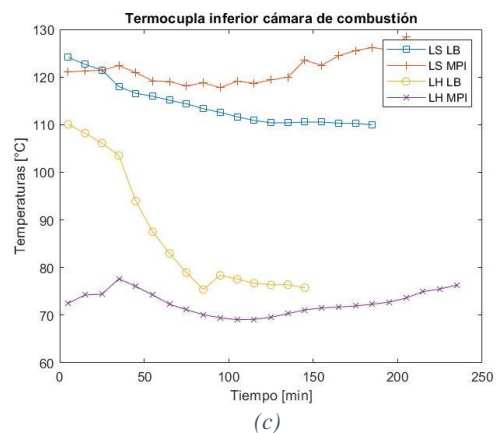
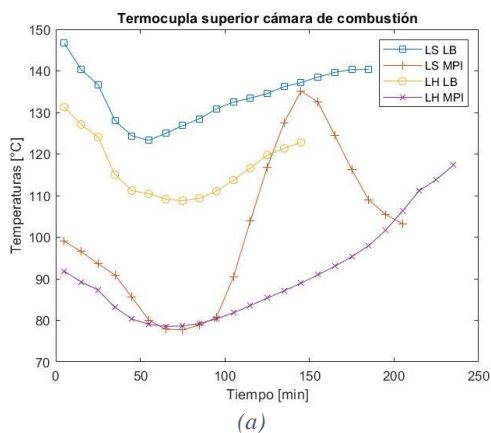
Es posible notar que cada termocupla presenta una curva distinta para un mismo ensayo, esto sólo puede señalar que la carga no se quema homogéneamente. Un ejemplo de esto se aprecia en el ensayo LS LB (Leña Seca-Línea Base) al comparar la parte (e) con (c) y (d). Donde la termocupla trasera inicia con unos 180 °C disminuyendo la temperatura progresivamente, mientras que en el minuto 50 aproximadamente la medición izquierda y derecha comienzan a subir hasta unos 100 y 75 °C, respectivamente.

Sin embargo, la curva LS MPI tiene un comportamiento sinusoidal que se mantiene entre las caras, sólo la termocupla inferior tiene poca variación. Esto puede concluir que la cama de brasa logró conservarse durante la medición hasta el momento de encontrar una astilla o trozo delgado del leño que se encendiera y provocara el alza de las otras curvas.

En los ensayos con leña húmeda se presentaron ventanas de humo, por el alto porcentaje de humedad, que provocó un descenso de la curva a mitad del proceso, debido a la escasez de  $O_2$ .

La línea base mantiene temperaturas por debajo de la leña seca, excepto en la cara superior. Esto puede deberse a que la ventana de humo permitió la concentración de los gases en la sección superior de la cámara.

Luego con los MPI no se alcanzan mayores temperaturas, aunque es posible apreciar un incremento en las curvas superior, derecha y trasera. Esto refleja que en la parte derecho-posterior pudo haber una activación de la carga.



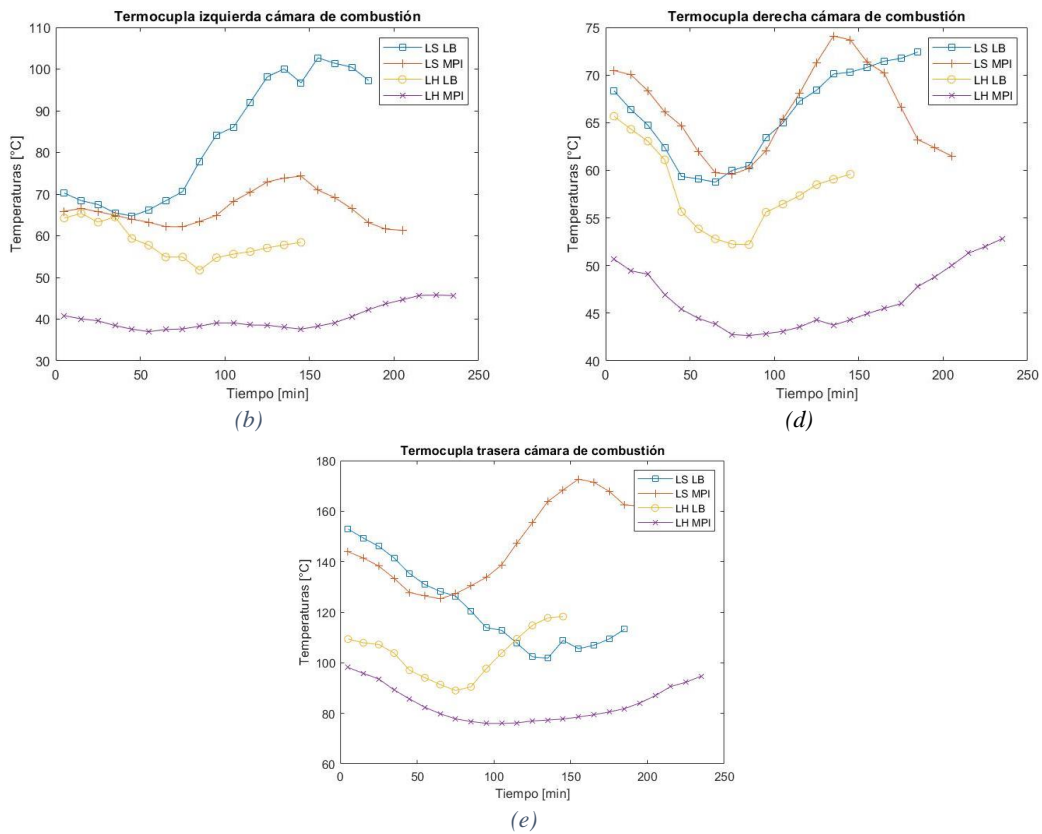


Figura 6.2. Temperaturas superficiales de la cámara por termocupla

## 6.2. Análisis de gases

Cabe destacar que de acuerdo a (Guerrero, 2017), Tabla 6.1, los gases de combustión  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  obtenidos en el proceso de combustión tendrán bajas concentraciones, debido a su escasa participación en la composición elemental en [%m/m] del *Eucalyptus Globulus*.

Tabla 6.1. Composición elemental *Eucalyptus Globulus*, [%m/m] (Guerrero, 2017)

C	H	O	N	S	Cl
49,94	6,46	40,53	0,08	0,022	0,069

Por otro lado, el analizador de gases (TESTO350) registra datos de  $\text{H}_2$  en calidad de compensador del sensor de CO para protegerlo de las altas temperaturas y humedad, al mismo tiempo le permite ampliar su rango de medición. Mientras que el sensor de hidrocarburos viene ajustado de fábrica para medir concentraciones de metano en los gases de combustión.

## 6.2.1. Según % humedad

Las maderas ensayadas se reconocieron como leña seca, con aproximadamente un 11% de humedad, y leña verde, con un 30 % de humedad.

### 6.2.1.1. Leña seca

La Figura 6.3 muestra la emisión de los gases para las mediciones con leña seca. Lo primero a notar es un comportamiento transiente de las concentraciones a comienzos de la medición, lo que corresponde al encendido de la carga del ensayo.

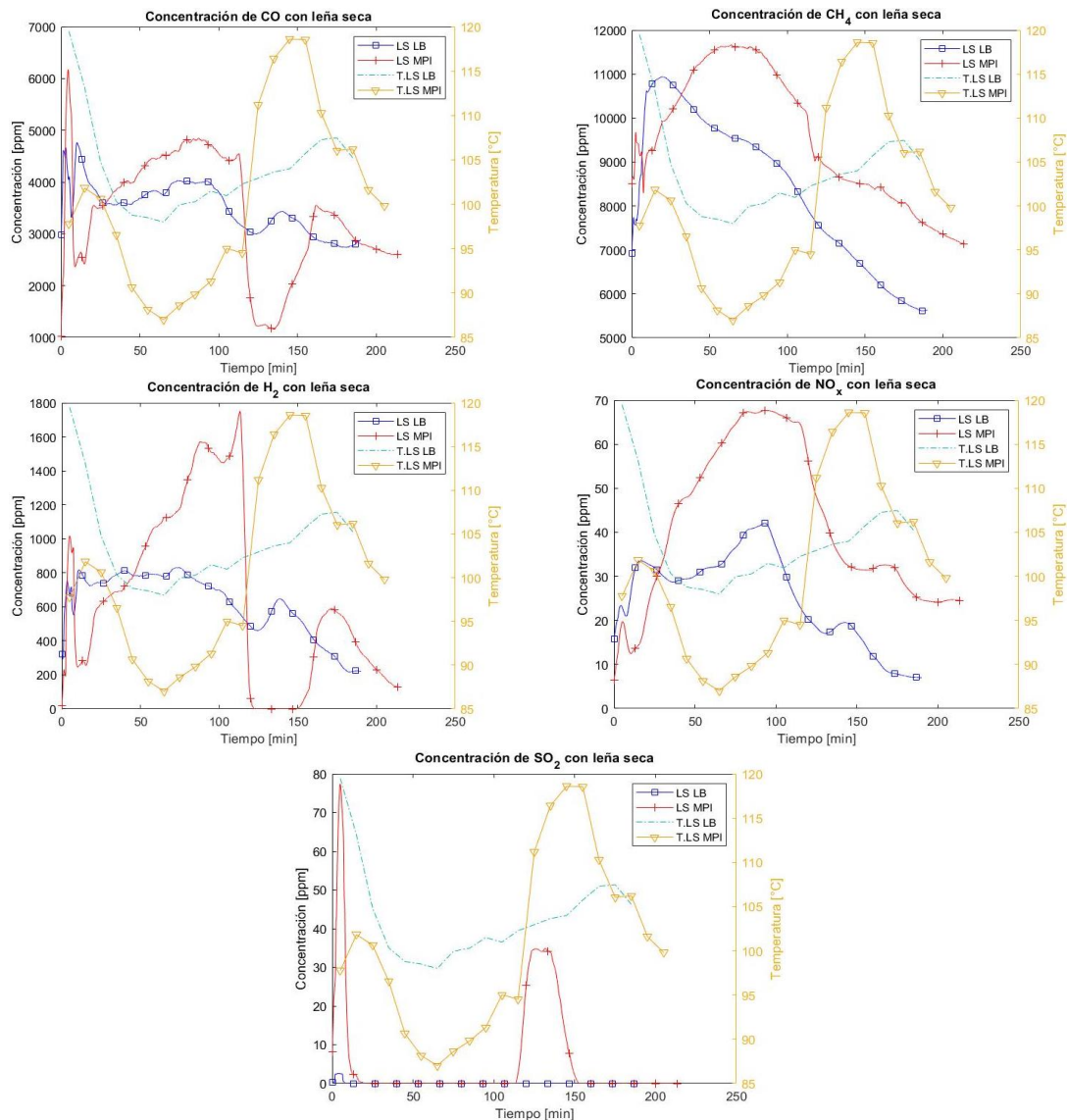


Figura 6.3. Concentraciones de gases para ensayos de leña seca

En las curvas de MPI claramente se aprecia que el encendido de la llama provocó una combustión menos imperfecta, ya que, las emisiones de CO y, por consiguiente, de H<sub>2</sub> disminuyeron durante el período de llama en 3000 y 2000 ppm, respectivamente.

En cambio las emisiones base y con MPI de CH<sub>4</sub> y NO<sub>x</sub>, aumentan significativamente con la disminución de la temperatura entre el minuto 50 y 115.

### 6.2.1.2. Leña húmeda

A continuación, se presentan las concentraciones de los gases para los ensayos de línea base y con incorporación de MPI.

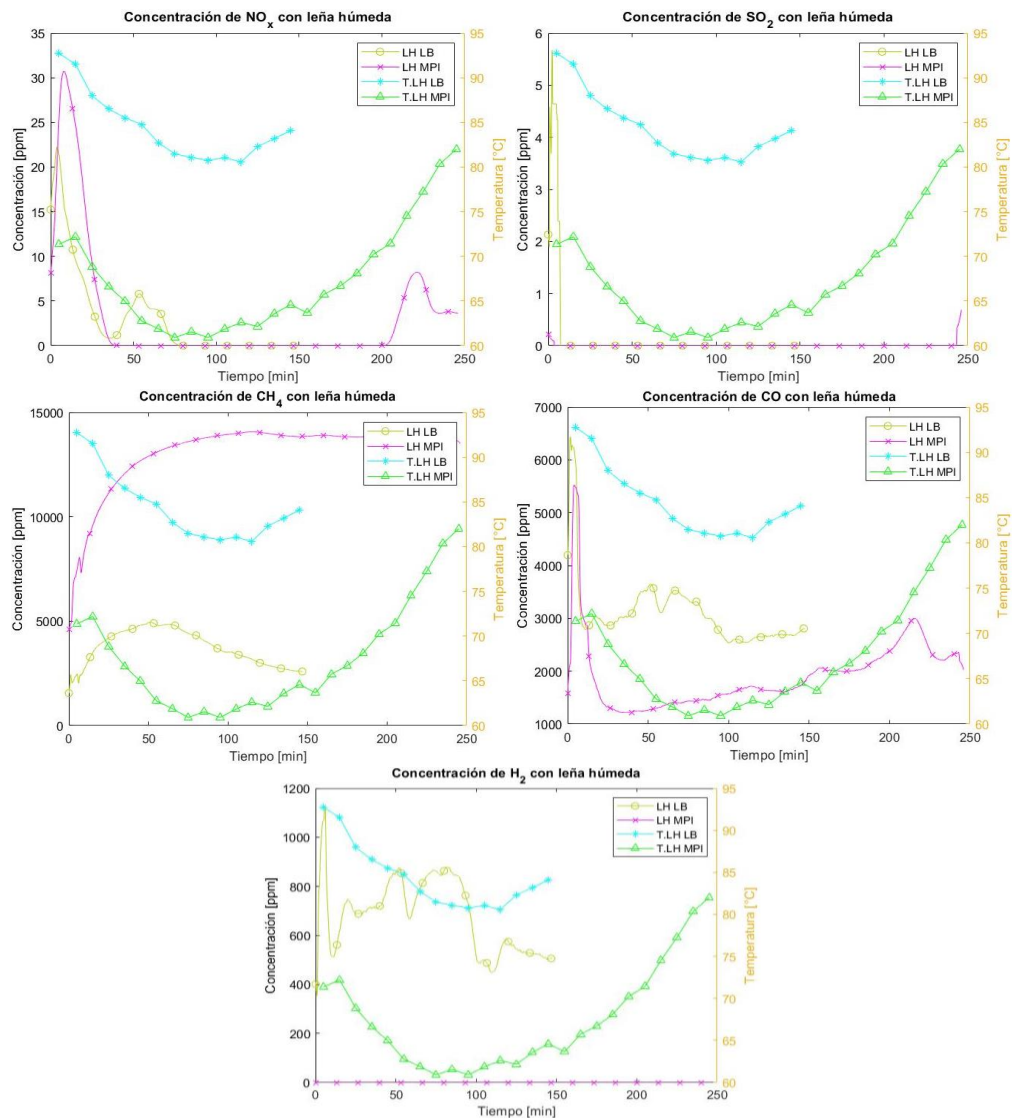


Figura 6.4. Concentraciones de gases para ensayos con leña húmeda

Primero que todo, hay que mencionar que la carga del ensayo en ambos procedimientos no se consumió completamente. Al momento que la balanza marcó el 25% de la masa inicial del pre ensayo, los leños no se encontraban totalmente quemados por lo que no fue posible atizarlos y formar un lecho de brasas homogéneo. Se añadieron los leños del ensayo los que al finalizar la medición seguían sólidos (Figura 6.5) con una carga remanente de 0,99 y 0,8 kg en línea base y MPI, respectivamente.



Figura 6.5. Leños remanentes de los ensayos con leña húmeda

Se observa que la curva de temperatura de la línea base obtuvo mayores valores que cuando se incorporan los MPI, esto se debe a que durante el pre ensayo se presentó una gran ventana de humo que impidió que se alcanzaran altas temperaturas. Aun así, la curva con medios porosos proyecta menores valores de emisión de CO y valores nulos de H<sub>2</sub>, lo que corresponde a un exceso de generación de CH<sub>4</sub>.

En la Figura 6.6 se captura la condensación a la entrada y salida de las copas del portafiltros para ambos ensayos, esto se debe al alto porcentaje de humedad de la leña.

#### 22 dic 20 Línea base



## 23 dic 20 Incorporación de MPI



Figura 6.6. Condensación en las copas del portafiltros

En términos generales, la medición de leña seca con medios porosos tiene valores dentro de un rango menor entre los gases y posiblemente con oportunidad de mejora, ya que, al ver como la activación de la llama redujo la medición durante ese período.

### 6.3. Material particulado gravimétrico

Ver Anexo . Los filtros exteriores (primer impacto) de las mediciones con leña seca muestran mayor masa que los impactados con leña húmeda, lo que corresponde a que los leños verdes no se quemaron completamente y quedó un remanente de la carga.

Ahora, los filtros interiores de ambas líneas de trabajo con MPI muestran mayor impacto que los filtros base, esto puede deberse a que las partículas emitidas en estos procesos son más finas ( $< 2,2 \mu m$ ).

Luego, es posible comparar las masas con la temperatura de los gases de combustión y la temperatura aparente promedio de la cámara, Figura 6.7. Es posible suponer que en el ensayo LS MPI (Leña seca con MPI), el material inerte haya alcanzado temperaturas para las que se aprovechó mejor su capacidad de oxidación de los gases. Por otro lado, el procedimiento LH MPI tuvo las curvas más bajas emitiendo menor masa total de partículas. Esto permite concluir que los MPI cumplen de igual manera con su función de disminuir las emisiones de MP.

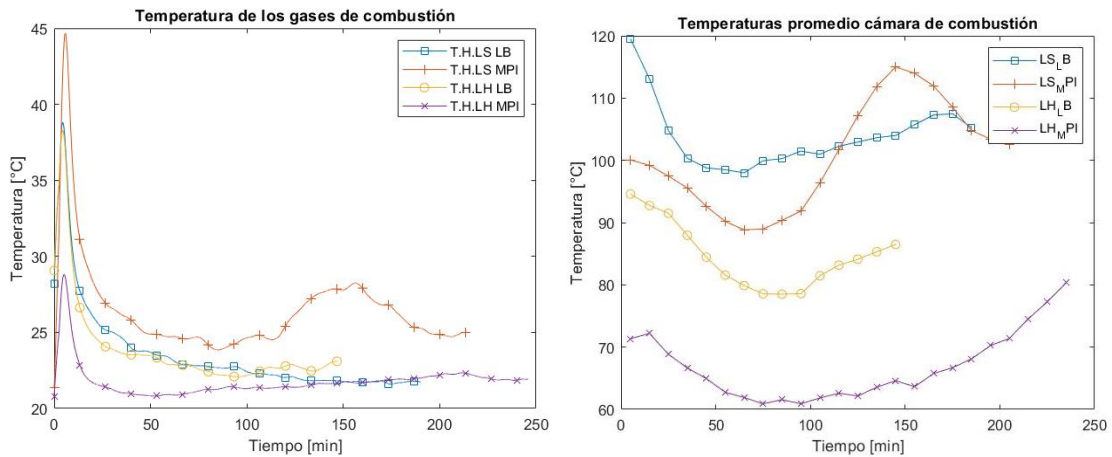


Figura 6.7. Temperatura de los gases y el promedio de la cámara de combustión

Por último, los factores de emisión ,FE, para los 4 ensayos se presentan en la Figura 6.8 mostrando a simple vista el efecto de los MPI, ya que, en ambas categorías (Leña Seca y Leña Húmeda) este procedimiento obtuvo menores emisiones de partícula por carga de combustible.

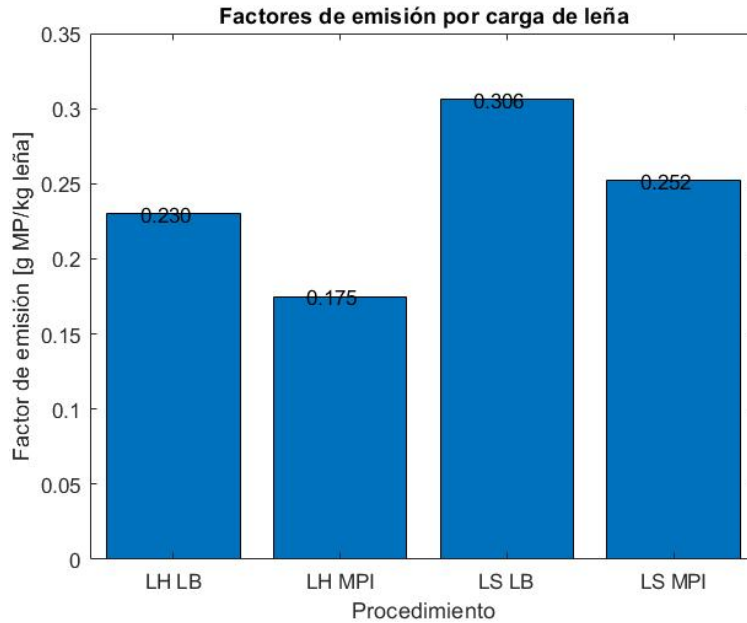


Figura 6.8. Factor de emisión de cada procedimiento

Pero en términos generales la leña verde consiguió factores más bajos que la leña seca. Lo que lleva a pensar que se debe a que esos procedimientos terminaron con carga

remanente de 0,99 y 0,8 kg en línea base y con MPI, respectivamente. Es por esto que se calcularon los factores de emisión por la masa de combustible consumido y se muestran en la Figura 6.9.

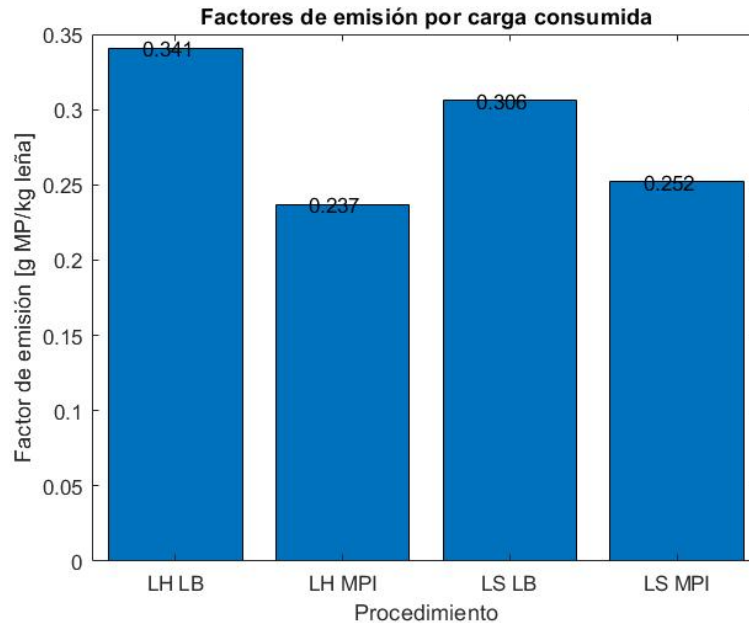


Figura 6.9. Factores de emisión por carga consumida

Con estos resultados, queda más visible que la emisión base de leña húmeda es mayor respecto a la carga consumida, incluso mayor que ambos ensayos de leña seca. Sin embargo, la leña verde con incorporación de MPI sigue por debajo del proceso LS MPI, aunque hay que recordar la condensación captada en las copas del portafiltros (Figura 6.6). El agua y partículas residuales en el cuello de la copa puede ser el efecto de los resultados de FE obtenidos de LH MPI.

## 7. Conclusiones

En la presente investigación se operó un calefactor residencial BOSCA Spirit 380 con incorporación de medios porosos inertes, en la mejor configuración determinada en trabajos previos.

Los procedimientos realizados se guiaron por el Método CH-5G y CH-28 dictados por el Ministerio de Salud, normativa vigente nacional para la determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña. Se utilizó leña con distintos porcentajes de humedad (11 y 30%) y se implementó un túnel de dilución.

De los procesos ensayados con leña seca se logran las mayores temperaturas ( $\sim 80$  °C en las caras laterales externas y  $\sim 120$  °C en las otras), a excepción de la termocupla superior de LS MPI que queda aproximadamente 30 °C por debajo de la LH LB. Se considera positivo el efecto de los medios porosos inertes que permiten recircular el calor en la zona inferior de la cámara. Por otro lado, la leña verde tiene promedios de temperaturas menores ( $< 100$  °C para LH LB y  $< 80$  °C para LH MPI), debido a la energía necesaria para evaporar el exceso de agua que contiene.

También se observa que al implementar los medios porosos existe una disminución de material particulado total por carga ingresada igual a 0,055 [g MP/kg leña] para la leña húmeda y 0,054 [g MP/kg leña] para la leña seca. Para la carga consumida se tiene una disminución de 0,104 y 0,054 [g MP/kg leña] para leña húmeda y seca, respectivamente. Así los resultados con MPI demuestran que efectivamente reducen las emisiones de partículas, independiente de si se alcanzan altas temperaturas.

Respecto al análisis de gases se determinó que en todos los ensayos se obtuvo una combustión imperfecta, debido a las altas concentraciones de CO y CH<sub>4</sub> emitidas, llegando cerca de los 7000 y 14000 ppm, respectivamente.

## 8. Recomendaciones

Se presentan sugerencias para los procedimientos y mejoras a realizar en la cámara de combustión del calefactor:

- Utilizar medios porosos con mayor diámetro de poro, para de esta forma aumentar la entrada de aire y así elevar las temperaturas de combustión.
- Realizar ensayos con medio poroso en la sección superior de la cámara para disminuir la concentración de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$  en los gases.
- Modificar la metodología del MINSAL para ensayos con leña verde, ya que al término del pre ensayo no se logra tener un lecho homogéneo de brasas. Probar con leña seca para el pre ensayo y cargar leña húmeda en el ensayo.

## Referencias

- (s.f.). Obtenido de Sodimac: <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/content/a70069/como-elegir-el-mejor-sistema-de-calefaccion/>
- (16 de Agosto de 2011). Obtenido de Blogger: <http://limtufas.blogspot.com/2011/08/funcionamiento-de-los-artefactos-de.html>
- Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. (2013). Obtenido de [https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr221\\_E.pdf](https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf)
- AirVisual, I. (2018). *World Air Quality Report*.
- Anca-Couce, A., & Zobel, N. (2012). *Numerical analysis of a biomass pyrolysis particle model: Solution method optimized for the coupling to reactor models*. Berlin: Elsevier.
- Bellais, M., Davidsson, K., Liliedahl, T., Sjöström, K., & Pettersson, J. (2003). *Pyrolysis of large wood particles: study of shrinkage importance in simulations*. Fuel.
- BOSCA. (s.f.). *Spirit 380*. Obtenido de <https://www.bosca.cl/producto/spirit-380-inox/>
- Cereceda-Balic, F., Toledo, M., Vial, V., Guerrero, F., Diaz-Robles, L., Petit-Breuilh, X., & Lapuerta, M. (2017). *Emission factors for PM2.5, CO, CO2, NOx, SO2 and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3CE*. Sci Total Environ.
- CEUPE. (s.f.). *Centro Europeo de Postgrado*. Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-lena.html>
- CEUPE, C. E. (s.f.). Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-lena.html>
- Chan, W.-C., Kelbon, M., & Krieger, B. (1985). *Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle*. Seattle: Fuel.
- CNE. (2019). *Anuario Estadístico de Energía*.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT). (2015). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.
- Di Blasi, C. (1996). *Heat, momentum and mass transport through a shrinking biomass particle exposed to thermal radiation*. Napoli: Chemical Engineering Science.

- Electricidad*. (12 de diciembre de 2019). Obtenido de La revista energética de Chile: <https://www.revistaei.cl/2019/12/12/consumo-energetico-residencial-superolos-50-000-gwh-en-2018/>
- Facultad de Ciencias Forestales, U. J. (2015). *Caracterización Bioenergética de los Residuos de Cosecha de las Principales Especies Forestales del Noroeste de España*.
- FAO. (14 de Octubre de 2019). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de <http://www.fao.org/forestry/energy/es/>
- Gronli, M. (1996). *Atheoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass*. Ph. D. thesis. Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology.
- Guerrero, F. (2017). *Determinación de trazadores moleculares, cocientes de concentración y factores de emisión para contaminantes seleccionados generados por la combustión de Eucalyptus Globulus, Nothofagus Obliqua y Pinus Radiata en una cámara de combustión controlada 3C-Emi*.
- Hagge, M., & Bryden, K. (2002). *Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass*. Ames: Chemical engineering Science.
- Instituto para la Salud Geoambiental*. (4 de abril de 2020). Obtenido de <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado#:~:text=Se%20denomina%20material%20particulado%20a,de%20la%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire.>
- IPSUSS. (11 de junio de 2018). *Instituto de Políticas Públicas en Salud*. Obtenido de <http://www.ipsuss.cl/ipsuss/estadisticas-e-indicadores/particulas-contaminantes/2018-06-11/132257.html>
- Jimenez, J., Farias, O., Quiroz, R., & Yañez, J. (2017). *Emission factors of particulate matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, and levoglucosan from wood combustion in south-central Chile*. Taylor & Francis.
- Kersten, S., Wang, X., Prins, W., & van Swaij, W. (2005). *Biomass Pyrolysis in a Fluidized Bed Reactor. Part I: Literature Review and Model Simulations*. Ind. Eng. Chem. Res.
- Liden, A., Berruti, F., & Scott, D. (1988). *A kinetic model for the production of liquid from the flash pyrolysis of biomass*. Chem. Eng. Commun.


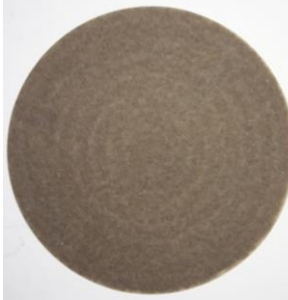



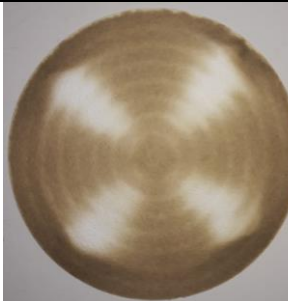


- MAPFRE. (29 de septiembre de 2020). Obtenido de Hogar MAPFRE:  
<https://www.hogar.mapfre.es/hogar/vivienda/cocinas-de-lena-en-casa-como-funcionan/>
- MinEnergía. (2016). *Política de Uso de la Leña y sus derivados*.
- MINSAL. (2012). *DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE PARTÍCULAS DE CALEFACTORES A LEÑA MEDIDAS DESDE UN TÚNEL DE DILUCIÓN*.
- Minsal. (2013). *Método CH-28 DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO Y CERTIFICACIÓN Y AUDITORÍA DE CALEFACTORES A LEÑA*. Instituto de Salud Pública.
- MMA. (2019). *Quinto reporte del Estado del Medio Ambiente*.
- MMA. (2020). *Informe del Estado del Medio Ambiente*. Santiago de Chile.
- Muñoz, F. (2019). *Análisis de emisión de material particulado en el proceso de combustión de leña en estufa de calefacción residencial con el uso de esponjas cerámicas*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Olaya, R. (2017). *Caracterización mecánica de espumas cerámicas de Zirconio y Carburo de Silicio*.
- Oyarzún, M. (2010). *Contaminación aérea y sus efectos en la salud*. Rev Chil Enf Respir.
- Plantas de Biomasa*. (2013). Obtenido de <http://www.plantasdebiomasa.net/que-es-la-biomasa.html#:~:text=QUE%20ES%20LA%20BIOMASA,susceptible%20de%20ser%20aprovechada%20energ%C3%A9ticamente>.
- Química, R. (24 de junio de 2011). Obtenido de <https://revistaquimica.cl/?p=598>
- Reid, R., & Sherwood, T. (1959). *The properties of Gases and Liquids*. Washington: Physics Today.
- SEC. (2020). *Superintendencia de Electricidad y Combustibles*. Obtenido de <https://www.sec.cl/calefactores-a-lena/>
- Seljeskog, M., & Goile, F. (2013). *Particle emission factors for wood stove firing in Norway*. SINTEF Energy Research.
- Sobhani, S., Legg, J., F. Bartz, D., J. Kojima, J., T. Chang, C., D. Sullivan, J., . . . Ihme, M. (2020). Experimental investigation of lean premixed pre-vaporized liquid-fuel combustion in porous media burners at elevated pressures up to 20 bar. En *Combustion and Flame* (págs. 123-134).

Universidad Austral de Chile. (2013). *Estudio de la factibilidad de un sistema eficiente de calefacción para la ciudad de Temuco.*

Universidad de la Frontera. (2015). *Disponibilidad y potencial energético de la biomasa del bosque nativo para el desarrollo de la dendroenergía en el centro-sur de Chile.*

## Anexo A

Tabla 0.1. Masas de partículas impactadas en los filtros ensayados

	LEÑA SECA		LEÑA HÚMEDA	
	Línea base	MPI	Línea base	MPI
<b>Humedad</b>	11,9 %	10,5 %	30,5 %	30 %
<b>Filtro exterior</b>				
<b>Masa partículas [g]</b>	0,9234	0,8047	0,6635	0,4660
<b>Filtro interior</b>				
<b>Masa partículas [g]</b>	0,0147	0,0909	0,0357	0,0680
<b>Masa total partículas [g]</b>	0,9381	0,8956	0,6692	0,5340