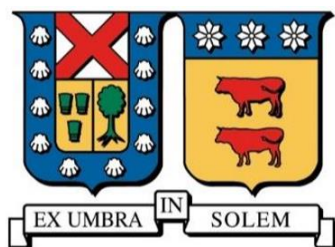


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA
ESTUFA DE CALEFACCIÓN RESIDENCIAL
DE PELLETS AL IMPLEMENTAR MEDIOS
POROSOS EN SU PROCESO DE
COMBUSTIÓN”**

DIEGO ANDRÉS ALVARADO OYARZÚN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.

PROFESOR CO-REFERENTE: DR. HERNÁN OLGUÍN A.

NOVIEMBRE - 2019

RESUMEN

En la presente investigación se realizaron mediciones experimentales en una estufa de calefacción residencial a pellets, a la cual se le modificó la cámara de combustión implementando medios porosos inertes en el proceso de combustión para determinar las diferencias en las emisiones de material particulado producidas.

Los ensayos a la estufa fueron realizados en colaboración con la empresa “Ingeniería en combustión Bosca Chile S.A” y se llevaron a cabo en sus dependencias en la ciudad de Santiago de Chile, donde estaban los equipos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Para determinar las emisiones de material particulado total se utilizó un túnel de dilución basándose en las indicaciones expuestas por el método CH28 y el método CH5G, con lo cual se lograron resultados de una medición offline utilizando un método por gravimetría.

Los ensayos fueron realizados a tres tipos distintos de configuraciones en la estufa a pellets: estufa en su estado original (configuración base); estufa con medio poroso bajo el quemador (configuración 1) y estufa con medio poroso sobre la llama (configuración 2). Para cada configuración se hicieron como mínimo 3 ensayos de medición de material particulado a diferentes tasas de quemado, y se calculó el valor ponderado para cada configuración con el uso de una tabla de probabilidad de tasa de quemado. También se hicieron mediciones de temperaturas en las paredes exteriores y de la tolva de la estufa para cada configuración.

Se obtuvieron resultados positivos utilizando la configuración con el medio poroso sobre la llama, donde se logró una disminución del 11,59% en la emisión de material particulado total con respecto a la estufa en su estado original, la cual tiene una emisión de 1,0282 [g/h]. Además, se calculó el factor de emisión para determinar el material particulado emitido por kilogramo de combustible quemado, logrando una disminución del 12,28% respecto al valor de 0,8117[g/kg], correspondiente al factor de emisión de la configuración base. Con respecto a las temperaturas de las paredes de la estufa, se observó un aumento del promedio de éstas para ambos casos en los que se utilizaron medios porosos inertes (8,04% en la configuración

1 y 3,27 % en la configuración 2) respecto de los 65,19 °C de la configuración base, lo que implica una mejora en la transferencia de calor hacia el ambiente.

Palabras clave: combustión, medios porosos inertes, estufa a pellets, emisión de material particulado, túnel de dilución.

ABSTRACT

In the present investigation, experimental measurements were made in a residential heating pellet stove, in which the combustion chamber was modified when implementing inert porous media in the combustion process to determine the differences in emissions of particulate material produced.

The tests on the stove were made collaborating with the company “Ingeniería en combustión Bosca Chile S.A” and took place in the campus in Santiago de Chile city, where the necessary equipment for the development of the research was.

To determine the total particulate material emissions, a dilution tunnel was used based on the indications provided by the CH28 method and the CH5G method, and results were obtained from an offline measurement using a gravimetric method.

The tests were made to three different configurations inside the pellet stove: stove in its original status (base configuration); stove with porous inert media under the burner (configuration 1) and stove with inert porous media on the flame (configuration 2). For each configuration, at least three tests of particulate material at different burn rates were performed, and the final result for each configuration was calculated using a burn rate probability table. Temperature measurements were also made on the exterior walls and of the stove hopper for each configuration.

Positive results were obtained using the configuration with the inert porous media on the flame, in which it decreased by 11.59% in emissions of total particulate material with respect to the stove in its original state (emission of particulate material of 1,0282 [g/h]). In addition, the emission factor was calculated to determine the particulate material emitted per kilogram of fuel burned, getting a decrease of 12.28% with respect to the stove in its original state (emission factor of 0,8117[g/kg]). Moreover, temperature averages on the stove's walls increased in the configuration 1 (8,04%) and configuration 2 (3,27%) with respect to the stove in its original state (temperature average of 65,19 °C), which implies a better heat transfer to the environment using inert porous media.

Keywords: combustion, inert porous media, pellets stove, emissions of particulate material, dilution tunnel.

GLOSARIO

Siglas

[MP]:	Material particulado
[MP10]:	Material particulado con diámetro menor a 10 [μm]
[MP2,5]:	Material particulado con diámetro menor a 2,5 [μm]
[D.S.]:	Decreto Supremo
[EMRP]:	Estación de monitoreo con representación poblacional
[MPI]:	Medios porosos inertes
[NCh]:	Normas chilenas

GLOSARIO

Unidades

[mm]:	Milímetro
[°C]:	Grados Celsius
[m^3]:	Metro cúbico
[kg]:	Kilogramo
[kcal]:	Kilocaloría
[MJ]:	Mega Joule
[K]:	Kelvin
[kW]:	Kilo Watts
[MWh]:	Mega Watts hora
[CLP]:	Peso chileno
[μm]:	Micro metro
[$m^3 N$]:	Metro cúbico normal
[μg]:	Micro gramo
[Sm^3]:	Standard metro cúbico
[s]:	Segundo
[min]:	Minuto
[h]:	Hora
[mm ca]:	Milímetro columna de agua

[mm Hg]: Milímetro de mercurio

ÍNDICE GENERAL

Resumen	i
Abstract.....	iii
Glosario.....	v
Índice de figuras	xi
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de gráficos.....	xiv
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
3. Marco Teórico	3
3.1. Sistemas de calefacción	3
3.1.1. Calefacción con radiadores de agua	3
3.1.2. Calefacción de gasóleo.....	3
3.1.3. Calefacción eléctrica	3
3.1.4. Calefacción en paredes.....	4
3.1.5. Calefacción por paneles radiantes	4
3.1.6. Caloventores eléctricos	4
3.1.7. Estufas a etanol.....	5
3.1.8. Calefacción por biomasa	5
3.2. Pellet como combustible	6
3.2.1. Características Técnicas	6
3.2.2. El pellet frente a otros combustibles.....	7
3.2.3. Uso del pellet en Chile	12
3.3. Estufas a pellet	16

3.4.	Tecnologías en estufas a pellet	18
3.4.1.	Estufas de aire caliente de pellet	18
3.4.2.	Estufas de aire caliente a pellet canalizadas	18
3.4.3.	Hidroestufa o Termoestufa a pellet	18
3.4.4.	Estufa insertable de aire caliente a pellet.....	19
3.4.5.	Hidroestufa insertable.....	20
3.4.6.	Estufa combinada de madera y pellet	20
3.4.7.	Calderas a pellet.....	21
3.5.	Tecnologías y estufas disponibles en Chile	22
3.6.	Impacto ambiental de estufas a pellet	24
3.6.1.	Material Particulado	24
3.6.2.	Normas primarias de calidad del aire en Chile.....	24
3.6.3.	Estado de contaminación por material particulado en Chile	27
3.6.4.	Norma de emisión de material particulado en estufas de calefacción residencial.....	31
3.7.	Medios porosos inertes	33
3.7.1.	Cerámicas porosas	34
4.	Cálculo del material particulado total en estufas a pellets	36
4.1.	Metodología del ensayo	38
4.1.1.	Procedimientos y cálculos realizados por el programa utilizado	39
4.1.2.	Valor final de material particulado total calculado	44
4.2.	Descripción del lugar del ensayo	46
4.3.	Equipos utilizados en el ensayo	47
4.3.1.	Túnel de dilución	47
4.3.2.	Equipos Anexos.....	50

4.4.	Procedimiento del ensayo	54
4.5.	Características de estufa a ensayar.....	56
4.6.	Medio poroso utilizado	57
4.7.	Configuraciones de ensayo	58
4.7.1.	Configuración Base	58
4.7.2.	Configuración 1	58
4.7.3.	Configuración 2	59
4.8.	Resultados.....	61
4.8.1.	Temperaturas en la estufa.....	61
4.8.2.	Emisión de Material Particulado total	62
4.8.3.	Factor de emisión	66
4.8.4.	Análisis de impacto al implementar medios porosos inertes.....	67
5.	Análisis de resultados.....	70
5.1.	Cumplimiento de la norma	70
5.2.	Validez de la Investigación.....	72
5.3.	Conclusiones Generales	73
5.4.	Sugerencias para futuras investigaciones	76
6.	Referencias	78
7.	Anexos.....	82
7.1.	Definiciones	82
7.2.	Plataforma Excel utilizada	84
7.2.1.	Material Particulado	84
7.2.2.	Registro.....	85
7.2.3.	Informe	86
7.3.	Estado de filtros al finalizar los ensayos.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Proceso de fabricación de pellets.	6
Figura 3.2: Estufa a pellets	16
Figura 3.3: Distribución de calor en un hogar con una estufa de aire canalizable.	18
Figura 3.4: Distribución de calor en un hogar con una Hidroestufa.	19
Figura 3.5: Estufa insertable de aire caliente a pellets.	19
Figura 3.6: Hidroestufa insertable a pellet.....	20
Figura 3.7: Estufa combinada marca "rika"	21
Figura 3.8: Caldera a pellet típica.....	21
Figura 3.9: Medios porosos inertes.....	33
Figura 4.10: Detalles de construcción recomendados para túnel de dilución según norma CH5G.....	36
Figura 4.11: Muestreo isocinético de partículas	39
Figura 4.12: Espacio donde se ubica el sistema de control para ensayos.....	46
Figura 4.13: Panel del aparato de control	47
Figura 4.14: Enfriador de gases	48
Figura 4.15: Bomba de vacío.....	49
Figura 4.16: Porta filtros.....	49
Figura 4.17: Ventilador	50
Figura 4.18: Balanza Analítica Radwag A220.R2	51
Figura 4.19: Báscula Mettler Toledo BBA231.....	51
Figura 4.20: Termómetro láser CHY 110.....	52
Figura 4.21: Termómetro digital MASTECH MS6514	53
Figura 4.22: Filtro Whatman	53
Figura 4.23: Estufa a pellets Bosca Hera+	56
Figura 4.24: Cerámica porosa utilizada.....	57
Figura 4.25: Configuración 1	58
Figura 4.26: Quemador modificado.....	59
Figura 4.27: Costra formada con el quemador modificado	59
Figura 4.28: Configuración 2	60

Figura 4.29: Pared trasera de la cámara de combustión en configuración 2	60
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características técnicas típicas del pellet	7
Tabla 3.2: Poder calorífico de distintas especies de madera según el porcentaje de humedad	9
Tabla 3.3: Características y precios en el mercado chileno de leña y pellet	10
Tabla 3.4: Estufas del mercado chileno.....	22
Tabla 3.5: Norma primaria de calidad del aire para material particulado fino MP2,5.....	25
Tabla 3.6: Norma primaria de calidad del aire para material particulado grueso MP10.....	26
Tabla 3.7: Mortalidad y Morbilidad asociada a la exposición a material particulado fino (MP2,5), 2017.....	31
Tabla 3.8: Límites de emisión de MP en estufas de calefacción residencial	32
Tabla 3.9: Propiedades físicas de la alúmina y zirconia.....	35
Tabla 4.1: Categorías de velocidad de quemado (promedio base seca)	38
Tabla 4.2: Ubicación de los puntos de travesa sobre el diámetro	41
Tabla 4.3: Probabilidad de tasa de quemado	44
Tabla 4.4: Procedimiento de ensayo.....	54
Tabla 4.5: Características técnicas estufa a pellets Bosca Hera+	56
Tabla 4.6: Temperaturas promedio paredes y tolva	61
Tabla 4.7: Resultados de emisión de material particulado total	63
Tabla 4.8: Emisiones ponderadas de material particulado total	65
Tabla 4.9: Tasa de quemado	66
Tabla 4.10: Factor de emisión	66
Tabla 4.11: Consumo promedio de pellets por región.....	67
Tabla 4.12: Emisión de MP total por región en kg.....	69
Tabla 5.1: Resumen de resultados	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Total de la oferta de energía primaria en Tera calorías para año 2007, 2016 y 2017	13
Gráfico 3.2: Total del consumo energético en Tera calorías para año 2007, 2016 y 2017 ..	14
Gráfico 3.3: Oferta y demanda de pellets, año 2011 - 2018	15
Gráfico 3.4: Promedio trianual de concentraciones de material particulado fino (MP2,5) en estaciones de monitoreo del país,2017	27
Gráfico 3.5: Percentil 98 de las concentraciones diarias de material particulado fino (MP2,5) en estaciones de monitoreo del país, 2017	28
Gráfico 3.6: Promedio trianual de concentraciones de material particulado grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017.	28
Gráfico 3.7: Percentil 98 de las concentraciones diarias de material particulado grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017.....	29
Gráfico 3.8: Emisiones de material particulado fino (MP2,5) por región y tipo de fuente ..	30
Gráfico 4.1: Temperaturas promedio paredes y tolva de la estufa	62
Gráfico 4.2: Emisión de material particulado total por nivel de tiraje	64
Gráfico 4.3: Emisiones ponderadas de material particulado total	65
Gráfico 4.4: Factor de emisión	67
Gráfico 5.1: Tasa promedio de emisión de distintas configuraciones en comparación con la norma	70

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha comenzado a considerar el uso de energías renovables en el mundo industrial, como reemplazo de las energías convencionales provenientes de combustibles fósiles. Esto es debido a que la demanda energética ha crecido considerablemente lo cual hace llamativo el uso de fuentes de energías inagotables y limpias.

En Chile existe una gran cantidad de fuentes energéticas renovables, como por ejemplo, una alta radiación solar en variados sectores, gran cantidad de energía proveniente del mar, o los innumerables bosques de donde extraer biomasa. No obstante, resulta imposible abastecer a la población solo con estos tipos de energía, por lo que se han ido implementando lentamente el uso de ellas.

Por otra parte, la contaminación provocada al generar energía es un tema preocupante en la actualidad. Distintas fuentes pueden emitir gases contaminantes capaces de dañar la salud de los seres vivos e impactar negativamente al medio ambiente. Dentro de estas fuentes contaminantes, se encuentra la combustión de biomasa, la cual se combustiona en estufas a leña o a pellets para calefaccionar los hogares.

La biomasa es una de las energías renovables más utilizadas en Chile debido a su gran disponibilidad en las zonas centro – sur del país, y es utilizada principalmente para calefacción residencial. En un principio, solo existían estufas a base de leña, pero en las últimas décadas se ha ido implementando el uso de estufas a base de pellets, que ofrece una combustión más limpia.

En la presente investigación se pretende estudiar el comportamiento de una estufa que combustiona pellet, a la cual se le introducirá un medio poroso inerte para determinar si existe alguna mejora en el proceso de combustión, principalmente en la cantidad de emisión de material particulado. Para esto, se utilizará un túnel de dilución y se determinará la emisión de material particulado total mediante un método gravimétrico. Además, se compararán los valores obtenidos con los límites de emisión expuestos por la norma chilena.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

En el marco de un proyecto de colaboración con BOSCA Chile, el presente trabajo de título tiene como objetivo principal analizar el material particulado (MP2,5 y MP10) emitido por una estufa a pellets, además de los demás gases contaminantes, y comparar los resultados para una combustión con y sin adición de medios porosos.

Objetivos Específicos

- Comprender el funcionamiento de estufas a base de biomasa.
- Implementar sistemas de medición de temperatura, medición de emisión de gases y material particulado para la estufa a pellets BOSCA.
- Modificar la cámara de combustión de la estufa a pellets para incluir esponjas cerámicas en la base de ésta.
- Evaluar las mejoras en el proceso de combustión con la implementación del medio poroso inerte.
- Estudiar los resultados obtenidos para ambos casos y determinar si cumplen con las normas de emisión vigentes en Chile.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

En la actualidad se han implementado diversos sistemas que son capaces de elevar la temperatura ambiente de un lugar específico, esto con el fin de mejorar la calidad de vida del ser humano aportando un lugar más cálido donde habitar. Algunos de estos sistemas de calefacción son:

3.1.1. Calefacción con radiadores de agua

La calefacción con radiadores de agua es uno de los sistemas de calefacción más utilizados en la actualidad debido a que es un método de calefacción simple, de alto rendimiento y que presenta un bajo costo. Teniendo en cuenta que la caldera que alimentara esta calefacción con radiadores de agua, estará dentro de un cuarto de máquinas, en la terraza o en lugares donde no sea visible. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.2. Calefacción de gasóleo

Utiliza el compuesto Gasoil C, más conocido como Gasóleo, por lo tanto, el costo de mantener este tipo de calefacción está sujeta a las variaciones del precio del petróleo. La calefacción de gasoil tiene una seguridad garantizada gracias a ciertos dispositivos que se pueden agregar o que ya forman parte del sistema de Calefacción de Gasóleo. Algunos de estos artefactos incluyen el regulador o limitador que sirve para reducir el gasto de temperatura en función de las necesidades de climatización. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.3. Calefacción eléctrica

El funcionamiento de este sistema de calefacción se aplica sobre los mismos principios teóricos físicos y químicos, a saber: son dispositivos que vienen en forma de radiadores que a su vez son convectores de fluidos que toman la energía desde una toma de la electricidad y el calor producido es difundido por toda la habitación o edificación mediante el uso de un radiador de aluminio. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.4. Calefacción en paredes

Esto se trata de convertir toda la superficie de las paredes de una edificación, ya sea una casa, un local, una industria, en un gran panel radiante. Mediante la instalación de este sistema, conseguimos que al calentarse transmitan su energía térmica a los objetos que lo rodean y que se encuentran ubicados dentro del ambiente donde está instalada esta calefacción en paredes. Todos los elementos que conforman la decoración en los espacios deben conseguir el contraste deseado. Para conseguir esto, debemos tener en cuenta la climatización y el confort ideal, la instalación de la lámina calefactor no se va a encontrar expuesta a la vista de las personas. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.5. Calefacción por paneles radiantes

Tal como su nombre lo indica los paneles radiantes, son unos paneles que se colocan en la mayoría de los casos en que se los instala, en los techos de los hogares, o de los locales, así como también puede dejárselos suspendidos sin llegar a ser colocados sobre el mismo techo. En algunos otros casos se las coloca sobre las paredes o sobre los mobiliarios. Permitiendo en todos los casos ahorrar grandes espacios. Hay que destacar que la calefacción mediante paneles radiantes es indirecta, ya que el calor se transmite desde los paneles, los cuales se encargan de emitir el calor hacia el aire del lugar en donde dicho sistema esté instalado. Uno de los principales beneficios que tiene este sistema de calefacción es que no se produce ninguna pérdida de calor cuando el trayecto se produce desde el techo hacia el suelo, ya que los paneles lo que generan es una distribución pareja y uniforme de la temperatura. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.6. Caloventores eléctricos

Es un sistema de calefacción muy útil en la actualidad, debido a que no es necesaria la instalación en ningún aspecto más que enchufar el caloventor a una toma de electricidad. Este artefacto se puede encontrar en distintos tamaños y modelos, de acuerdo a la necesidad del consumidor, gustos y estilos. Como su nombre lo indica, este tipo de calefacción se encarga de transformar el aire frío que hay en el ambiente en aire caliente, a través de un proceso de

inducción y expulsión del aire que no contamina en lo absoluto. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.7. Estufas a etanol

Por la versatilidad de los diseños de sus chimeneas se pueden utilizar en cualquier habitación, sala, o en espacios exteriores. Su uso está recomendado para casas, restaurantes, departamentos, tiendas, spa o casas de descanso. Las chimeneas a etanol, son el primer producto que se usa con este tipo de combustible, a través del cual, se obtiene una combustión que evita la contaminación intradomiciliaria, permitiendo así disfrutar de la energía calórica limpia del mundo. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.1.8. Calefacción por biomasa

Es el sistema de calefacción más conocido y a la vez el más utilizado en diferentes partes del mundo. Se refiere a la utilización de la energía que contiene toda la masa biológica del planeta Tierra, en este caso, la leña y últimamente el pellet. (Molina Sepúlveda & Oyarzo Gómez, 2013)

3.2. PELLET COMO COMBUSTIBLE

El pellet es un biocombustible sólido de biomasa densificada. Para el proceso de fabricación de pellet se utiliza principalmente aserrín, virutas y astillas, sin embargo, también se han usado otros tipos de biomasa como paja y residuos agrícolas, esto debido a la creciente demanda de pellet en los últimos años. (Burgos, 2010, pág. 39)

Durante la fabricación de pellet se requieren sistemas de producción complejos que comienzan con la extracción de troncos de madera, a los cuales se les reduce el tamaño para una mejor manipulación, o bien se utiliza madera sobrante de otros procesos; luego se pasan por procesos de secado natural o forzado con el fin de extraer la humedad; y finalmente, se realiza el proceso de pelletizado, donde se prensa el material para tomar la forma y consistencia requerida.

En la Figura 3.1. se muestra el proceso de fabricación de pellet.



Figura 3.1: Proceso de fabricación de pellets.

El pellet es usado principalmente para generación de calor, pudiendo utilizarse en estufas, calderas, piscinas climatizadas o procesos industriales que requieran calor. Otra de sus aplicaciones es la de generación de electricidad mediante combustión. (Combustibles Aragón, 2016)

3.2.1. Características Técnicas

Las características técnicas típicas de este biocombustible se muestran en la Tabla 3.1. Estas características pueden variar según distintos procesos de fabricación o las condiciones ambientales en las que se encuentra:

Tabla 3.1: Características técnicas típicas del pellet

Diámetro	6-12 [mm]
Largo	20-60 [mm]
Poder calorífico inferior	4.000-4.500 [kcal/kg]
Densidad real	1.000-1.200 [kg/m ³]
Densidad aparente	650 [kg/m ³]
Humedad	6-8 %

Fuente: Extraído de (Burgos, 2010, pág. 40)

3.2.2. El pellet frente a otros combustibles

Como se mencionó anteriormente, el pellet es utilizado para generar calor, siendo sus usos principales en estufas y calderas. En el caso de las estufas, el pellet se ha implementado con el fin de reemplazar a la leña, la cual es una de las formas más simples de biomasa, además de tener un bajo precio en el mercado. Por otra parte, el uso del pellet en calderas reemplazaría a combustibles fósiles convencionales como el gas natural o el gas licuado del petróleo. (Sebastián Nogués, 2010)

La ventaja principal del pellet frente a los combustibles fósiles es ser de carácter renovable, aprovechando los recursos que nos da el medio ambiente.

Se estudiarán distintos factores para comparar el pellet con otros combustibles.

3.2.2.1. Parámetros físicos

El pellet es un biocombustible estandarizado y con una densidad muy alta, requiriendo un volumen pequeño para su almacenamiento, lo cual presenta una ventaja por sobre la leña, que requiere un gran espacio para almacenarla. Sin embargo, esta cualidad hace del pellet un

combustible que se produce mediante procesos industriales, mientras que la leña, al no requerir procedimientos industriales, puede ser obtenida localmente, lo que generaría mayor empleo en el sector. Además, el pellet es un combustible homogéneo que se comporta como un líquido, lo cual lo hace más simple de utilizar en sistemas automatizados. (Sebastián Nogués, 2010)

Por otra parte, la leña, al ser extraída directamente de la naturaleza, tiene mayores porcentajes de humedad, lo cual genera una combustión incompleta, liberando más gases contaminantes. En el caso del pellet no ocurre este inconveniente ya que se mantiene la humedad controlada durante el proceso de fabricación. (Ídem)

3.2.2.2. *Parámetros químicos*

La principal ventaja química es la cantidad de ceniza que deja la combustión del pellet (menor al 0,5%), la cual es mucho menor a la producida por la leña. Esto significa que la limpieza de los aparatos de combustión será más simple. (Burgos, 2010)

3.2.2.3. *Parámetros energéticos*

Como se puede ver en la Tabla 3.2, el poder calorífico de la madera no logra alcanzar los mismos niveles que el pellet. La especie de madera comúnmente utilizada y comercializada es “Eucaliptus Globulus” que al ser comparada con el pellet se aprecia una diferencia de poder calorífico de casi 1000 [kcal/kg] menor. A partir de este dato, se concluye que el pellet es más eficiente que la madera, ya que puede producir mayor cantidad de energía por unidad de masa.

Tabla 3.2: Poder calorífico de distintas especies de madera según el porcentaje de humedad

Humedad	Poder calorífico [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
Humedad	Poder calorífico [kcal/kg]							
	Roble	Coigüe	Lingue	Euc. Nitens	Euc. Globulus	Aromo	Radal	Ulmo
18%	3962,72	3582,70	3778,68	3852,78	3479,93	3771,51	4015,30	3656,79
25%	3575,53	3228,97	3408,23	3475,15	3133,37	3401,06	3623,33	3293,50
33%	3130,98	2820,27	2980,40	3042,55	2736,62	2975,62	3174,00	2880,02

Fuente: Extraído de (Ministerio de Energía, 2015)

3.2.2.4. Costos

Generalmente, los costos de inversión para instalaciones de biomasa son superiores a las instalaciones de combustibles tradicionales, lo cual se debe principalmente a la complejidad de los equipos requeridos para operar la biomasa de manera más eficiente, además de haber un menor desarrollo tecnológico para dicho propósito. Con respecto a los costos de producción, estos pueden variar dependiendo de una serie de factores como la disponibilidad del combustible, cantidad demandada, tratamiento para mejorar la calidad del producto, entre otros. (Burgos, 2010)

3.2.2.5. Precio en el mercado chileno

Se analizará el valor del pellet y la leña del mercado para comparar sus respectivos costos de energía. En la Tabla 3.3. se muestran los precios de estos productos en el mercado chileno.

Tabla 3.3: Características y precios en el mercado chileno de leña y pellet

Producto	Características técnicas	Valor
Bolsa de Pellets de madera 	- Producto ecológico fabricado a partir de residuos de madera como aserrín, viruta y astillas, que genera pocas cenizas. - Marca: Ecomas - Material: Madera - Capacidad: 18 [kg] - Poder calorífico: 4.285 [kcal/kg] - Humedad: 6 % - Cenizas: 0,16 %	\$3.490 CLP
Saco de leña Lengua Coyah 	- Combustible para chimeneas y calefactores a leña. - Marca: Genérico - Material: Madera - Capacidad: 21 [kg]	\$4.990 CLP

Fuente: Extraído de (Sodimac, 2019)

Se puede determinar el precio del kilogramo de leña:

$$\text{Precio del kg de leña} = \frac{\text{Valor [CLP]}}{\text{Masa leña[kg]}} \quad (1)$$

Con la Ecuación 1 se obtiene:

$$\text{Precio del kg de leña} = \frac{4990[CLP]}{21[kg]} = 237,62[CLP/kg]$$

Ya que el vendedor no propinó el poder calorífico de la leña, se utilizará para una humedad de 18%, el dado en la Tabla 3.2. para la especie “Eucaliptus Globulus”, el cual es 14,56 [MJ/kg], o lo mismo que 3480[kcal/kg].

A partir de esto, se puede calcular el valor de generar 1 [kcal] con la Ecuación 2:

$$\text{Precio al generar 1 kcal utilizando leña} = \frac{\text{Precio del kg de leña}}{\text{Poder calorífico}} \quad (2)$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Precio al generar 1 kcal utilizando leña} &= \frac{237,62[CLP/kg]}{3480[kcal/kg]} \\ &= 0,0682816092 [CLP/kcal] \end{aligned}$$

De la misma forma, se pueden repetir los cálculos para el caso del pellet:

$$\text{Precio del kg de pellet} = \frac{\text{Valor [CLP]}}{\text{Masa pellet[kg]}} \quad (3)$$

Se obtiene de la Ecuación 3:

$$\text{Precio del kg de pellet} = \frac{3490[CLP]}{18[kg]} = 193,89[CLP/kg]$$

Se tiene, además el valor para generar 1 [kcal] utilizando pellets con la Ecuación 4:

$$\text{Precio al generar 1 kcal utilizando pellets} = \frac{\text{Precio del kg de pellets}}{\text{Poder calorífico}} \quad (4)$$

Obteniendo:

$$\begin{aligned} \text{Precio al generar 1 kcal utilizando pellet} &= \frac{193,89[\text{CLP/kg}]}{4285[\text{kcal/kg}]} \\ &= 0,0452485 [\text{CLP/kcal}] \end{aligned}$$

Entonces, se determina la relación entre el valor de la energía utilizando leña y utilizando pellet, según la Ecuación 5:

$$\text{Relación valor energía} = \frac{\text{Precio al generar 1 kcal utilizando leña}}{\text{Precio al generar 1 kcal utilizando pellet}} \quad (5)$$

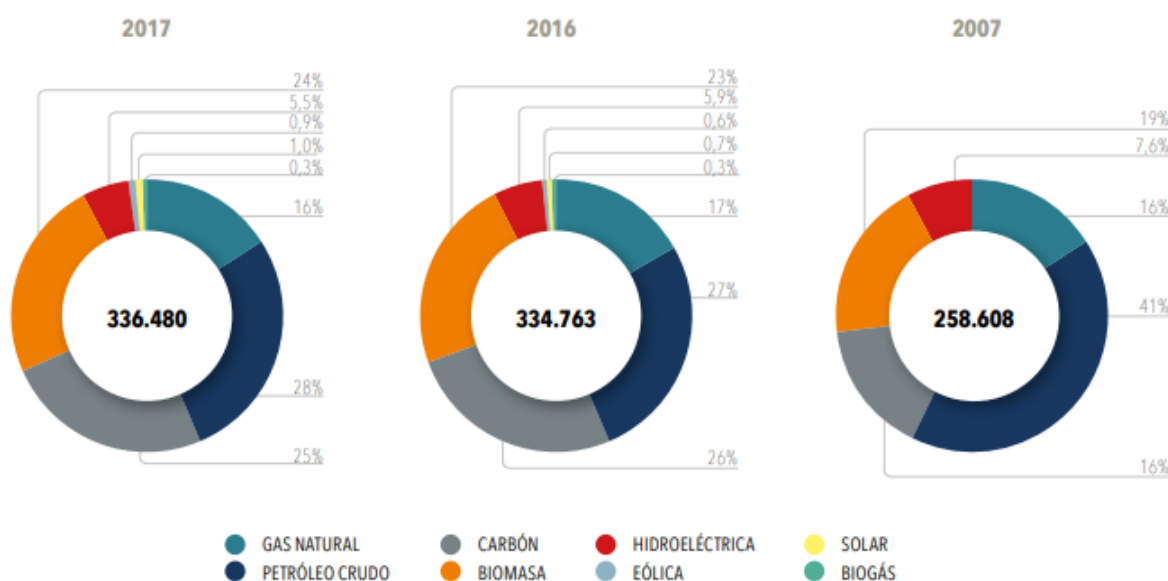
De la Ecuación 5 se obtiene un valor de 1,509, lo que significa que la leña es un 50,9 % más cara que el pellet, energéticamente hablando. Sin embargo, debe considerarse que los equipos de combustión a pellets tienen un costo más elevado que los equipos de combustión a leña, además los valores calculado pueden cambiar dependiendo de distintos factores como la humedad del combustible, características ambientales donde se produce la combustión, la eficiencia al transferir calor del sistema de combustión utilizado, entre otros.

3.2.3. Uso del pellet en Chile

Chile es un país con una abundante cantidad de biomasa forestal, teniendo 17.5 millones de hectáreas de bosque, de los cuales 82% corresponden a bosque natural, 17% a plantaciones (pinos y eucaliptus) y 1% a producción mixta. Por esta razón, y adicionando el elevado costo de los combustibles fósiles, es que se ha utilizado en gran medida los biocombustibles sólidos como fuente de energía primaria. (Azócar, 2017)

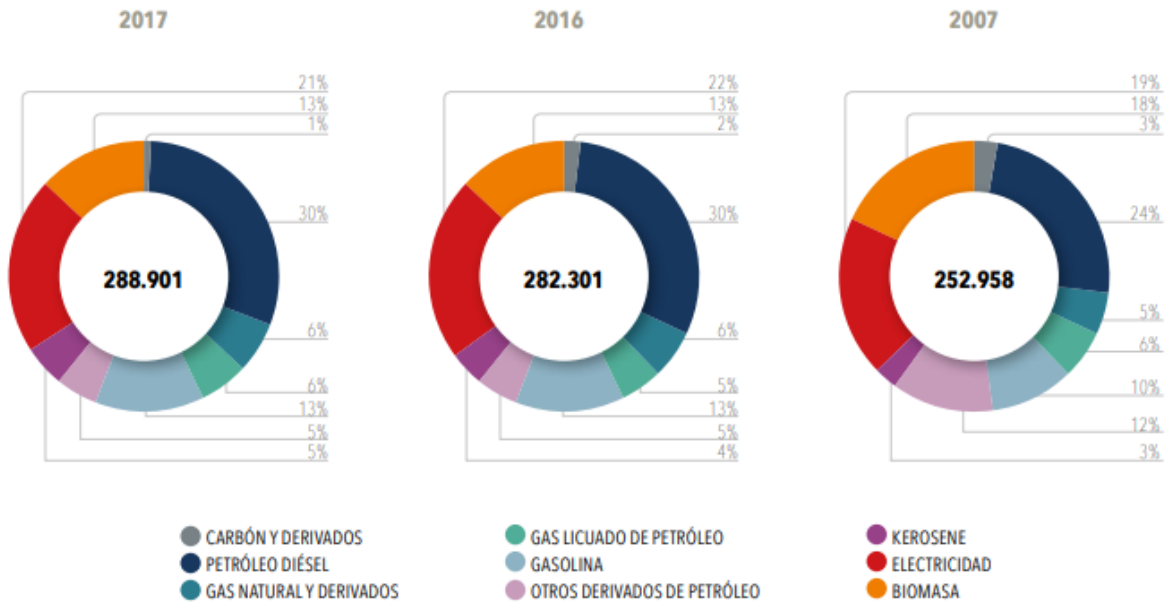
El uso de la leña para calefacción representa un 81% del total consumido en Chile, lo que significa que aproximadamente 1.7 millones de hogares utilizan este tipo de combustible. (Ídem)

En el Gráfico 3.1. y Gráfico 3.2. se presenta la oferta y el total energético consumido para los distintos combustibles en los años 2007, 2016 y 2017.



Fuente: Extraído de (Comisión Nacional de Energía, 2019)

Gráfico 3.1: Total de la oferta de energía primaria en Tera calorías para año 2007, 2016 y 2017



Fuente: *Extraído de (Comisión Nacional de Energía, 2019)*

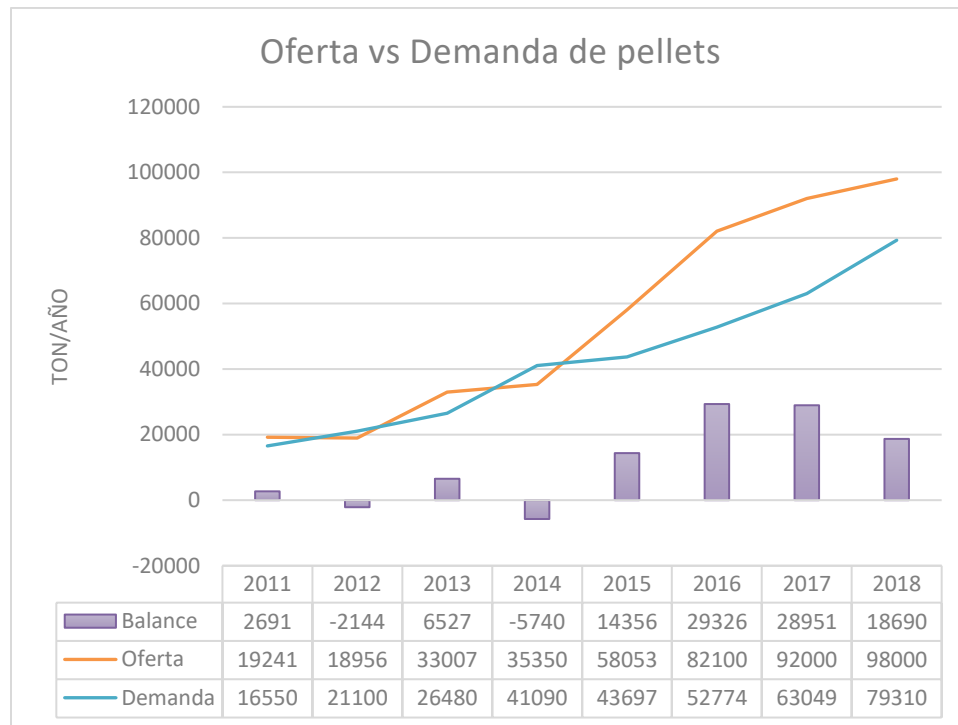
Gráfico 3.2: Total del consumo energético en Tera calorías para año 2007, 2016 y 2017

De los gráficos presentados se observa la creciente oferta y consumo de biomasa durante los últimos años.

Como se mencionó anteriormente, la leña es el principal combustible de calefacción utilizado en Chile, sin embargo, debido a su alto contenido de humedad, la baja eficiencia de las estufas y una mala aislación en las viviendas se ha convertido en un combustible con alto grado de contaminación. Como consecuencia, se comenzó a implementar el uso de pellet como un combustible menos contaminante en reemplazo de la leña.

En el año 2006 se comenzaron a importar estufas a pellet desde Europa, pero estas presentaban un alto costo. Con el fin de masificar el uso de dichas estufas, en el año 2012, el Ministerio de Medio Ambiente hizo un programa de reemplazo de estufas en el sector residencial e industrial. A partir de ahí, el uso del pellet en Chile creció aún más, llegando a experimentar con la formación de pellet no sólo de madera, sino que también de cascarilla de avellana y paja de trigo. (Azócar, 2017)

Se presenta en el Gráfico 3.3. la oferta y demanda de pellets en Chile del año 2011 al 2018:



Fuente: Extraído de (Salazar, 2018)

Gráfico 3.3: Oferta y demanda de pellets, año 2011 – 2018

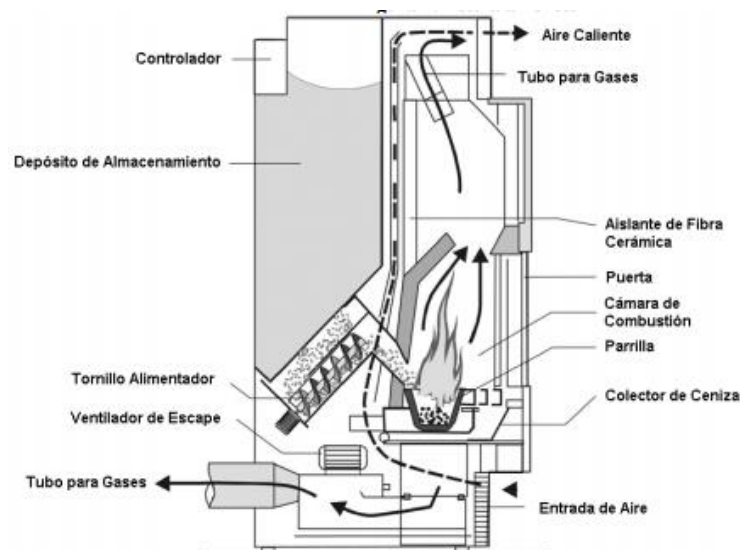
Actualmente, la principal productora de pellets en Chile corresponde a la empresa Ecomas S.A., la cual posee alrededor del 95% del mercado nacional y mantiene una producción anual superior a las 25.000 toneladas. (Pereira Veloso, 2012, pág. 25)

3.3. ESTUFAS A PELLET

Una estufa a pellets es una estufa que quema pellets de biomasa para crear una fuente de calor en espacios residenciales y en ocasiones, industriales. A diferencia de las estufas de leña convencionales, las estufas de pellets dependen de la electricidad para su funcionamiento. Un ventilador eléctrico controla el proceso de combustión variando el suministro de aire de combustión. Esto da como resultado bajas emisiones de CO y material particulado, el cual consiste principalmente en material inorgánico en contraste con las estufas a leña donde las emisiones de partículas están dominadas por el hollín y el alquitrán. (Van Loo & Koppejan, 2008, pág. 127)

Las estufas a pellets suelen estar provistas de un pequeño almacenamiento de combustible, alimentador de combustible, soplador de aire de combustión, carcasa del quemador y un sistema de descarga de gases de combustión. Están equipados con un sistema de control muy eficiente. (Ídem)

En la Figura 3.2. se muestra el principio de una estufa a pellets con una potencia nominal máxima de 10 kW.



Fuente: Extraído de (Van Loo & Koppejan, 2008, pág. 127)

Figura 3.2: Estufa a pellets

La tolva de combustible se llena desde la parte superior. El tiempo de combustión con una tolva llena a la potencia nominal es de aproximadamente 6 horas. Para el transporte del combustible al quemador se utiliza un sistema de alimentación de combustible, donde la velocidad del alimentador depende de la demanda de calor. El quemador de la estufa consiste en un recipiente donde son depositados y quemados los pellets. El aire de combustión se extrae a través de ranuras en la pared interna de la carcasa mediante un extractor, lo que reduce la presión en la cámara de combustión. Los gases de combustión se descargan en la parte superior de la cámara de combustión y para la estufa mostrada en la Figura 3.2, fluyen hacia la chimenea construida en el fondo de la estufa, pasando a través de un intercambiador de calor en el camino. El aire de la habitación ingresa a la estufa cerca de la parte inferior de la unidad y sale de la estufa en la parte superior. (Van Loo & Koppejan, 2008, pág. 128)

En la mayoría de las estufas a pellets se alcanzan rendimientos sobre el 84%, llegando incluso hasta 94%. (Pereira Veloso, 2012, pág. 25)

3.4. TECNOLOGÍAS EN ESTUFAS A PELLET

En esta sección se presentarán distintos tipos de tecnologías de calefacción utilizando pellets.

3.4.1. Estufas de aire caliente de pellet

Corresponde a una estufa a pellet con un funcionamiento clásico, tal como el mostrado en la sección anterior. Se utiliza para calefacción de viviendas o espacios donde sea posible una correcta difusión del aire caliente. Es necesaria una salida de humos por donde evacuar los gases de combustión.

3.4.2. Estufas de aire caliente a pellet canalizadas

Son estufas similares a la anterior, pero con una mayor capacidad de área a calefaccionar, pudiendo distribuir el calor a varias habitaciones (ver Figura 3.3.). Esto se logra mediante un sistema canalizable formado por tubos y ventiladores. (Cointra, 2018)

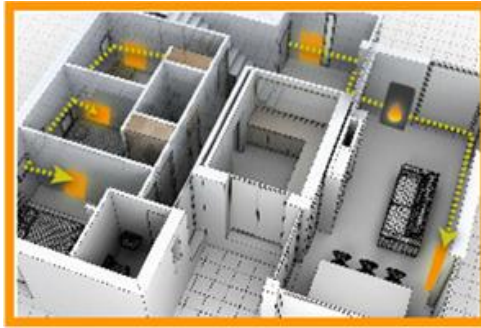


Fuente: Extraído de (Cointra, 2018)

Figura 3.3: Distribución de calor en un hogar con una estufa de aire canalizable.

3.4.3. Hidroestufa o Termoestufa a pellet

Su característica principal es el control de la temperatura en cada estancia de la vivienda. Esto requiere de un circuito de radiadores que transmite el calor a distintos sectores del hogar, además de calefaccionar el lugar donde se encuentra, al igual que una estufa de aire caliente (Ver Figura 3.4.). (Cointra, 2018)



Fuente: Extraído de (Cointra, 2018)

Figura 3.4: Distribución de calor en un hogar con una Hidroestufa.

Además, este tipo de estufas puede ser utilizado para generar agua caliente mediante la instalación de un interacumulador. (Cointra, 2018)

3.4.4. Estufa insertable de aire caliente a pellet

Funciona igual que una estufa de aire caliente a pellet, pero con un cambio en el diseño que le permite insertarla en una pared (ver Figura 3.5.).



Fuente: Extraído de (Met Mann, 2016)

Figura 3.5: Estufa insertable de aire caliente a pellets.

3.4.5. Hidroestufa insertable

Funciona de forma similar a una Hidroestufa a pellet, pero con cambios en el diseño que permiten su inserción en las paredes de la vivienda (ver Figura 3.6.).



Fuente: Extraído de (Met Mann, 2016)

Figura 3.6: Hidroestufa insertable a pellet

3.4.6. Estufa combinada de madera y pellet

Este tipo de estufas puede funcionar utilizando como combustible tanto pellet como madera. Su funcionamiento es similar a una estufa a leña mientras funciona con este combustible (sin depender de un sistema eléctrico) y similar a una estufa a pellet al usar el pellet como combustible (ver Figura 3.7.). De esta forma proporciona al usuario la comodidad de ambas estufas en una sola, siendo capaz incluso de mezclar dichos combustibles durante la combustión.

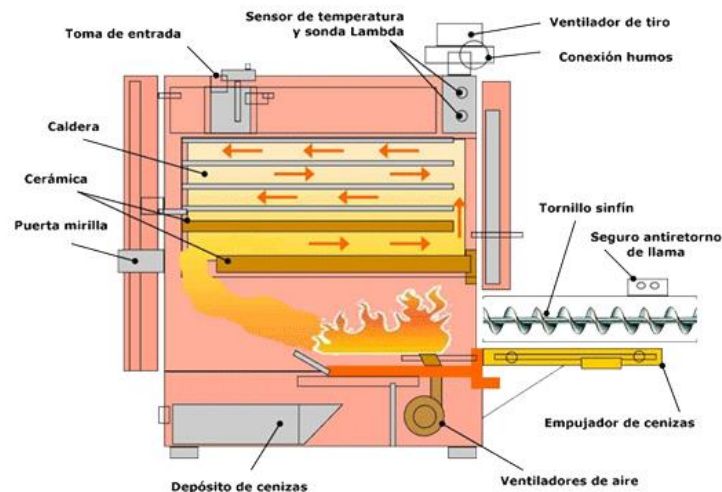


Fuente: Extraído de (Rika, 2019)

Figura 3.7: Estufa combinada marca "rika"

3.4.7. Calderas a pellet

Su funcionamiento es similar al de una Hidroestufa, el calor producido se transmite a un circuito de agua que puede ser utilizado para calefacción, duchas y climatización de piscinas. Está compuesto por una caldera, un depósito de biomasa, un sistema de alimentación, una sección de extracción y almacenamiento de cenizas y un acumulador inercial (ver Figura 3.8.). (Hildebrandt Gruppe, 2015)



Fuente: Extraído de (Hildebrandt Gruppe, 2015)

Figura 3.8: Caldera a pellet típica

3.5. TECNOLOGÍAS Y ESTUFAS DISPONIBLES EN CHILE

En el mercado chileno, la mayoría de los productos de calefacción que utilizan pellet corresponden a estufas de aire caliente con diseños clásicos. Sin embargo, existen pequeños ajustes o variaciones para hacerlo un producto más llamativo, por ejemplo, la inclusión de un control remoto, capacidad de programación o cambios en el diseño.

En nuestro país, las dos empresas líderes en diseño y construcción de estufas a pellets son “Amesti”, con 36 años de experiencia en fabricación de estufas y “Bosca”, que introdujo la estufa a pellets en el mercado nacional en el año 2006.

Algunas estufas disponibles en el mercado nacional son:

Tabla 3.4: Estufas del mercado chileno

BOSCA: Calefactor pellet Eco Smart Burdeo Potencia: 8,1 kW Rango calefacción: Hasta 120 m ² Alto: 99,5 cm Ancho: 46,5 cm Profundidad: 50,4 cm Peso: 79 kg	
AMESTI: Estufa a pellet Milano rojo modelo 01-187 Potencia: 7,2 kW Rango: 53 a 130 m ² Eficiencia: 80%	

BOSCA: Termoestufa Pellet Hidro 26 Potencia: 25,8 kW Alto: 127,3 cm Ancho: 65 cm Profundidad: 57,2 cm Diámetro cañón: 80 mm	
AMESTI: Chimenea a pellet Inserto 700 modelo 01-188 Potencia: 7,5 kW Rango: 68 a 135 m² Eficiencia: 89%	

Fuente: Extraído de (Bosca, 2019 & Amesti, 2019)

3.6. IMPACTO AMBIENTAL DE ESTUFAS A PELLET

Dentro de la cámara de combustión de una estufa a pellets se produce la mezcla de combustible (pellets de biomasa) con comburente (oxígeno en forma de gas) produciéndose así una reacción de combustión que puede liberar gases contaminantes al exterior, siendo dañinos para el ambiente y la salud de los seres vivos. Dentro de los gases emitidos por una estufa podemos encontrar CO_2 , H_2O , N_2 , CO , SO_2 , entre otros.

3.6.1. Material Particulado

El material particulado corresponde a partículas de diferente origen, tamaño, forma, y composición química que se encuentran en suspensión en el aire, las cuales pueden estar en estado sólido o líquido. Su composición es muy variada, pudiéndose encontrar entre sus principales componentes sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro sódico, carbón, polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. (Instituto para la Salud Geoambiental, 2014)

El material particulado se divide de acuerdo a su tamaño de partícula en micrones, existiendo dos categorías: MP10 (tamaño de partícula menor a 10 micrones) y MP2,5 (tamaño de partícula menor a 2,5 micrones). (Ídem)

Mientras menor sea el tamaño del material particulado, más nocivo será para salud, ya que será capaz de penetrar más allá de sólo el aparato respiratorio. Es por esto que las emisiones de material particulado deben ser controladas y así obtener una mejor calidad de vida para la población. (Ídem)

3.6.2. Normas primarias de calidad del aire en Chile

En esta sección se dan a conocer las normas primarias vigentes de calidad del aire en Chile, donde se muestran los valores límites de concentración de 24 horas y concentración anual de material particulado fino y grueso.

3.6.2.1. Norma primaria de calidad del aire para material particulado fino MP2,5

Las concentraciones de material particulado fino MP2,5 están estipuladas por el decreto supremo N°12 del Ministerio del Medio Ambiente como se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Norma primaria de calidad del aire para material particulado fino MP2,5

Período	Valor [$\mu g/m^3 N$]	Criterio de excedencia
Concentración de 24 horas	20	Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad del aire para material particulado fino respirable MP2,5 en el siguiente caso: Cuando el promedio trianual de las concentraciones anuales sea mayor a 20 [$\mu g/m^3 N$] en cualquier estación monitorea calificada como EMRP. Si el período de medición en una estación monitorea no comienza el 1 de enero, se considerarán los tres primeros periodos de 12 meses a partir del mes de inicio de las mediciones, hasta disponer de tres años calendario sucesivo de mediciones.
Concentración anual	50	Cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50 [$\mu g/m^3$] en cualquier estación monitorea calificada como EMRP.
Niveles que determinan situaciones de emergencia ambiental para MP2,5	Aquellos en que la concentración de 24 horas se encuentre dentro de los siguientes rangos [$\mu g/m^3$]: Alerta: 80-109 Preemergencia: 110-169 Emergencia: 170 o superior Las concentraciones serán obtenidas a partir de un pronóstico de calidad del aire, o bien, en caso que no se cuente con este pronóstico, de la constatación de las concentraciones de MP2,5 a partir de las mediciones provenientes de alguna de las estaciones de monitoreo de calidad del aire calificadas como EMRP.	

Fuente: Extraído de (Ministerio del Medio Ambiente, 2011)

3.6.2.2. *Norma primaria de calidad del aire para material particulado respirable MP10*

Las concentraciones de material particulado grueso MP10 están estipuladas por el D.S. N°59 del ministerio del Medio Ambiente como se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Norma primaria de calidad del aire para material particulado grueso MP10.

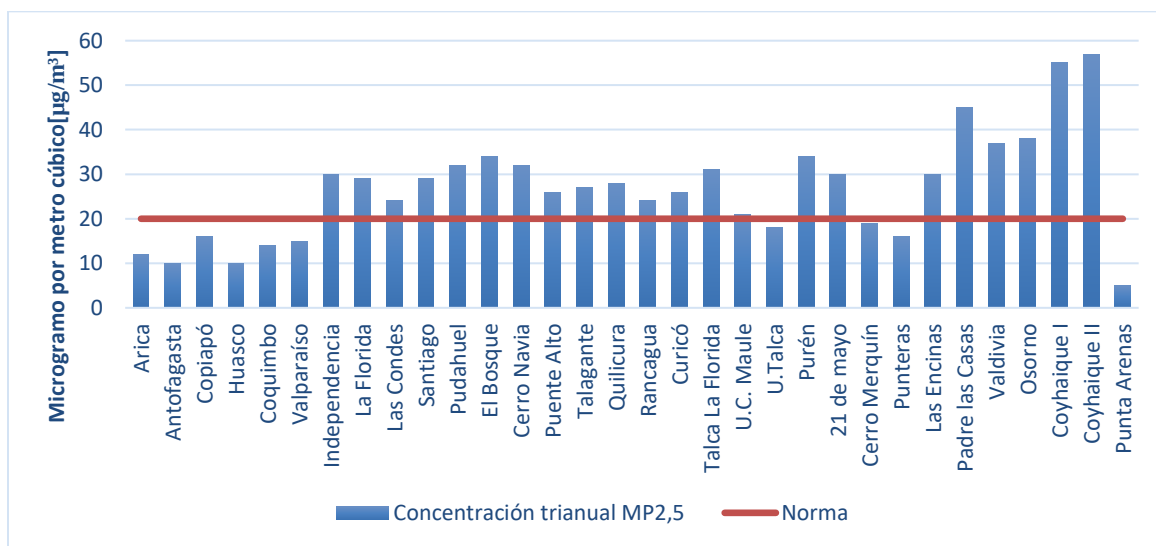
Período	Valor	Criterio de excedencia
Concentración de 24 horas	150 [$\mu g/m^3 N$]	Se considerará sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado respirable cuando el Percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitora clasificada como EMRP, sea mayor o igual a 150 [$\mu g/m^3 N$]. Asimismo, se considerará superada la norma, si antes que concluyese el primer período anual de mediciones certificadas por el Servicio de Salud competente se registrare en alguna de las estaciones monitoras de MP10 clasificada como EMRP, un número de días con mediciones sobre el valor de 150 [$\mu g/m^3 N$] mayor que siete.
Concentración anual	50 [$\mu g/m^3$]	Se considerará sobrepasada la norma primaria anual de calidad del aire para MP10, cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos en cualquier estación monitora clasificada como EMRP sea mayor o igual que 50 [$\mu g/m^3$].
Niveles que determinan situaciones de	Aquellos en que la concentración de 24 horas se encuentre dentro de los siguientes rangos [$\mu g/m^3 N$]: Nivel 1: 195-239	

emergencia	Nivel 2: 240-329
ambiental	Nivel 3: 330 o superior
para MP10.	Las concentraciones serán obtenidas a partir de una metodología de pronóstico de calidad del aire, o bien, en caso que no se cuente con esta metodología, de la constatación de las concentraciones de Material Particulado Respirable MP10, a partir de las mediciones emanadas desde alguna de las estaciones de monitoreo de calidad del aire clasificadas como EMRP.

Fuente: Extraído de (Ministerio Secretaria General de la Presidencia; Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1998)

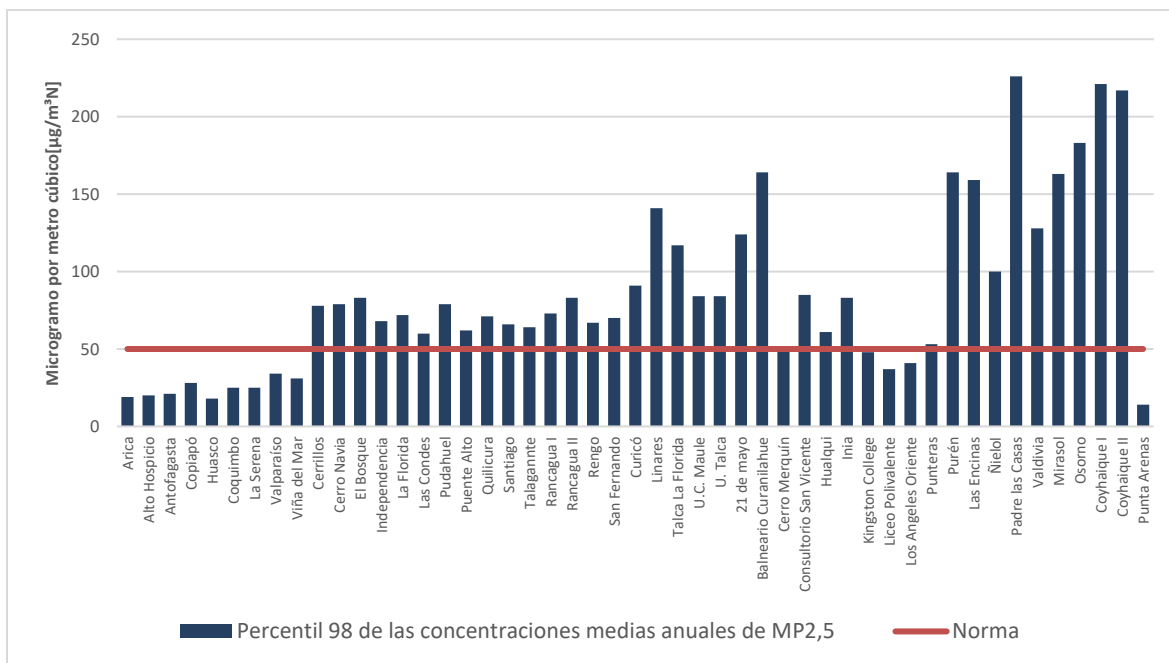
3.6.3. Estado de contaminación por material particulado en Chile

En los Gráficos 3.4., 3.5., 3.6. y 3.7. se muestran valores correspondientes a la concentración de material particulado fino y grueso para distintas regiones del país.



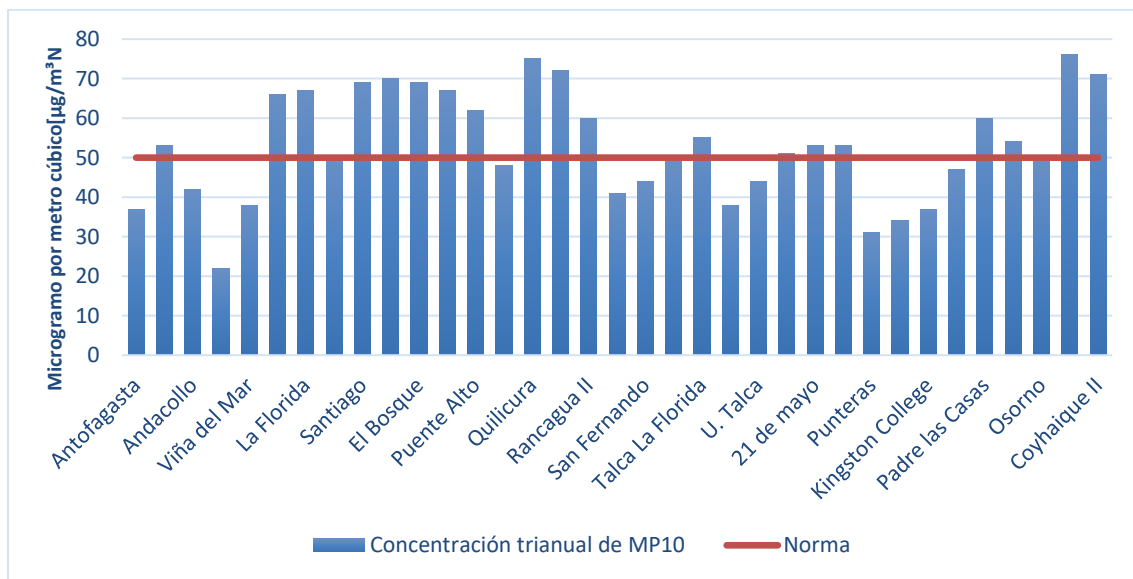
Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

Gráfico 3.4: Promedio trianual de concentraciones de material particulado fino (MP2,5) en estaciones de monitoreo del país, 2017



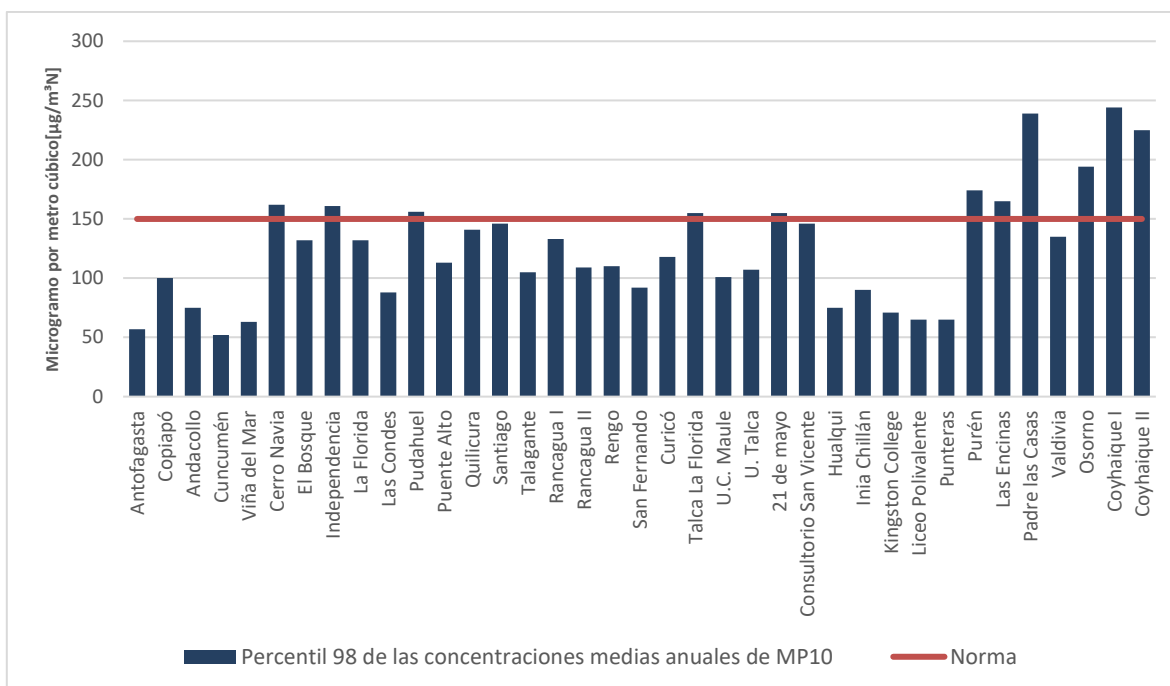
Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

Gráfico 3.5: Percentil 98 de las concentraciones diarias de material particulado fino (MP2,5) en estaciones de monitoreo del país, 2017



Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

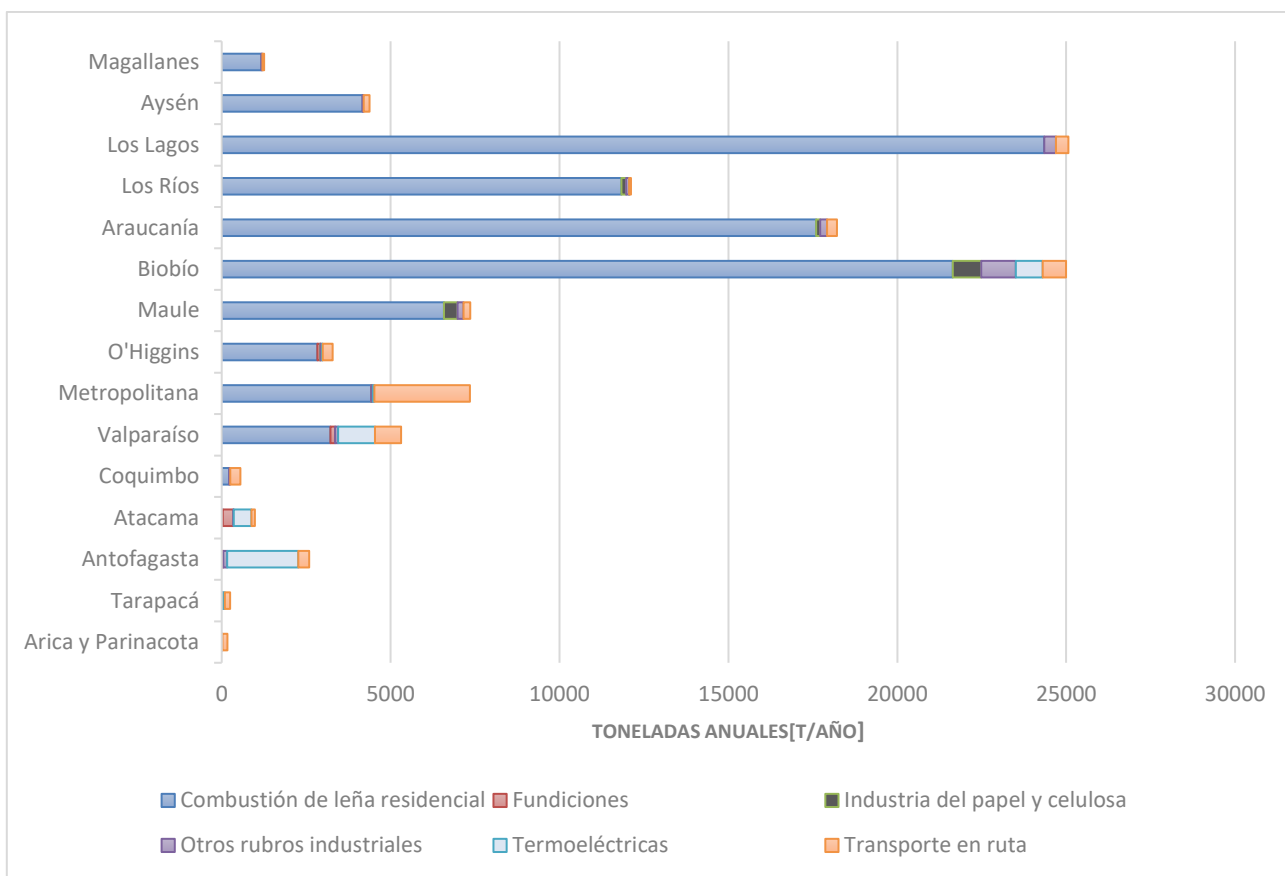
Gráfico 3.6: Promedio trianual de concentraciones de material particulado grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017.



Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

Gráfico 3.7: Percentil 98 de las concentraciones diarias de material particulado grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017.

Según los gráficos mostrados, las concentraciones de material particulado sobrepasan la norma en variadas regiones del país. Es por esta razón que se hace necesario el control y disminución del material particulado para aumentar la calidad del aire en Chile.



Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

Gráfico 3.8: Emisiones de material particulado fino (MP2,5) por región y tipo de fuente

A partir del Gráfico 3.8. se define la combustión de la leña residencial como principal emisor de material particulado fino. Aunque no se tengan datos concretos sobre las emisiones de MP2,5 por combustión de pellets en estufas residenciales, se sabe que los aparatos que funcionan con pellets están hoy en día en proceso de reemplazar a los aparatos que funcionan con leña.

En la Tabla 3.7. se muestran estadísticas de mortalidad y morbilidad como consecuencia de la exposición al material particulado fino.

Tabla 3.7: Mortalidad y Morbilidad asociada a la exposición a material particulado fino (MP2,5), 2017

Tipo de efecto	Causa	Grupo de edad	Casos
Mortalidad prematura	Cardiopulmonar	Mayores de 30 años	3.494
Admisiones hospitalarias	Ataques de ama	Entre 0 y 64 años	130
	Cardiovasculares	Mayores de 18 años	1.503
	Pulmonar crónica	Mayores de 18 años	211
	Neumonía	Mayores de 65 años	941
Visita a sala de emergencias	Bronquitis aguda	Entre 0 y 17 años	90.001
Restricción de actividad	Días de pérdida de trabajo	Entre 18 y 64 años	731.613
	Días de actividad restringida	Entre 18 y 64 años	3.226.602

Fuente: Extraído de (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2018)

De los datos mostrados se observa que existen múltiples casos de mortalidad y morbilidad por exposición al material particulado fino, por lo que se hace necesario indagar en nuevas tecnologías y formas de disminuir las concentraciones de material particulado.

3.6.4. Norma de emisión de material particulado en estufas de calefacción residencial

Los límites de emisiones de material particulado total dependen de la potencia térmica nominal del aparato utilizado y se indican en el D.S. 39 del Ministerio del Medio Ambiente, los cuales se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Límites de emisión de MP en estufas de calefacción residencial

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 a 14 y menor o igual a 25	4,5

Fuente: Extraído de (Ministerio del Medio Ambiente, 2012)

Si una estufa no cumple con estos valores, no aprueba el proceso de certificación y, por lo tanto, no puede comercializarse.

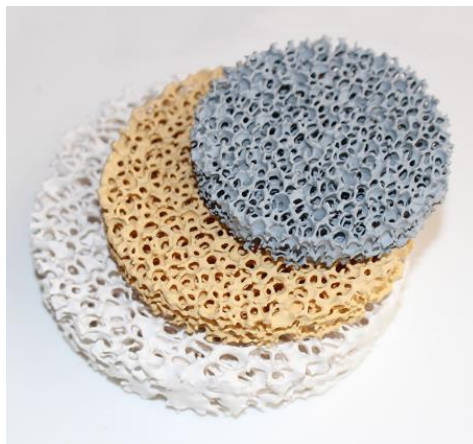
3.7. MEDIOS POROSOS INERTES

Un medio poroso inerte (MPI) es un material químicamente inerte que es utilizado en variadas aplicaciones sometidas a altas temperaturas teniendo como objetivo optimizar los procesos de transferencia de calor asociados.

La combustión en medios porosos se utiliza en calderas avanzadas y quemadores de superficie, sin embargo, se puede usar en calefactores domésticos, cámara de combustión de una turbina a gas, calentadores de vehículos o en procesos energéticos industriales como sistemas de cogeneración u hornos. (Mohamad, 2005)

La razón por la cual existe una mejora en los procesos de combustión radica en que el medio sólido inerte absorbe el calor liberado en la reacción exotérmica y lo transfiere a la mezcla combustible-aire cediéndole energía por convección y precalentando la mezcla antes de ser quemada. Es por esto que el medio poroso inerte puede reducir la formación de contaminantes como CO, NO_x y material particulado productos de la combustión.

En la Figura 3.9. se muestran medios porosos de distintos materiales.



Fuente: Extraído de (Alibaba, 2019)

Figura 3.9: Medios porosos inertes

3.7.1. Cerámicas porosas

La cerámica porosa es un tipo de material cerámico altamente reticulado que cubre una amplia gama de estructuras, como espumas, panales, varillas interconectadas, fibras o esferas huecas. (Induc ceramic, 2019)

Las cerámicas porosas presentan una combinación única de propiedades valiosas, lo que las hace útiles en variadas aplicaciones de ingeniería especiales y avanzadas. Estas propiedades son: (Ídem)

- Baja densidad
- Baja conductividad térmica
- Baja constante dieléctrica
- Alta resistencia
- Alta resistencia al choque térmico
- Alta resistencia química

Los materiales típicos que pueden ser producidos en forma porosa incluyen óxidos tales como la alúmina y el dióxido de circonio y materiales no óxidos tales como carburos y nitruros. (Ídem)

La alúmina es de los materiales más utilizados en aplicaciones que requieren temperaturas de operación significativamente altas, alrededor de los 1650°C. Un factor clave que la diferencia de la zirconia, compuesto de gran similitud en cuanto a propiedades físicas y que también ha sido utilizada en quemadores porosos, es el precio por kilogramo siendo aproximadamente 1/3 del de la zirconia. La Tabla 3.9. muestra una comparación de propiedades físicas de la alúmina y la zirconia. (Herrera, y otros, 2012)

Tabla 3.9: Propiedades físicas de la alúmina y zirconia

Propiedad	Alúmina	Zirconia
Máxima temperatura de empleo [°C]	1900	1800
Coeficiente de expansión térmica(20-1000°C) [$\times 10^{-6} K^{-1}$]	8	10-13
Conductividad térmica a 20°C [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	20-30	2-5
Conductividad térmica a 1000°C [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	5-6	2-4
Emisividad a 2000 K	0,28	0,31

Fuente: Extraído de (Herrera, y otros, 2012)

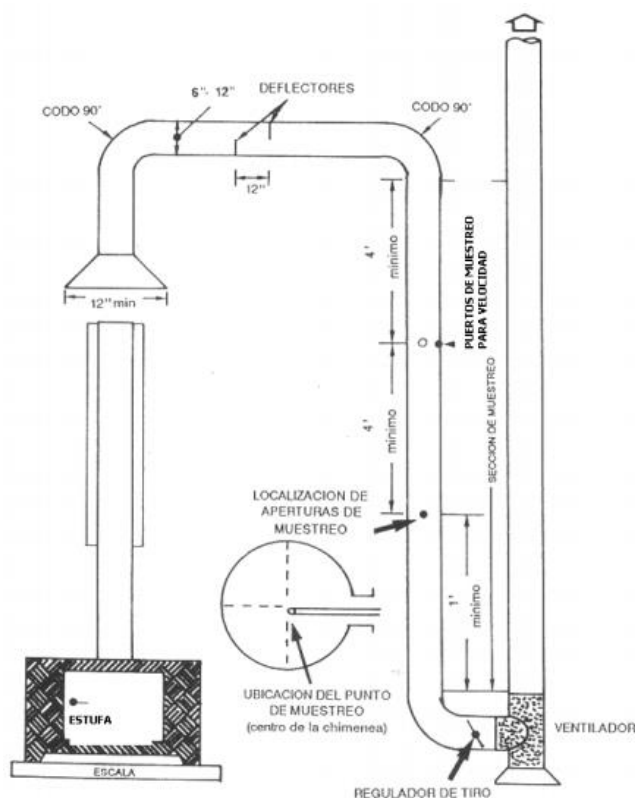
Por otro lado, se tiene el Carburo de Silicio (SiC), material cerámico con las siguientes propiedades: (Callister, 2000)

- Punto de fusión: 2700°C
- Densidad: 3,1 [g/cm³]
- Resistencia a la tensión: 25.000 [psi]
- Resistencia a la flexión: 80.000 [psi]
- Resistencia a la compresión: 560.000 [psi]
- Módulo de Young: 60.000.000 [psi]
- Tenacidad a la fractura: 4.000 [psi/in]

4. CÁLCULO DEL MATERIAL PARTICULADO TOTAL EN ESTUFAS A PELLETS

En la presente investigación se determinó el material particulado total emitido por una estufa a pellets con y sin el uso de MPI. Los ensayos se realizaron en un régimen estacionario y se utilizó un túnel de dilución (ver figura 4.10.) para realizar una medición offline mediante un método gravimétrico estipulado por la norma chilena 5G.

En este procedimiento dado por la norma CH-5G no se considera el cálculo de las emisiones de otros gases contaminantes, por lo que el análisis está hecho sólo para las emisiones de material particulado.



Fuente: Extraído de (Ministerio de Salud, 2012)

Figura 4.10: Detalles de construcción recomendados para túnel de dilución según norma CH-5G

Los resultados obtenidos por dicho método de ensayo corresponden al total de las partículas emitidas por una estufa a pellets, sin poder diferenciar en qué etapa de la combustión ocurren mayores emisiones. Además, no se puede saber el tipo de material particulado obtenido, por lo que no es posible determinar mediante este ensayo qué tan dañinas son las partículas medidas. Sin embargo, se podrían utilizar métodos químicos posteriores a este ensayo para definir los compuestos por los cuales está formado el material particulado obtenido.

Los ensayos fueron realizados en las dependencias de la empresa chilena “Ingeniería en Bosca Chile S.A. ubicada en la ciudad de Santiago de Chile. Dicha empresa facilitó el lugar trabajo en uno de sus talleres donde se encontraba el túnel de dilución con el que se harías las pruebas correspondientes.

4.1. METODOLOGÍA DEL ENSAYO

Los ensayos de medición de material particulado total se hicieron de acuerdo a los métodos CH-28 y CH-5G, donde se explica el procedimiento correcto para una medición offline gravimétrica de material particulado total mediante el uso de un túnel de dilución.

Para obtener un valor de MP total válido deben realizarse 4 ensayos a diferentes categorías de velocidades de quemado, tal como indica el método CH-28. La clasificación de las categorías se expone en la Tabla 4.1. Para cumplir con las distintas velocidades de quemado requeridas, se varía la potencia de la estufa a pellet desde su panel de control, que cuenta con 5 niveles de potencia. En caso de no lograr estar en el rango de alguna categoría, se repite un ensayo en otra categoría.

Tabla 4.1: Categorías de velocidad de quemado (promedio base seca)

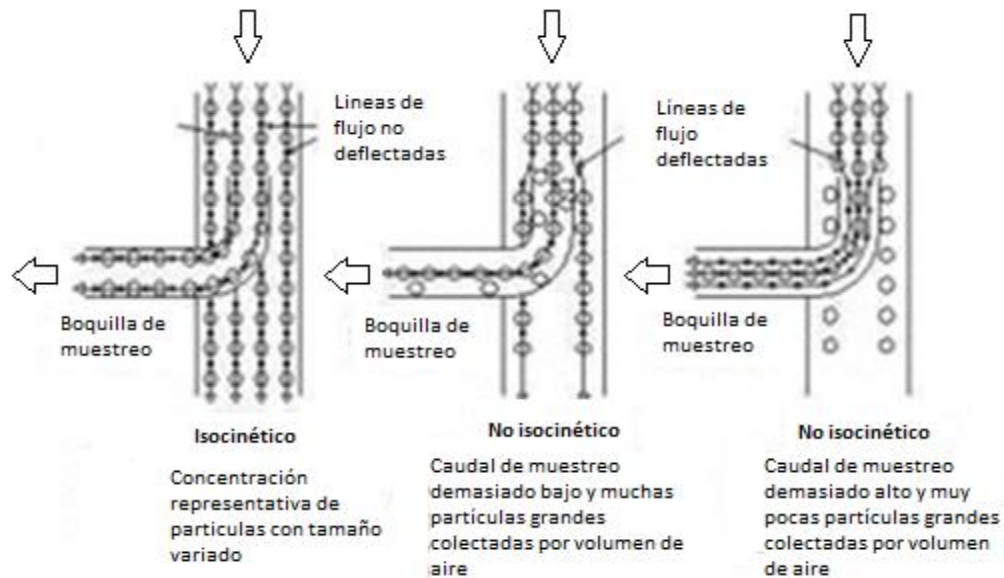
Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
<0,80 [kg/h]	0,80 a 1,25 [kg/h]	1,25 a 1,9 [kg/h]	Velocidad máxima de quemado
< 1,76 [lb/h]	1,76 a 2,76 [lb/h]	2,76 a 4,19 [lb/h]	

Fuente: Extraído de (Ministerio de Salud, 2013)

Las características principales del método de ensayo son:

- Cálculo de material particulado total sin distinción del diámetro de partícula: no se puede determinar con este método la composición ni el diámetro de material particulado medido, por lo cual sólo se tiene el valor de MP10.
- Método gravimétrico: método cuantitativo basado en la medición de la diferencia de masa final e inicial de la sustancia que se desea determinar; en este caso, el material particulado total captado por los filtros.
- Muestreo isocinético: la velocidad del flujo succionado por la lanza es igual a la del flujo en el túnel, con el fin de evitar separación mecánica de las partículas y asegurar que el flujo muestreado tenga la misma concentración de partículas que el flujo de gases en el túnel (Ver Figura 4.11.).

- Medición offline: no se tiene un seguimiento en línea de las partículas emitidas en cada parte del proceso de combustión, esto debido al uso de gravimetría para las mediciones.



Fuente: Extraído de (Echeverri, 2006)

Figura 4.11: Muestreo isocinético de partículas

4.1.1. Procedimientos y cálculos realizados por el programa utilizado

Para el cálculo del material particulado total se utilizó una plataforma creada por el organismo de certificación de estufas “CERyLAB”. En esta plataforma se realiza el ingreso de datos y parámetros tomados previos y durante el ensayo, para entregar finalmente el material particulado calculado en cada ensayo.

4.1.1.1. Pre- ensayo

Para asegurarse que se realice un muestreo isocinético, la plataforma exige una toma de datos específicos durante el pre- ensayo donde se determina el caudal de muestreo con el que se realizará el ensayo.

Para empezar, se requiere calcular la velocidad promedio del gas en el túnel, para lo que se utiliza la Ecuación 6 extraída del método CH-2: (Ministerio de Salud, 1996)

$$V_s = K_p * C_p * \sqrt{\frac{\overline{\Delta P} * T_s}{P_s * M_d}} \quad (6)$$

Donde:

V_s = Velocidad promedio del gas en el túnel, [m/s].

K_p = Constante del tubo Pitot = 34,97

C_p = Coeficiente del tubo Pitot.

$\overline{\Delta P}$ = Presión de velocidad promedio del gas en la chimenea, [mmca].

T_s = Temperatura promedio de los gases en el túnel [K]

P_s = Presión absoluta en el túnel, [mm Hg].

M_d = Masa molar del gas en la chimenea, [g/mol].

En la ecuación mostrada, K_p y C_p son valores conocidos y T_s debe ser medido experimentalmente o con el equipo.

La presión absoluta en el túnel está dada por la Ecuación 7:

$$P_s = P_b + \frac{P_e}{13,6} \quad (7)$$

Donde:

P_b = Presión barométrica, [mm Hg].

P_e = Presión estática promedio en el túnel de dilución, [mmca].

P_b y P_e son valores medidos, por lo que se puede determinar P_s

La masa molar del gas seco en una chimenea se determina según el método CH-3 con la Ecuación 8: (Ministerio de Salud, 1996)

$$M_d = 0,44 * \%CO_2 + 0,32 * \%O_2 + 0,28 * (\%N_2 + \%CO_2) \quad (8)$$

Si los gases producidos por la combustión se diluyen con aire, no es necesario medir la composición de los gases y se utiliza un peso molecular de 29, según el método CH-2. (Ministerio de Salud, 1996)

Para el cálculo de $\overline{\Delta P}$ debe seguirse el procedimiento de la travesa de velocidad del método CH-1, donde se debe medir la presión de velocidad en distintos puntos a lo largo del diámetro del túnel. Para chimeneas de diámetro menores a 12 [in] hay 8 puntos de travesa, pero teniendo dos puertos de muestreo, el número de puntos de travesa sobre el diámetro es 4, mostrados en la Tabla 4.2.:

Tabla 4.2: Ubicación de los puntos de travesa sobre el diámetro

Punto	1	2	3	4
Distancia desde la pared interna [mm]	13	37,5	112,5	137

En estos puntos se debe medir ΔP cuando la presión esté estable por al menos 15 segundos. Luego, se determina la presión de velocidad promedio del gas en la chimenea según la Ecuación 9:

$$\overline{\Delta P} = \left(\frac{\sum \sqrt{\Delta P_i}}{n} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

ΔP_i = es la presión de la velocidad en cada punto de la travesa

n = número de puntos (8 en total).

De esta forma se calcula la velocidad promedio del gas en el túnel y a partir de este valor, se determina el caudal de túnel con la Ecuación 10:

$$Q_{tunnel} = V_s * A_{tunnel} [m^3/s] \quad (10)$$

Donde:

A_{tunnel} = Área transversal del túnel

Realizando una corrección por temperatura y presión, se obtiene finalmente el caudal de muestreo con la Ecuación 11:

$$Q_m = Q_{tunnel} * \frac{P_s * 293 [K]}{T_s * 760 [mmHg]} * 3600 [Sm^3/h] \quad (11)$$

Este caudal debe ser regulado manualmente al iniciar el ensayo.

4.1.1.2. Cálculos para determinar el Material Particulado Total

- Porcentaje de humedad base húmeda

$$\%H_{bh} = \left(\frac{\%H_{bs} * 100}{100 + \%H_{bs}} \right) [\%] \quad (12)$$

Donde:

$\%H_{bs}$ = porcentaje de humedad en base seca del combustible.

- Tasa de quemado

$$TQ = \frac{(60 * C_e)}{t} \times \frac{(100 - \%H_{bh})}{100} [kg/h] \quad (13)$$

Donde:

C_e = Carga del ensayo, [kg]

t = duración del ensayo, [min]

- Volumen

$$V_m = \frac{V_g * T_m}{1000} [Sm^3] \quad (14)$$

Donde:

V_g = Volumen de gas, [L/min]

T_m = tiempo, [min]

- Concentración de partículas

$$P_m = \frac{M_N}{V_m} [g/Sm^3] \quad (15)$$

Donde:

M_N = Masa residuo de los filtros, [g]

- Material particulado

$$MP = P_m * Q_m [g/h] \quad (16)$$

Donde Q_m corresponde al caudal de muestreo calculado en el pre ensayo. Finalmente, al material particulado calculado se le aplica un factor de dilución utilizando la Ecuación 17:

$$MP^* = 1,82 * (MP)^{0,83} [g/h] \quad (17)$$

Así, se obtiene el valor del material particulado total para una cierta configuración a una tasa de quemado específica, el cual se genera de forma automática en el programa ingresando los datos requeridos (marcados por recuadros amarillos).

4.1.2. Valor final de material particulado total calculado

Una vez realizados los ensayos para las distintas tasas de quemado mencionadas y obteniendo los valores de material particulado total para cada categoría, se procede a determinar la emisión ponderada de material particulado total de la siguiente forma:

1. Se determina una probabilidad P_i para cada tasa de quemado ordenadas de menor a mayor, obteniendo el valor de la Tabla 4.3. e interpolando en caso de ser necesario.

Tabla 4.3: Probabilidad de tasa de quemado

Tasa de Quemado madera seca (TQS)	Probabilidad (Pi)	Tasa de Quemado madera seca (TQS)	Probabilidad (Pi)	Tasa de Quemado madera seca (TQS)	Probabilidad (Pi)
0,00	0,000	1,70	0,840	3,40	0,989
0,05	0,002	1,75	0,857	3,45	0,989
0,10	0,007	1,80	0,875	3,50	0,990
0,15	0,012	1,85	0,882	3,55	0,991
0,20	0,016	1,90	0,895	3,60	0,991
0,25	0,021	1,95	0,906	3,65	0,992
0,30	0,028	2,00	0,912	3,70	0,992
0,35	0,033	2,05	0,920	3,75	0,992
0,40	0,041	2,10	0,925	3,80	0,993
0,45	0,054	2,15	0,932	3,85	0,994
0,50	0,065	2,20	0,936	3,90	0,994
0,55	0,086	2,25	0,940	3,95	0,994
0,6	0,100	2,30	0,945	4,00	0,994
0,65	0,121	2,35	0,951	4,05	0,995
0,70	0,150	2,40	0,956	4,10	0,995
0,75	0,185	2,45	0,959	4,15	0,995
0,80	0,220	2,50	0,964	4,20	0,995
0,85	0,254	2,55	0,968	4,25	0,995

0,90	0,300	2,60	0,972	4,30	0,996
0,95	0,328	2,65	0,975	4,35	0,996
1,00	0,380	2,70	0,977	4,40	0,996
1,05	0,407	2,75	0,979	4,45	0,996
1,10	0,460	2,80	0,980	4,50	0,996
1,15	0,490	2,85	0,981	4,55	0,996
1,20	0,550	2,90	0,982	4,60	0,996
1,25	0,572	2,95	0,984	4,65	0,996
1,30	0,620	3,00	0,984	4,70	0,996
1,35	0,654	3,05	0,985	4,75	0,997
1,40	0,695	3,10	0,986	4,80	0,997
1,45	0,722	3,15	0,987	4,85	0,997
1,50	0,750	3,20	0,987	4,90	0,997
1,55	0,779	3,25	0,988	4,95	0,997
1,60	0,800	3,30	0,988	≥5,00	1
1,65	0,825	3,35	0,989	--	--

Fuente: Extraído de (Ministerio de Salud, 2013)

2. Para cada tasa de quemado se determina un valor de K_i , calculado a partir de la Ecuación 18:

$$K_i = P_{i+1} - P_{i-1} \quad (18)$$

Donde P_{i+1} corresponde al valor siguiente de P_i y P_{i-1} corresponde al valor anterior de P_i con las tasas de quemado ordenadas de menor a mayor. En caso de no haber un valor anterior éste se considera 0, y si no existe un valor siguiente, éste toma el valor de 1.

3. Finalmente, se calcula la emisión ponderada de material particulado total con la Ecuación 19:

$$E_{pond} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i * E_i)}{\sum_{i=1}^n K_i} \quad (19)$$

Donde E_i es el valor de la emisión de MP total calculada para su correspondiente tasa de quemado.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DEL ENSAYO

El lugar en el cual se realizaron los ensayos, fue en el un taller de la empresa “Ingeniería en combustión BOSCA Chile S.A.” encargado de innovación y procesos de certificación a estufas, donde se cuenta con aproximadamente las siguientes medidas de volumen el largo x ancho x alto: 6[m] x 5[m] x 7[m]. Dentro de este espacio se tienen los equipos y herramientas necesarias para realizar ensayos de potencia y ensayos de material particulado a estufas a leña y a pellets. En la Figura 4.12. se muestra el lugar donde se ubica el sistema de control del túnel de dilución.



Figura 4.12: Espacio donde se ubica el sistema de control para ensayos

4.3. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL ENSAYO

Los equipos de medición utilizados se dividen en 2 secciones: conjunto de equipos que permite el funcionamiento correcto del túnel de dilución y equipos independientes que no corresponden al túnel de dilución pero que son fundamentales para determinar el material particulado total.

4.3.1. Túnel de dilución

El equipo principal de medición de material particulado total corresponde a un túnel de dilución que cuenta con diferentes partes conectadas entre sí. Los aparatos que forman parte de este conjunto son:

4.3.1.1. *Aparato de control*

- Utilizado para controlar todos los parámetros de ensayo (ver Figura 4.13.). Cuenta con regulador de flujo, controlador de masa, medidores de presión y sistema de termocuplas conectadas al túnel.
- Marca: TOTEN



Figura 4.13: Panel del aparato de control

4.3.1.2. *Enfriador de gases*

- Encargado de enfriar la muestra de gases antes de pasar por el sistema de filtros (ver Figura 4.14.).



Figura 4.14: Enfriador de gases

4.3.1.3. *Bomba de vacío*

- Se muestra en la Figura 4.15, siendo la encargada de succionar el flujo de los gases desde el túnel.
- Marca: Value
- Modelo: VE-180N



Figura 4.15: Bomba de vacío

4.3.1.4. Porta filtros

- Artefacto donde se introducen los filtros captadores de material particulado total (ver Figura 4.16.). El porta filtros se conecta al túnel mediante una manguera para captar los gases circulantes del ducto.



Figura 4.16: Porta filtros

4.3.1.5. Ventilador

- Se encarga de expulsar los gases de combustión (ver Figura 4.17.).



Figura 4.17: Ventilador

4.3.2. Equipos Anexos

Los equipos que no forman parte del túnel de dilución en sí, pero que son fundamentales para el correcto desarrollo del ensayo son:

4.3.2.1. Balanza Analítica

- Balanza utilizada para el pesaje de filtros (ver Figura 4.18.).
- Marca: Radwag
- Modelo: A220.R2
- Máxima capacidad: 220 g
- Resolución: 0,1 mg

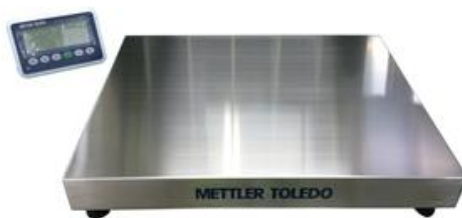


Fuente: Extraído de (Radwag, 2019)

Figura 4.18: Balanza Analítica Radwag A220.R2

4.3.2.2. Báscula

- Utilizada como soporte de la estufa para controlar los parámetros de flujos máxicos durante la combustión (ver Figura 4.19.).
- Marca: Mettler Toledo
- Modelo: BBA231
- Capacidad máxima: 300 kg
- Resolución: 0,5 kg
- Tamaño plataforma: 600 mm x 800 mm



Fuente: Extraído de (Mettler Toledo, 2019)

Figura 4.19: Báscula Mettler Toledo BBA231

4.3.2.3. Termómetro láser

- Utilizado para tomar datos de temperatura de las paredes y tolva de la estufa (ver Figura 4.20.)
- Marca: CHY
- Modelo: 110



Fuente: Extraído de (CHY, 2019)

Figura 4.20: Termómetro láser CHY 110

4.3.2.4. Termómetro digital

- Utilizado para tomar datos de temperatura del túnel y porta filtros (ver Figura 4.21.).
- Marca: MASTECH
- Modelo: MS6514

4.4. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

El procedimiento del ensayo se realiza de tal forma que se cumpla con los requerimientos establecidos por el método chileno CH-5G explicado anteriormente, en el cual se especifica el proceso de medición de material particulado mediante el uso de un túnel de dilución.

El proceso seguido dentro del taller se expone en la Tabla 4.4.:

Tabla 4.4: Procedimiento de ensayo

Montaje	• Limpiar estufa utilizando paños y aspiradora • Limpiar porta filtros y manguera de succión utilizando acetona • Verificar nivel de aceite de la bomba y abastecerla según sea necesario • Verificar carga de baterías del termómetro y termómetro laser cargándolas en caso de ser necesario • Pesar filtros • Montar filtros dentro del porta filtros • Ubicar porta filtros en la posición requerida, listo para ser conectado al equipo • Ubicar un calefactor eléctrico pequeño en dirección al porta filtros
Pre ensayo	• Se selecciona “L1: Traversa” en el aparato de control • Encender la estufa al nivel de potencia requerido • Realizar pre ensayo, con una duración entre 1 y 1,5 horas, tomando datos de presión diferencial, temperatura del túnel y presión estática del túnel para ingresarlos en la plataforma de cálculo y determinar parámetros del ensayo • Encender el calefactor eléctrico

Ensayo	• Se selecciona “L2: Ensayo MP” en el aparato de control • Tomar datos de condiciones ambientales inicial • Conectar mangueras de succión del porta filtros • Encender la bomba de succión y el flujómetro • Regular flujómetro según valor determinado en el pre ensayo • Tomar datos de temperaturas de las superficies de la estufa, temperatura ambiente, temperatura del túnel, temperatura del porta filtros, masa total, presión Pitot y presión porta filtros desde el minuto 5 y cada 10 min hasta finalizar el ensayo de 2 horas • Durante el ensayo, debe mantenerse la temperatura del porta filtros entre 18 y 32°C con la ayuda del calefactor eléctrico. • Apagar la bomba y el flujómetro, y desconectar las mangueras de succión • Tomar datos de condiciones ambientales final • Pesar filtros 24 horas después
----------------------	--

Para la realización del ensayo, se utiliza una plataforma construida en un archivo Excel disponible en el taller, donde se deben ingresar los datos tomados en cada parte del proceso. Dicha plataforma posee las fórmulas necesarias para determinar el material particulado de acuerdo a la norma CH-5G.

4.5. CARACTERÍSTICAS DE ESTUFA A ENSAYAR

La estufa disponible en el taller es una estufa a pellets marca Bosca modelo Hera+, para la cual se tienen las características técnicas mostradas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Características técnicas estufa a pellets Bosca Hera+

Potencia: 9 kW = 77.61 kcal/h	Dimensiones: 83 cm- 42,5 cm - 50,3 cm (alto-ancho-profundidad)
Eficiencia: 88%	Rango Calefacción: Hasta 120 m ²
Peso: 70 kg	Consumo eléctrico en régimen: 50 W
Consumo de pellet: 0,9-2,1 kg/h	Capacidad de Tolva: 18 kg aproximadamente
Diámetro cañón: 80 mm	Autonomía: 8 a 20 horas por carga de 18 kg

Fuente: Extraído de (Bosca, 2019)

En la Figura 4.23. se muestra el diseño de la estufa.



Fuente: Extraído de (Bosca, 2019)

Figura 4.23: Estufa a pellets Bosca Hera+

4.6. MEDIO POROSO UTILIZADO

El medio poroso inerte utilizado para los ensayos fue una cerámica porosa de carburo de silicio (SiC), mostrado en la figura 4.24., el cual tiene las siguientes características: (Silva Castro, 2016)

- Diámetro: 200 [mm]
- Espesor: 30 [mm]
- Poros por pulgadas: 20
- Porosidad: 82,5 %



Figura 4.24: Cerámica porosa utilizada

4.7. CONFIGURACIONES DE ENSAYO

En la investigación, se estudiaron 3 tipos de configuración de ensayo.

4.7.1. Configuración Base

Estufa en su estado original de fábrica, sin aplicar ninguna modificación.

4.7.2. Configuración 1

Estufa con el medio poroso inerte bajo el quemador. En este caso la cerámica porosa debió cortarse utilizando una sierra eléctrica para ajustar su tamaño al de la base del quemador de la estufa. El medio poroso inerte no se encuentra en contacto directo con el combustible, sino que está entre el quemador y la base del quemador, como se muestra en la Figura 4.25.



Figura 4.25: Configuración 1

Se intentó ubicar el medio poroso inerte como base del quemador haciendo una modificación a este para tener un contacto directo con el pellet, tal como muestra la Figura 4.26., pero se observó que se producía la formación de una “costra” formada por cenizas sobre el medio poroso que tapaba los poros, generando una resistencia a la transferencia de calor por conducción, razón por la cual no fue factible realizar ensayos con esta configuración.



Figura 4.26: Quemador modificado



Figura 4.27: Costra formada con el quemador modificado

4.7.3. Configuración 2

Estufa con el medio poroso inerte en la pared trasera de la cámara de combustión de la estufa, ubicado en la parte superior de ésta. En dicha configuración el medio poroso no tiene contacto con el combustible, pero si lo tiene con la llama (en mayor medida para niveles de potencia mayores), encontrándose cercano a la salida de los gases, donde es capaz de transferir calor a los gases antes de ser expulsados.



Figura 4.28: Configuración 2



Figura 4.29: Pared trasera de la cámara de combustión en configuración 2

4.8. RESULTADOS

En este punto se muestran los resultados de temperaturas y material particulado emitido para cada ensayo realizado, además de los cálculos realizados a partir de estos: material particulado total para cada configuración en la estufa y factores de emisión.

4.8.1. Temperaturas en la estufa

En la Tabla 4.6. y Gráfico 4.1. se muestran los resultados de los promedios de las temperaturas medidas en pared superior, pared inferior, paredes laterales y tolva de la estufa para cada configuración ensayada:

Tabla 4.6: Temperaturas promedio paredes y tolva

Tiempo [min]	Temperaturas Base[°C]			Temperaturas Config. 1 [°C]				Temperaturas Config. 2 [°C]			
	Max	Min	Nivel 3	Max	Min	Nivel 2	Nivel 3	Max	Min	Nivel 2	Nivel 3
5	72,8	52,8	60,6	86,4	47,2	54,8	65,4	77,6	52,2	57	58,4
15	75,2	52,4	62,8	93,2	51	57,6	67,8	80,2	54,2	58,4	61,8
25	75,6	53,4	62,8	93,6	52,2	57,4	67	81,6	56,4	62,4	63,2
35	76,4	54	61,6	80,4	50,6	58	66,4	80,4	55,4	60,4	63,4
45	76	52,4	67,4	95	54,6	58,6	70,6	82	56	60,4	62,8
55	77,2	54,8	68,4	86,2	53,4	59,6	67,6	83,2	56,2	61,2	67,8
65	77,8	51,4	67,8	88	50,2	59	70,4	80,6	56	61,4	65,2
75	78,2	52,6	66,2	86,6	54,8	56,6	73	81	56,2	61,2	62,8
85	78	53,8	66,2	82,2	54,6	58,2	73,6	84,8	55,2	62,2	64,2
95	75,8	54	68,4	89,2	55,6	59,8	68,4	85,8	55,6	62,6	66
105	79,4	54	66,4	94,6	57,4	64,6	64,6	83	54,8	62,6	67
115	78,8	54,4	67,2	98,4	55,4	61,4	70	91,4	55,2	62,2	65,8
Promedio	76,77	53,33	65,48	89,48	53,08	58,80	68,73	82,63	55,28	61,00	64,03
Promedio total	-			67,53				65,74			
Promedio sin Nivel 2	65,19			70,43				67,32			

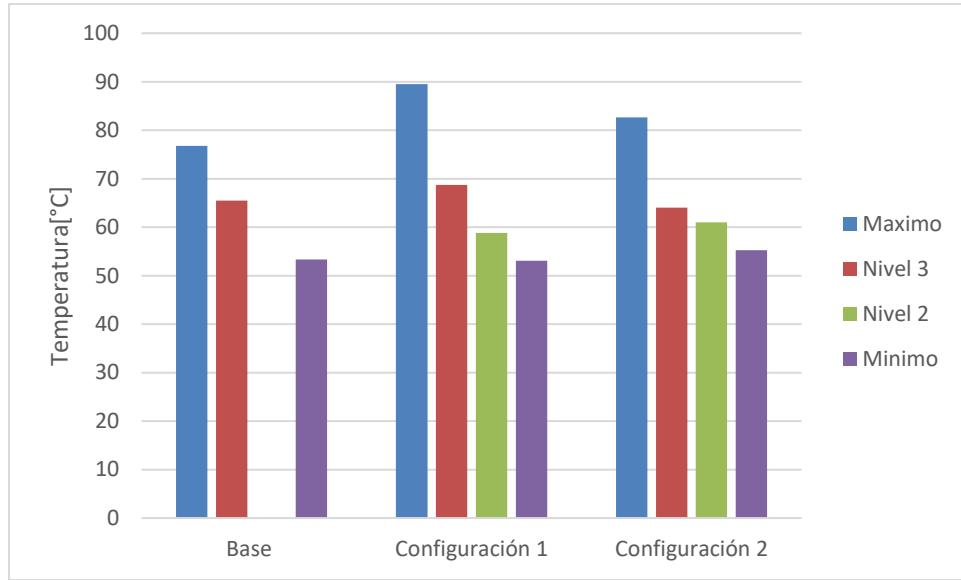


Gráfico 4.1: Temperaturas promedio paredes y tolva de la estufa

4.8.2. Emisión de Material Particulado total

De acuerdo a la diferencia de masas de los filtros al inicio y al final del ensayo se determinó la emisión de material particulado total emitido por la estufa. La diferencia total de masa en los filtros fue modificada según un ajuste de humedad; esto debido a que en algunos ensayos la cantidad de humedad en los filtros disminuyó excesivamente obteniéndose diferencias negativas.

El ajuste realizado se muestra en la Ecuación 20:

$$Diferencia\ total = \begin{cases} Dif_{f.ext} + Dif_{f.int} , & si\ Dif_{f.int} \geq 0 \\ Dif_{f.ext} - Dif_{f.int} , & si\ Dif_{f.int} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

Con las definiciones de la Ecuación 21 y Ecuación 22:

$$Dif_{f.ext} = (Masa\ final - Masa\ inicial)_{filtro\ exterior} \quad (21)$$

$$Dif_{f.int} = (Masa\ final - Masa\ inicial)_{filtro\ interior} \quad (22)$$

De esta forma se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resultados de emisión de material particulado total

Confi guración	Tiraje	Filtro	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Diferencia [g]	Diferencia c/ajuste [g]	Emisión MP total [g/h]
Base	Máximo	Interior	0,4872	0,48605	-0,00115	0,00515	1,213
		Exterior	0,4856	0,4896	0,004		
1	Máximo	Interior	0,4906	0,4908	0,0002	0,006	1,35
		Exterior	0,49305	0,49885	0,0058		
2	Máximo	Interior	0,49155	0,48955	-0,002	0,00475	1,125
		Exterior	0,4926	0,49535	0,00275		
Base	Mínimo	Interior	0,4889	0,48945	0,00055	0,00405	0,996
		Exterior	0,48715	0,49065	0,0035		
1	Mínimo	Interior	0,486	0,4866	0,0006	0,00385	0,967
		Exterior	0,4881	0,49135	0,00325		
2	Mínimo	Interior	0,4886	0,4897	0,0011	0,00435	1,043
		Exterior	0,49115	0,4944	0,00325		
Base	Nivel 3	Interior	0,4939	0,49385	-5E-05	0,0039	0,947
		Exterior	0,48695	0,4908	0,00385		
1	Nivel 3	Interior	0,4985	0,49865	0,00015	0,0036	0,918
		Exterior	0,49475	0,4982	0,00345		
2	Nivel 3	Interior	0,4934	0,4921	-0,0013	0,00245	0,658
		Exterior	0,496	0,49715	0,00115		
1	Nivel 2	Interior	0,491	0,48955	-0,00145	0,0025	0,664
		Exterior	0,48465	0,4857	0,00105		
2	Nivel 2	Interior	0,49225	0,4917	-0,00055	0,0024	0,636
		Exterior	0,48965	0,4915	0,00185		

En el Gráfico 4.2. se muestran los resultados de las distintas configuraciones:

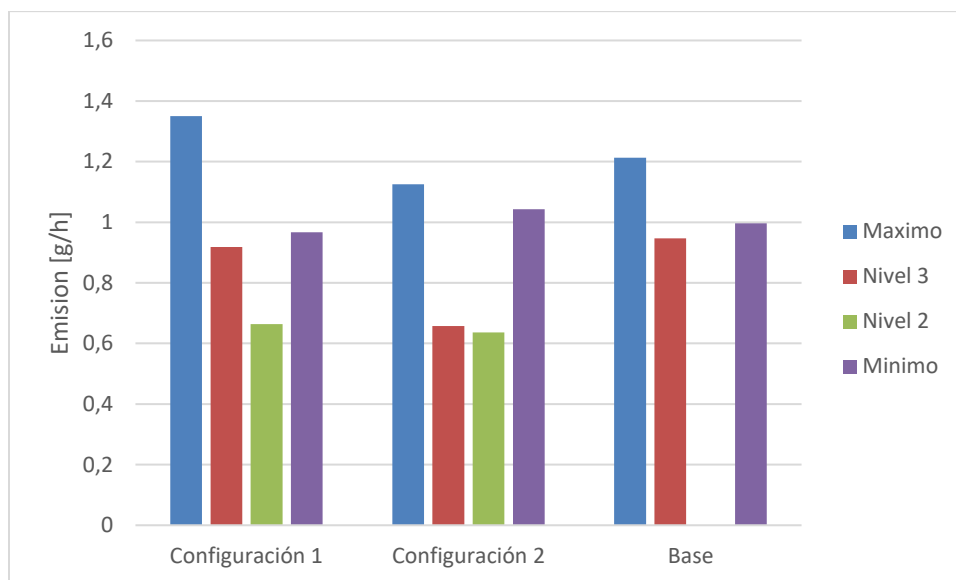


Gráfico 4.2: Emisión de material particulado total por nivel de tiraje

Se observa en los resultados obtenidos que existen 4 ensayos a diferentes tirajes en las configuraciones 1 y 2, sin embargo, para la configuración base solo se cuenta con 3 ensayos a distintos tirajes. Los tirajes que se encuentran en común para las 3 configuraciones ensayadas son: máxima, nivel 3 y mínima. Por esta razón, se analizaron los resultados sin considerar los ensayos realizados a nivel 2, ya que éstos muestran resultados más favorables por tener una menor potencia lo cual beneficiaría las configuraciones donde se utilizan medios porosos y podrían obtenerse resultados no fiables.

Para determinar el promedio ponderado de emisión se utilizó el procedimiento descrito en la sección 4.1.2. y se obtuvieron los resultados de la Tabla 4.8, ilustrados en el Gráfico 4.3.:

Tabla 4.8: Emisiones ponderadas de material particulado total

	Tiraje	Emisión [g/h]	Tasa quemado [kg/h]	Pi	Ki	Emisión ponderada [g/h]
Base	Mínimo	0,996	0,78	0,206	0,6104	1,02822078
	Nivel 3	0,947	1,29	0,6104	0,6442	
	Máximo	1,213	1,73	0,8502	0,3896	
Configuración 1	Mínimo	0,967	0,74	0,178	0,5912	1,03965369
	Nivel 3	0,918	1,27	0,5912	0,6898	
	Máximo	1,35	1,78	0,8678	0,4088	
Configuración 2	Mínimo	1,043	0,77	0,199	0,6404	0,9090218
	Nivel 3	0,658	1,33	0,6404	0,6512	
	Máximo	1,125	1,73	0,8502	0,3596	

Con los valores conseguidos, se obtuvo una disminución del 11,59% de emisión de material particulado total para la configuración 2 con respecto a la configuración base.

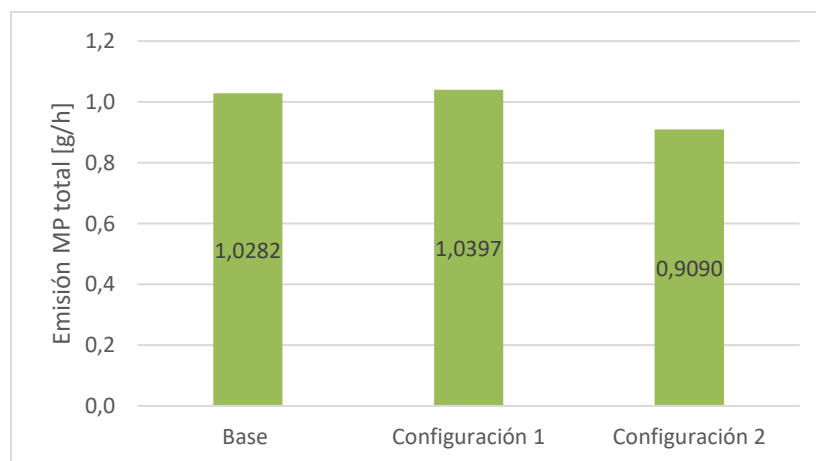


Gráfico 4.3: Emisiones ponderadas de material particulado total

4.8.3. Factor de emisión

A partir de los resultados anteriores, se puede calcular el factor de emisión (FE) para cada configuración, que representa la cantidad de material particulado emitido en gramos por unidad de kilogramo de combustible, utilizando la Ecuación 23:

$$\text{Factor de emisión} = \frac{\text{Emisión de MP Total [gMP/h]}}{\text{Tasa quemado [kg pellets/h]}} \quad (23)$$

La tasa de quemado se rige por la Ecuación 24:

$$\text{Tasa quemado} = \frac{\text{Combustible consumido[kg]}}{\text{Tiempo transcurrido[h]}} \quad (24)$$

Haciendo uso de estos conceptos y extrayendo datos tomados en los ensayos, se tienen los valores dados en la Tabla 4.9. y Tabla 4.10.

Tabla 4.9: Tasa de quemado

Tiraje	Tasa quemado [kg/h]		
	Base	Configuración 2	Configuración 1
Máximo	1,73	1,73	1,78
Nivel 3	1,29	1,33	1,27
Mínimo	0,78	0,77	0,74
Promedio	1,2667	1,2767	1,2633

Tabla 4.10: Factor de emisión

	Base	Configuración 1	Configuración 2
Emisión Material Particulado total[g/h]	1,0282	1,0397	0,9090
Tasa quemado[g/h]	1,2667	1,2633	1,2767
Factor emisión [g/kg]	0,8117	0,8230	0,7120

Con estos valores, se obtuvo una disminución del 12,28 % del factor de emisión en la configuración 2 con respecto a la configuración base.

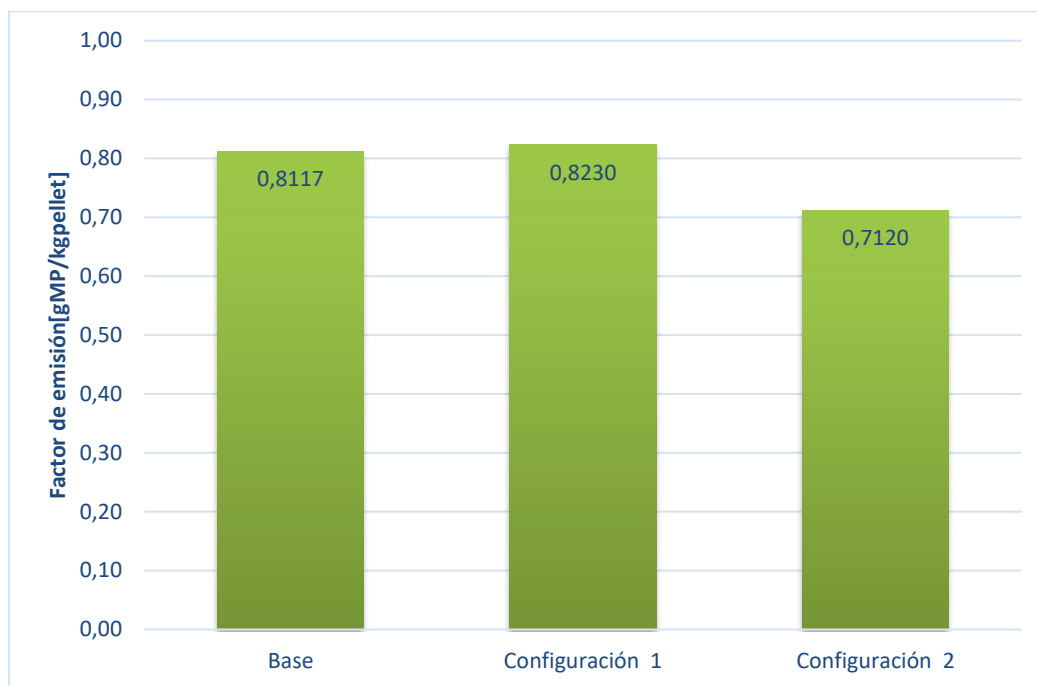


Gráfico 4.4: Factor de emisión

4.8.4. Análisis de impacto al implementar medios porosos inertes

De acuerdo a datos extraídos de un estudio del Ministerio de Energía (2015) se tiene la Tabla 4.11. correspondiente al consumo de pellets por región:

Tabla 4.11: Consumo promedio de pellets por región

	Penetración	N° de hogares que consumen pellets	Consumo promedio por hogar [kg]	Consumo total [kg]
Z.Norte	0%	0	0	0
V Región	0%	0	0	0
RM	0%	0	0	0

VI Región	0%	0	0	0
VII Región	0%	0	0	0
VIII Región	1,20%	7.582	1.238	9.383.740
IX Región	0,10%	434	1.200	520.901
XIV Región	0,40%	447	1.649	737.220
X Región	0%	0	0	0
XI Región	0,20%	74	2.002	148.163
XII Región	0%	0	0	0
Total	0,19%	8.537	1.264	10.790.024

Fuente: Extraído de (Ministerio de Energía, 2015)

Con los valores de consumo promedio de pellets total, se puede determinar la cantidad de material particulado emitida utilizando la Ecuación 25:

$$MP\ emitido[g] = FE\ [gMP/kg\ pellets] * Consumo\ total[kg\ pellets] \quad (25)$$

En la Tabla 4.12. expuesta a continuación se muestran los valores obtenidos para una estufa a pellets con y sin el uso de medios porosos, lo que en nuestro caso se traduce en valores utilizando la configuración base y la configuración 2. Para esto, se considera que en todos los hogares se utiliza la misma estufa correspondiente a la ensayada, sin embargo, la calidad de las estufas y del pellet varía dependiendo de la vivienda por lo que el cálculo realizado es una aproximación de lo que ocurriría si se implementara medios porosos inertes a cada estufa.

Tabla 4.12: Emisión de MP total por región en kg

	Consumo total [kg]	Factor de emisión config. base [gMP/kg pellets]	Emisión total config. base [gMP]	Factor de emisión config. 2 [gMP/kg pellets]	Emisión total config. 2 [gMP]	Variación de emisión MP [kg]
Z.Norte	0	0,8117	0	0,712	0	0
V Región	0	0,8117	0	0,712	0	0
RM	0	0,8117	0	0,712	0	0
VI Región	0	0,8117	0	0,712	0	0
VII Región	0	0,8117	0	0,712	0	0
VIII Región	9.383.740	0,8117	7.616.782	0,712	6.681.223	935.559
IX Región	520.901	0,8117	422.815	0,712	370.882	51.933
XIV Región	737.220	0,8117	598.401	0,712	524.901	73.500
X Región	0	0,8117	0	0,712	0	0
XI Región	148.163	0,8117	120.264	0,712	105.492	14.772
XII Región	0	0,8117	0	0,712	0	0
Total	10.790.024	0,8117	8.758.262	0,712	7.682.497	1.075.765

De acuerdo a la Tabla 4.12, se observa una gran disminución de material particulado total emitido por la estufa a pellet con el uso de la configuración 2 de MPI.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. CUMPLIMIENTO DE LA NORMA

En la estufa ensayada, se tiene una potencia nominal de 9 kW, por lo que según el decreto supremo 39 del Ministerio del Medio Ambiente el límite de emisión de material particulado es de 3,5 [g/h]. En el Gráfico 5.1. se representan los valores obtenidos en cada configuración y se compara con lo estipulado por la norma.

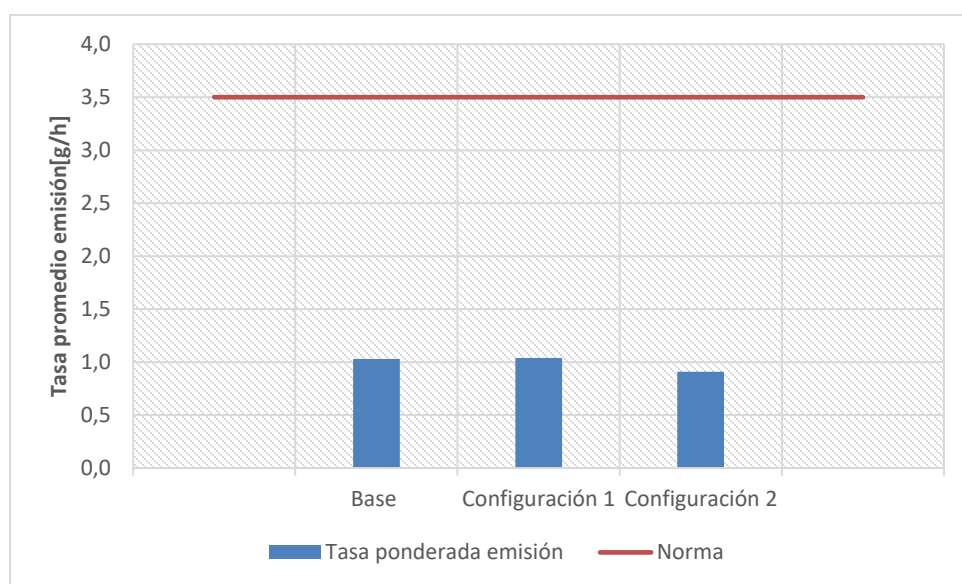


Gráfico 5.1: Tasa promedio de emisión de distintas configuraciones en comparación con la norma

Como se puede observar, en todas las configuraciones ensayadas, el valor de la emisión de material particulado total está muy por debajo del valor límite requerido por el D.S. 39. La razón de esta gran diferencia es que el valor límite está enfocado principalmente en calefactores a leña, que son más utilizados que los calefactores a pellets y, a la vez, más contaminantes.

En comparación con las estufas a leña, una estufa a pellets posee un sistema electrónico que controla diferentes parámetros, para optimizar la combustión, lo que provoca una gran mejora en las emisiones de diferentes contaminantes. Es por esto que las estufas a pellets no tienen problemas de certificación por emisión de material particulado.

Por otra parte, debido a que la norma no es muy estricta para este tipo de estufa, no deberíamos conformarnos solo con cumplirla, ya que el objetivo va más allá de cumplir con un valor específico: el objetivo es disminuir lo máximo posible el impacto al medio ambiente provocado por las estufas y, al mismo tiempo, disminuir los daños a los seres vivos causados por someterse a aire contaminado. Para contribuir al cumplimiento de este objetivo es que se desarrollan nuevas tecnologías de combustión como lo son los medios porosos inertes.

5.2. VALIDEZ DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación, los ensayos fueron realizados según el método CH-28 y método CH-5G, tratando de cumplir cada punto mencionado en éstos. Sin embargo, en algunos ensayos ocurrió un secado excesivo de filtros antes del pesaje final, lo cual se tradujo en una menor masa de estos, dando una diferencia negativa entre el pesaje final y el inicial. Es por esto que se realizó un ajuste en estos casos, el cual está explicado en el punto 4.8.2. Con este ajuste se llegaron a resultados razonables por lo que no se considera un error.

Para cada ensayo realizado existen variables que afectan la medición. Algunas de estas variables pueden ser la humedad del aire, humedad del pellet, temperatura ambiente, volumen de la habitación, errores humanos al medir, o como se mencionó en el párrafo anterior, un secado excesivo de filtros durante las 24 horas antes del pesaje final, entre otros.

Por otra parte, para los cálculos realizados no se utilizan valores exactos, ya que dependen de la resolución del instrumento y del usuario que realiza la medición. Además de esto, el valor final de la emisión ponderada se determina utilizando una tabla de probabilidad, lo que demuestra que los resultados obtenidos son en realidad una aproximación de la emisión de MP total de la estufa.

De acuerdo a los errores instrumentales, humanos y externos, mencionados anteriormente, se puede estimar un error experimental en el valor de la emisión de material particulado total de aproximadamente un 5%, siendo las mejoras obtenidas válidas, ya que son superiores al error estimado.

5.3. CONCLUSIONES GENERALES

Después de haber realizado esta investigación durante aproximadamente 1 año y con un período de pruebas de 2 meses, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Con los resultados obtenidos (ver Tabla 5.1.) se logró cumplir el objetivo, determinando una mejora en las emisiones de material particulado total para una estufa a pellets que posee medios porosos inertes (configuración 2) durante su proceso de combustión en comparación con la estufa en su diseño base. Este progreso en la tecnología de combustión es un gran avance para contribuir a la solución de problemáticas de interés común, como el efecto invernadero y enfermedades producidas por aire contaminado.
- Se estima que la razón de resultados poco favorables en la configuración 1 es que en dicha configuración no existe una adecuada recirculación de calor, ya que el medio poroso se encuentra bajo el quemador, lugar por donde no existe circulación de aire. Con respecto a la configuración 2, se podría explicar su eficacia debido a la formación de una pre mezcla dentro del MPI formada por los gases de la combustión y el aire circulante, donde el calor absorbido por el MPI quemaría esta pre mezcla antes de ser expulsada, obteniendo menor cantidad de gases contaminantes.
- Al analizar los valores de temperaturas externas de las paredes de la estufa, se observa que para los dos casos en los que se utilizan medios porosos, estas temperaturas son mayores con respecto a la estufa en su estado original. Esto indica que existe una mayor transferencia de calor hacia el ambiente, lo que aporta otro punto positivo del uso de medios porosos. Esta característica se debe a que el medio poroso absorbe el calor y lo mantiene, de forma que se alcanzan mayores temperaturas dentro de la cámara de combustión, transfiriéndose finalmente al exterior de la estufa.

- Con una disminución del 11,59% de emisiones de material particulado en estufas con medios porosos, se podría estar satisfechos, sin embargo, podrían lograrse mejores resultados con una investigación más amplia, utilizando mayor cantidad de configuraciones o combinando el uso de cerámicas porosas con otras tecnologías.
- Se debe destacar que el método utilizado (gravimetría) no permite un seguimiento online de las emisiones de material particulado, por lo que no puede determinarse las variaciones de las emisiones durante el proceso de combustión. Además, se determina el material particulado total de la estufa, lo que implica que no se conoce de que tipo de partículas están formadas las emisiones.
- Con respecto al análisis de emisiones de material particulado total por región mostrado en la sección 4.8.4. se observa una gran disminución en masa del material particulado emitido utilizando medios porosos inertes. Sin embargo, este análisis se hizo considerando la implementación de cerámica porosas en todos los hogares de cada región, lo cual es una meta difícil de lograr, ya que realizar esta acción tendría un elevado costo. La solución en este caso podría ser incluir la adición de medios porosos a las estufas mediante planes de descontaminación, o bien, centrarse en el diseño de nuevas estufas con esta tecnología y masificar su uso gradualmente.

Tabla 5.1: Resumen de resultados

	Configuración Base	Configuración 1	Configuración 2
Temperatura promedio paredes [°C]	65,19	70,43	67,32
Aumento de temperatura respecto de la configuración base	-	8,04 %	3,27 %
Emisión de material particulado total [g/h]	1,0282	1,0397	0,9090
Disminución de emisión de material particulado respecto de la configuración base	-	-	11,59 %
Factor de emisión [g/kg]	0,8117	0,8230	0,7120
Disminución del factor de emisión respecto de la configuración base	-	-	12,28 %

5.4. SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Gracias a la realización de esta investigación, fue posible llegar a variados resultados y conclusiones, sin embargo, durante el desarrollo de la investigación, se pudieron visualizar distintas posibilidades para optimizar el proceso de los ensayos y/o conseguir mejores resultados. Algunas sugerencias son:

- El uso de cerámicas porosas en forma circular dificultó el acoplamiento dentro de la estufa, ya que ésta tiene formas rectangulares en su interior. Por esto, para trabajar de una forma más cómoda y además dando la posibilidad de probar nuevas configuraciones de medios porosos en la estufa, se recomienda utilizar cerámicas porosas cuadradas o rectangulares.
- El material utilizado tiene excelentes propiedades térmicas, pero cuando se trabaja a altas temperaturas aumenta su fragilidad, por lo que se debe ser cuidadoso al momento de manipularlo.
- Al adaptar algún componente de la estufa incluyendo cerámicas porosas en su fabricación se podría obtener mejores resultados, ya que uno de los principales problemas al implementar medios porosos es que se disminuye el espacio para los demás componentes, además de dejar espacios vacíos que pueden hacer variar el aire de combustión. Se pensó en dos posibles nuevas configuraciones:
 1. Modificación de las paredes del quemador, reemplazándolas por cerámicas porosas, de forma que el MPI se encuentre en contacto directo con el combustible, y evitando la formación de una “capa de ceniza” al dejar la parte inferior del quemador tal como está.
 2. Modificación de la pared trasera de la cámara de combustión, reemplazando la parte superior por MPI de tal forma que los gases producidos por la combustión pasen por el MPI antes de ser expulsados.

Dichas posibilidades no pudieron ser realizadas debido a no tener el tiempo necesario o las herramientas requeridas, pero pueden ser de gran aporte para nuevas investigaciones sobre este tema.

En síntesis, la presente investigación aclaró el panorama sobre el uso de medios porosos inertes utilizados al combustionar pellets en estufas, permitiendo vislumbrar maneras de optimizar el proceso de combustión y disminuir la contaminación emitida por las estufas, aportando de esta forma con una mejora en la calidad del aire de nuestro país.

6. REFERENCIAS

- Alibaba. (2019). *Alúmina zirconia SIC porosa de espuma de filtro de cerámica para fundición de filtración*. Obtenido de Alibaba: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/alumina-zirconia-sic-porous-foam-ceramic-filter-for-casting-filtration-60445252838.html>
- Amesti. (2019). *Amesti*. Obtenido de Amesti: www.amesti.cl
- Azócar, L. (2017). *Chile aumenta el uso de pellet*. Obtenido de Bioenergy International: <https://bioenergyinternational.es/chile-aumenta-el-uso-de-pellet/>
- Bosca. (2019). *Bosca* . Obtenido de Bosca: www.bosca.cl
- Bosca. (2019). *Hera+* . Obtenido de Bosca: <https://www.bosca.cl/producto/heraplus/>
- Burgos, F. (2010). *La biomasa como fuente de energía sustentable*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Callister, W. D. (2000). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté.
- CHY. (2019). *Infrared thermometer with laser marker*. Obtenido de CHY Firemate CO.: <http://www.chy-meter.com/goods.php?act=view&no=121>
- Cointra. (2018). *Diferencia entre estufa de pellet, estufa canalizable y termoestufa*. Obtenido de Cointra: <https://www.cointra.es/blog-diferencia-estufa-pellet-estufa-canalizable-termoestufa/>
- Combustibles Aragón. (24 de Mayo de 2016). *Qué son los pellets y cuáles son sus aplicaciones*. Obtenido de Combustibles Aragón: <https://combustiblesaragon.es/que-son-los-pellets-y-cuales-son-sus-aplicaciones/>
- Comisión Nacional de Energía. (2019). *Anuario estadístico de energía 2018*. Comisión Nacional de Energía.

- Echeverri, C. A. (24 de Febrero de 2006). *Capítulo 2: Muestreo de los contaminantes en las emisiones*. Obtenido de mailxmail: <http://www.mailxmail.com/curso-fuentes-fijas/muestreo-contaminantes-emisiones>
- Herrera, A., Álvarez, O., Escobar, J., Moreno, V., Oliveira Jr., A., & Hotza, D. (2012). *Fabrication and characterization of alumina foams for application in radiant porous burners*. Obtenido de Scielo: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762012000200004
- Hildebrandt Gruppe. (2015). *Cómo funciona una caldera de biomasa*. Obtenido de Hildebrandt Gruppe: <http://www.hildebrandt.cl/como-funciona-una-caldera-de-biomasa/>
- Induceric. (2019). *Porous Ceramic*. Obtenido de Induceric: <http://www.induceric.com/>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2014). *Material particulado*. Obtenido de Instituto para la Salud Geoambiental: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>
- Mastech. (2019). *MS6513 / MS6514 - Digital Thermometer*. Obtenido de Mastech: <http://www.mastech-group.com/products.php?PNo=89>
- Met Mann. (2016). *Estufas de aire caliente e hidroestufas*. Obtenido de Interempresas: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/9804/catalogo-estufas-biomassa-15-16-.pdf
- Mettler Toledo. (2019). *bascula de mesa BBA231-3CC300A*. Obtenido de Mettler Toledo: https://www.mt.com/int/es/home/products/Industrial_Weighing_Solutions/floor-scales-heavy-duty/ind-basics/BBA231/BBA231-3CC300A.html
- Ministerio de Energía. (2015). *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*.

- Ministerio de Salud. (Marzo de 1996). Instituto de Salud Pública. *Método CH-3*. Chile: Ministerio de Salud.
- Ministerio de Salud. (Marzo de 1996). Instituto de Salud Pública. *Método CH-2*. Chile: Ministerio de Salud.
- Ministerio de Salud. (Diciembre de 2012). Instituto de Salud Pública. *Método CH-5G*. Chile: Ministerio de Salud.
- Ministerio de Salud. (Noviembre de 2013). Instituto de Salud Pública. *Método CH-28*. Chile: Ministerio de Salud.
- Ministerio del Medio Ambiente. (9 de Mayo de 2011). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. *Decreto 12*. Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (30 de Junio de 2012). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. *Decreto 39*. Chile.
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia; Comisión Nacional del Medio Ambiente. (25 de Mayo de 1998). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. *Decreto 59*. Chile.
- Mohamad, A. (2005). *Transport Phenomena in Porous Media III*. Calgary: Department of Mechanical and Manufacturing Engineering.
- Molina Sepúlveda, V. P., & Oyarzo Gómez, E. M. (2013). *Estudio de la factibilidad de un sistema eficiente de calefacción para la ciudad de Temuco*. Puerto Montt: Universidad Austral de Chile.
- Pereira Veloso, A. M. (2012). *Evaluación técnico - económica de alternativas a la calefacción residencial a leña en ciudades de la zona centro-sur de Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

- Radwag. (2019). *Balanza analítica AS 82/220.R2*. Obtenido de Radwag Balanzas Electrónicas: <https://radwag.com/es/balanza-analitica-as-82-220-r2,w1,2MP,101-101-107#1>
- Rika. (2019). *Estufa Combinada*. Obtenido de RIKA: <https://www.rika.es/stoves/combi>
- Salazar, F. (2018). *El mercado del pellet en Chile 2006-2016*. Obtenido de Asisma: <http://asisma.cl/infor-fic/wp-content/uploads/2016/09/Presentaci%C3%B3n-Felipe-Salazar-ECOMAS.pdf>
- Sebastián Nogués, F. (2010). *Energía de la biomasa*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Silva Castro, P. I. (2016). *Evaluación técnica del uso de esponjas cerámicas en proceso de combustión de leña en estufa comercial de calefacción residencial*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Sistema Nacional de Información Ambiental. (2018). *Estado del Medio Ambiente*. Obtenido de Sistema Nacional de información ambiental: <http://sistemaintegrador.mma.gob.cl/mma-centralizador-publico/indicador/vistaIndicador.jsf?subtema=3>
- Sodimac. (2019). *Sodimac*. Obtenido de Sodimac.
- Van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan.

7. ANEXOS

7.1. DEFINICIONES

Choque térmico: rotura de un material al sufrir un cambio drástico de temperatura.

Coeficiente de expansión térmica: cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura provocando una dilatación térmica.

Conductividad térmica: propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor

Constante dieléctrica: propiedad macroscópica de un medio dieléctrico (material con baja conductividad eléctrica) relacionado con la permitividad eléctrica del medio.

Decreto Supremo: orden escrita del Presidente de la República que, dictada dentro de la esfera de su competencia, lleva la firma del o los ministros de Estado respectivos y está sujeta a una tramitación especial.

Emisividad: proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura.

Inter acumulador: aparato que produce una acumulación de agua caliente para uso sanitario.

Morbilidad: cantidad de personas que enferman en un lugar y un período de tiempo determinados en relación con el total de la población.

Método CH-1: método chileno definido como “Localización de puntos de muestreo y de medición de velocidad para fuentes fijas”.

Método CH-2: método chileno definido como “Determinación de la velocidad y de el flujo volumétrico de gases de chimenea (tubo Pitot tipo S)”.

Método CH-3: método chileno definido como “Análisis de gas para la determinación del peso molecular seco”.

Percentil: medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo de observaciones.

Promedio trianual: promedio estadístico que se realiza 3 veces al año.

7.2. PLATAFORMA EXCEL UTILIZADA

La plataforma utilizada para el cálculo de material particulado contiene las fórmulas descritas por el método CH-5G y método CH-28. Con el uso de estas fórmulas ingresadas en el programa, se facilitaron los cálculos, obteniendo el resultado para cada ensayo ingresando los valores medidos.

Dentro de la plataforma hay 3 pestañas, en las cuales los cuadros rellenos de amarillo son para completar por el usuario, mientras que los cuadros rellenos de rojo son valores calculados por el programa.

7.2.1. Material Particulado

En esta pestaña se exponen los parámetros preliminares al ensayo, es decir, durante el pre-ensayo. La función de esta pestaña es recoger datos de control del proceso (temperaturas y presiones del sistema) para determinar el caudal de muestreo que se requerirá en el ensayo. Además, es acá donde se anotan la masa inicial y final de los filtros.

8	INFORMACIÓN PREENSAYO								
9	Traversa de velocidad	medicion 1	medicion 2	medicion 3	medicion 4	medicion 5	medicion 6	medicion 7	medicion 8
10	Presión diferencial (mmca)	0,59	0,59	0,59	0,57	0,57	0,58	0,58	0,57
11									
12	Promedio temperatura túnel	30	°C						
13	Ps	763,40	Valor kPascal						
14	Presión barométrica (mmHg)	762,8	101,7						
15	Presión estática promedio en el túnel de dilución (mmca)	8		Max 7-8	Min 4-5				
16	DP (mmca)	0,58							
17									
18	Diámetro interior túnel (m)	0,148							
19	Flujo de gases en el túnel (Qtunel m3/s)	0,0535718							
20	Área transversal túnel (m2)	0,0171946							
21									
22	Flujo en condiciones estandar (Sm3/hr)	187,33		Ref	3,55	min			
23	Flujo en condiciones estandar (Sm3/min)	3,12		(Sm3/min)	4,45	max			
24									
25	Cálculo de velocidad en el túnel								
26	$Vs = Kp \cdot Cp \cdot \sqrt{(DP \cdot Ts) / (Ps \cdot Md)}$								
27	Velocidad promedio del gas en el túnel (m/s)			3,12	3,67	Ref			
28	Velocidad promedio del gas en el túnel (m/min)			186,94					
29	Constante Tubo Pitot			34,97					
30	Coefficiente del tubo pitot			1					
31	Presión de velocidad promedio de los gases del túnel (mmca)			0,580					
32	Temperatura promedio de los gases en el túnel (K)			303					
33	Presión absoluta en el túnel (mmHg)			763,40					
34	Masa molar del gas en la chimenea (g/mol)			29					
35									

7.2.3. Informe

En esta pestaña se anotan algunos datos concretos que caracterizan al ensayo: humedad del combustible, condiciones ambientales, hora de inicio y término del ensayo, entre otros. Además, el resultado final para el ensayo es mostrado en esta pestaña, junto a la tasa de quemado y la categoría correspondiente.

Caracterización del Ensayo	
9	Fecha Ensayo
10	Fecha Pre-Ensayo
11	Cliente
12	Contacto
13	Artefacto Estufa a Pellet
14	Marca Bosca
15	Modelo Hera+
16	Potencia Nominal 9 kW
17	N° de Serie
18	N° de Ensayo
19	Encargado
20	Laborante
21	Condición de operación
22	Maxima
Características del combustible	
25	Tipo combustible Pellet
26	Tamaño N° piezas
27	2"x4"
28	4"x4"
29	Separadores
30	Carga a Cortar [kg] 0,00
31	Largo de Unidad a cortar [cm] #¡DIV/0!
32	
Datos listón de madera	
34	Peso de Madera [kg]
35	Largo Madera [cm]
36	
37	

RESUMEN DE RESULTADOS				
Variable	Unidad	Valor Promedio	Incertidumbre	
Tasa de quemado	kg/h	1,73	±	
Categoría (NCH-28)	N/A	3	N/A	
Emisión	g/h	1,1	±	

Registro de condiciones ambientales				
Variable	Unidad	Inicial	Final	Promedio
Hora medición	hh:mm	10:52	12:52	
Presión atmosférica	kPa	101,7	101,8	101,8
Temperatura	°C	14,5	20,6	17,6
Velocidad aire	m/s	0	0	0,0
Humedad relativa	%	37	36	36,5

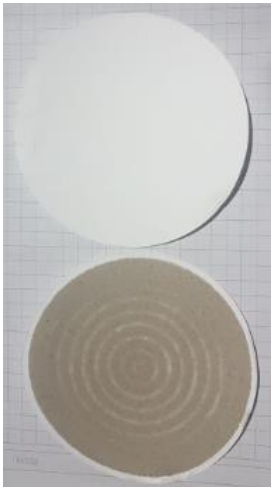
Carga de ensayo	Foto Artefacto

Informe
Material Particulado
Registro
Hoja1
+

7.3. ESTADO DE FILTROS AL FINALIZAR LOS ENSAYOS

Las fotos tomadas después de pesar los filtros al finalizar el proceso del ensayo se muestran en las siguientes tablas.

- Tiraje: Máximo

Configuración Base	Configuración 1	Configuración 2
		

- Tiraje: Mínimo

Configuración Base	Configuración 1	Configuración 2
		

- Tiraje: Nivel 3

Configuración Base	Configuración 1	Configuración 2
		

- Tiraje: Nivel 2

Configuración 1	Configuración 2
	