



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

“Un nuevo método para la medición del caudal másico de Material Particulado con fotometría óptica en estufas a leña en ductos de dilución”

PARA OBTENER EL GRADO DE
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

NICOLÁS DANIEL GUTIÉRREZ CÁCERES

Temuco - Chile 2018

“A novel method for measure the mass flow of particulate matter
with photometry on dilution tunnel in wood stoves”

Esta tesis fue realizada bajo la supervisión del Director del Área de Termo fluidos, Dr. Robinson Betancourt Astete del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad de la Frontera y ha sido aprobada por los miembros de la comisión examinadora.

NICOLÁS DANIEL GUTIÉRREZ CÁCERES

2018

“Un nuevo método para la medición del caudal másico de Material Particulado con fotometría óptica en estufas a leña en ductos de dilución”

“A novel method for measure the mass flow of particulate matter with photometry on dilution tunnel in wood stoves”

DR. ING. ROBINSON EUGENIO BETANCOURT ASTETE
Profesor Guía

Profesor Examinador 1

Profesor Examinador 2

Profesor Examinador 3

Profesor Examinador 4

Nota trabajo escrito :

Nota examen :

Nota final :

A mis Padres

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mi familia, Pola Gutiérrez, Hilda Cáceres, Dalva Gutiérrez y Felipe Gutiérrez, quienes con su amor y consejo, me apoyaron en mis momentos de claridad y guiaron en los momentos de confusión.

Agradezco enormemente el apoyo y disposición entregado por el equipo del Laboratorio de Combustión y Partículas, Tomás Mora, Álvaro González, Yaniff Olivos y Emilio Belmar, especialmente a Don Robinson Betancourt, por el apoyo entregado y la oportunidad de participar en cada uno de los proyectos que hemos abordado como equipo de investigación.

También agradecer a cada uno de mis profesores que han aportado tanto en mi formación de Ingeniero como de Investigador, a Don Eduardo Diez, Don Mario Guzmán, Don René Cifuentes, Don Ricardo Alzugaray y Don Rodrigo Navia.

RESUMEN

Se propone un sistema de monitoreo de partículas emitidas por combustibles de madera para determinar las variaciones en la concentración de partículas en un túnel de dilución, por medio de un sistema basado en la opacidad óptica de los gases. El objetivo de este método es validar el perfil de concentración a lo largo de la sección transversal de la tubería de dilución, al aplicar la metodología 5G para la determinación de la concentración de partículas.

El sistema está compuesto por un sensor y un emisor óptico que son utilizados para medir el flujo másico de material particulado, generado por la combustión de biomasa. La metodología 5G se compara con la metodología de fotometría de gas transversal implementada en esta investigación. La ventaja del sistema fotométrico se debe a que es un método no invasivo y es de bajo costo. Mientras que su desventaja es la resolución y precisión de la medición obtenida, presentando una incertidumbre expandida de 4 por ciento más alta que la del método 5G. Por lo tanto, se demuestra que la técnica de fotometría de gas transversal, basada en la opacidad del humo, puede ser un enfoque eficaz para determinar la concentración de material particulado durante el proceso de combustión de biomasa en ductos de dilución.

ABSTRACT

A monitoring system for particles emitted by wood fuels is proposed to determine variations in particle concentration in a dilution tunnel, using a system based on the optical opacity of gases. The objective of this method is to validate the concentration profile along the cross-sectional area of the dilution pipe, applying the 5G methodology for particle concentration determination.

The system consists of a sensor and an optical emitter used to measure the mass flow of particulate matter generated by biomass combustion. The 5G methodology is compared with the transverse gas photometry methodology implemented in this research. The advantage of the photometric system is that it is non-invasive and low-cost. However, its disadvantage lies in the resolution and precision of the measurement obtained, with an expanded uncertainty 4 percent higher than that of the 5G method. Therefore, it is demonstrated that the transverse gas photometry technique, based on smoke opacity, can be an effective approach for determining particulate matter concentration during biomass combustion processes in dilution ducts.

Índice de Contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Problema.....	3
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
Capítulo 2. Biocombustibles lignocelulósicos	5
2.1. Características químicas	6
2.1.1. Composición química	6
2.2. Características físicas	7
Capítulo 3. Material Particulado	8
3.1. Efectos del Material Particulado en la salud humana	8
3.2. Definición y aspectos del Material Particulado.....	9
3.3. Formación del Material Particulado por Combustión de Biomasa.....	10
3.3.1. Formación de Cenizas.....	11
3.3.1.1. Liberación de metales alcalinos en la combustión de biomasa	12
3.3.2. Formación de Hollín	13
3.3.3. Formación de material orgánico	13
3.4. Mecanismos de transformación de partículas.....	13
3.5. Caracterización del Material Particulado.....	15
3.5.1. Composición	15
3.5.2. Propiedades ópticas del Material Particulado	17
3.5.2.1. Coeficiente de absorción o extinción de hollín	18
Capítulo 4. Principios de Radiometría	19
4.1. Radiación y Espectro Electromagnético.....	19
4.1.1. Espectro Electromagnético Visible y Ultravioleta cercano	20
4.2. Transmitancia y absorbencia	20
4.2.1. Ley de Bouguer.....	21
4.3. Opacímetro y correlación Óptica-Concentración.....	23

4.3.1.	Tipos de Opacímetros	24
Capítulo 5. Materiales y Métodos		26
5.1.	Experimentación.....	26
5.1.1.	Línea de Material Particulado.....	27
5.1.1.1.	Material Particulado no controlado	27
5.1.2.	Estructura soportante de sensores y micro controladores	28
5.1.3.	Sistema óptico.....	29
5.1.4.	Sistema de procesamiento de datos y diagnóstico óptico	30
5.2.	Arquitectura de la solución.....	30
5.2.1.	Estructura de Hardware.....	30
5.2.2.	Estructura de Software.....	31
5.2.2.1.	Software y lenguaje de programación.....	31
5.2.2.2.	Módulos y librerías para Arduino	32
5.3.	Metodología de Ensayos.....	33
5.3.1.	Ensayos de Material Particulado según Metodología Ch-28 y 5G.....	33
5.3.2.	Ensayos de Material Particulado según Fotometría Óptica de Partículas.....	33
5.3.3.	Condiciones de operación generales de los ensayos.....	34
5.3.4.	Ensayos de Material Particulado mediante Fotometría Óptica.....	34
5.3.4.1.	Modelo de correlación a resolver	34
5.3.4.2.	Modelo de Factor de Ajuste para concentración por fotometría óptica	35
5.3.4.3.	Factor de Ajuste de Métodos.....	35
5.3.4.4.	Densidad básica de la madera	36
5.3.4.5.	Incertidumbre de medidas	36
5.3.4.5.1.	Incertidumbre estándar	36
5.3.4.5.2.	Incertidumbre estándar combinada.....	37
5.3.4.5.3.	Incertidumbre Expandida	38
Capítulo 6. Resultados y discusiones		39
6.1.	Condiciones de operación de los elementos de ensayos.....	39
6.1.1.	Propiedades químicas del combustible utilizado	39
6.1.1.1.	Densidad básica.....	39
6.1.1.2.	Contenido de humedad.....	40
6.1.1.3.	Geometría, volumen y densidad del combustible en cámara	40

6.2.	Análisis de resultados del sensor óptico	40
6.2.1.	Resultado del análisis Incertidumbre Expandida.....	42
6.2.2.	Determinación del valor inicial del sensor.....	43
6.2.3.	Resultados de las mediciones.....	43
6.3.	Análisis de resultados de concentración y flujo másico determinado	43
6.3.1.	Resultados obtenidos con el sensor.....	45
6.3.1.1.	Emisión de material particulado en estufa N°1	45
6.3.1.2.	Emisión de material particulado en estufa N°2	47
6.3.1.3.	Emisión de material particulado en cocina a leña N°1	49
6.3.2.	Análisis de concentración óptica versus Densidad Óptica.....	51
6.4.	Análisis y resultados del comportamiento de los combustores	53
6.4.1.	Decaimiento de masa	53
	El decaimiento de masa obtenido en la estufa N°2 presentaron diferencias máximas de 16% aproximadamente. Diferencia que se demostró a lo largo de los ensayos.....	53
	Capítulo 7. Conclusiones y Perspectivas.....	55
	Capítulo 8. Bibliografía.....	57
	Capítulo 9. Anexos	61
9.1.	Anexo A (Tablas resultados referentes a las mediciones del Ch-28).....	61
9.2.	Anexo B (Sistema Electrónico).....	64
9.2.1.	Anexo C (Estadística e Incertidumbre).....	65

Índice de Tablas

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la utilización de la biomasa dendroenergética como combustible. (Vassilev, Baxter, & Andersen, 2009).....	5
Tabla 2: Propiedades químicas (análisis proximal) obtenidas en distintas biomásas. (Ebeling & Jenkins, 1985) (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)	6
Tabla 3: Propiedades químicas (análisis elemental) obtenidas en distintas biomásas. (Ebeling & Jenkins, 1985) (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)	7
Tabla 4: Propiedades de densidad y humedad en base seca de distintos formatos de madera. (Huhtinen, 2006).....	7
Tabla 5: Respuestas biológicas a presencia de gases de combustión (Bolling, Pagels, & Yttri, 2009).....	9
Tabla 6: Composición química del Material Particulado (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)...	16
Tabla 7: Clases y propiedades del Material Particulado. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003) ...	17
Tabla 8: Propiedades ópticas de partículas de “hollín” de diversos combustibles. (Colbeck, Atkinson, & Johar, 1997) (Mulholland & Croarkin, 2000).....	18
Tabla 10: Instrumentos y sensores utilizados en la investigación. (Elaboración propia).....	31
Tabla 11: Condiciones de operación ensayos de Material Particulado. (Instituto de Salud Pública CH-28, 2013)	34
Tabla 12: Características de la metodología usada en la investigación. (Elaboración propia).....	39
Tabla 13: Parámetros y condiciones que se utilizaron en la investigación. (Elaboración propia) .	39
Tabla 14: Poder calorífico inferior de muestras de combustible Eucalyptus Globulus. (Laboratorio de Combustión y Partículas, UFRO).....	39
Tabla 15: Densidad básica de muestras de combustible de ensayo. (Elaboración propia).....	39
Tabla 16: Contenido de humedad en base seca de muestras de combustible de ensayo. (Laboratorio de Combustión y Partículas, UFRO).....	40
Tabla 17: Propiedades obtenidas en cada muestra del combustible de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)	40
Tabla 18: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Estufa N°1. (Elaboración propia)....	41
Tabla 19: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Estufa N°2. (Elaboración propia)....	41
Tabla 20: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Cocina N°1. (Elaboración propia)....	42
Tabla 21: Incertidumbre expandida de los resultados de intensidad del Foto-receptor. (Fuente: Elaboración propia)	42
Tabla 22: Resultados Medidos y porcentaje de incertidumbre aplicado al valor medido. (Fuente: Elaboración propia)	43
Tabla 23: Resultados de intensidades iniciales utilizadas en la investigación, para cada ensayo. (Elaboración propia).....	43
Tabla 24: Resultados comparativos de emisión de Material Particulado. (Elaboración propia)....	44
Tabla 25: Resultados de temperaturas de humos en ducto de dilución, según Metodología Ch-28. (Elaboración propia).....	61
Tabla 26: Resultados de la carga de combustible utilizado en los ensayos. (Elaboración propia).	61

Tabla 27: Resultados del porcentaje de humedad en base húmeda, del combustible Eucalyptus Globulus. (Elaboración propia)	62
Tabla 28: Tabla de resultados de ensayos de Calorimetría Directa con Calorímetro. (Elaboración propia).....	62
Tabla 29: Correlación de Voltaje emisor LED con Intensidad detectada por Fotodiodo. (Elaboración propia).....	63
Tabla 30: Especificaciones técnicas del emisor de luz led HP5. (Fuente: Empresa DEMASLED SPA.).....	64
Tabla 31: Valores de corrección de t para incertidumbre de repetibilidad. (Instituto Nacional de Normalización, 2017).....	65

Índice de Figuras

Figura 1: Aporte de Contaminantes Atmosféricos por parte de fuentes en Temuco y Padre Las Casas (Instituto de Salud Pública Chile, 2012)	2
Figura 2: Composición de Biomasa correspondiente al Tronco. (Simoneit, Schauer, & Nolte, 1999).....	6
Figura 3: Esquema de la formación de componentes derivados de la combustión de madera. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003).....	14
Figura 4: Proceso de transformación de los gases de combustión desde la combustión hasta la dilución en la atmosfera. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)	15
Figura 5: Composición química de Partículas Orgánicas de la combustión de biomasa. (Johansson, Tullin, & Leckner, 2003).....	16
Figura 6: Espectro Electromagnético. (Smith, King, & Wilkins, 2008)	19
Figura 7: Principio básico de opacidad aplicada. (Elaboración propia).....	21
Figura 8: Respuesta espectral de la luz Fotópica e Incandescente. (R.A. Herrick, 2003).....	23
Figura 9: Rangos estándares de Mediciones de Densidad Óptica en humos y Opacidad. (R.A. Herrick, 2003).....	24
Figura 10: Correlación entre Transmitancia Óptica y Concentración. (R.A. Herrick, 2003).....	24
Figura 11: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Total en Línea (Bodin, 2010).....	25
Figura 12: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Total tipo Estela. (Bodin, 2010).....	25
Figura 13: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Parcial. (Bodin, 2010).....	25
Figura 14: Esquema del banco de pruebas. (Elaboración propia)	26
Figura 15: Esquema túnel de dilución adaptado para Fotometría. (Fuente: Laboratorio de Combustión y Partículas).....	27
Figura 16: Estructura referencial utilizada para soporte del sistema electrónico en la investigación. (Fuente: Elaboración Propia)	28
Figura 17: Ampolleta emisora led utilizada en la investigación. (Elaboración propia)	29
Figura 18: Receptor de luz Fotodiodo TSL2561 utilizado en la investigación. (Elaboración propia).....	29
Figura 19: Estructura de Hardware implementada en la investigación. (Elaboración propia).....	30
Figura 20: Diagrama de operación del software desarrollado para la investigación. (Elaboración propia).....	32
Figura 21: Gráfico de intervalos de probabilidad de valor verdadero. (Instituto Nacional de Normalización, 2017).....	38
Figura 22: Correlación de Intensidad recibida por Foto-receptor y Voltaje del emisor led. (Fuente: Elaboración propia)	41

Figura 23: Gráfico comparativo de resultados de MP entre Fotometría Óptica y Metodología Ch-5G. (Elaboración propia).....	44
Figura 24: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 10 minutos, en Estufa N°1. (Elaboración propia).....	45
Figura 25: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Estufa N°1. (Elaboración propia).....	46
Figura 26: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 30 minutos, en Estufa N°2. (Elaboración propia).....	47
Figura 27: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Estufa N°2. (Elaboración propia).....	48
Figura 28: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 30 minutos, en Cocina N°1. (Elaboración propia).....	49
Figura 29: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Cocina N°1. (Elaboración propia).....	50
Figura 30: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 1. (Elaboración propia).....	51
Figura 31: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 2. (Elaboración propia).....	51
Figura 32: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 3. (Elaboración propia).....	51
Figura 33: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 6. (Elaboración propia).....	51
Figura 34: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 7. (Elaboración propia).....	52
Figura 35: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 10. (Elaboración propia)....	52
Figura 36: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 11. (Elaboración propia)....	52
Figura 37: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 12. (Elaboración propia)....	52
Figura 38: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 13. (Elaboración propia)....	53
Figura 39: Decaimiento de masa en Estufa N°1. (Elaboración propia).....	53
Figura 40: Decaimiento de masa en Estufa N°2. (Elaboración propia).....	53
Figura 41: Decaimiento de masa en Cocina N°1. (Elaboración propia).....	54
Figura 42: Especificaciones técnicas de receptor de luz Fotodiodo TSL2561. (Fuente: Texas Advanced Optoelectronic Solution.)	64

Nomenclatura

Símbolos Químicos

<i>N</i>	Nitrógeno
<i>C</i>	Carbono
<i>H</i>	Hidrógeno
<i>S</i>	Azufre
<i>O</i>	Oxígeno
<i>Ca</i>	Calcio
<i>Mg</i>	Magnesio
<i>Al</i>	Aluminio
<i>Fe</i>	Fierro
<i>Si</i>	Silicio
<i>Mn</i>	Manganeso
<i>Cl</i>	Cloro
<i>S</i>	Azufre
<i>KOH</i>	Hidróxido de Potasio
<i>SO_x</i>	Óxidos de Azufre
<i>NO_x</i>	Óxidos de Nitrógeno
<i>CO₂</i>	Dióxidos de Carbono
<i>CO₃</i>	Carbonato
<i>HCl</i>	Ácido Clorhídrico
<i>KCl</i>	Cloruro de Potasio
<i>CH₄</i>	Tetra hidruro de Carbono, Metano
<i>LOQ</i>	Quantitation and limit of quantitation
<i>PCI</i>	Poder Calorífico del Combustible
<i>MV</i>	Material Volátil
<i>CF</i>	Carbono Fijo
<i>COC</i>	Compuestos Orgánicos Condensables
<i>BC</i>	Black Carbon o Carbono Negro
<i>VOC</i>	Compuestos Orgánicos Volátiles
<i>FS</i>	Fracción Sólida

<i>FV</i>	Fracción Volátil
<i>FOS</i>	Fracción Orgánica Soluble
<i>HAP</i>	Hidrocarburo Aromático Policíclicos
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior

Procedimientos

<i>Ch – 28</i>	Metodología de Determinación de Material Particulado y Certificación y Auditoria de Calefactores a Leña
<i>Ch – 5</i>	Metodología de Determinación de Emisiones de Partículas en Fuentes Estacionarias
<i>Ch – 5G</i>	Metodología de Determinación de Emisiones de Partículas de Calefactores a Leña medidas desde un túnel de Dilución
<i>EPA</i>	Environmental Protection Agency

Óptica

λ	Longitud de onda incidente
ν	Frecuencia del ancho de onda
c	Velocidad de la luz
$^{\circ}A$	Angstrom
I	Intensidad del haz de luz recibido
I_0	Intensidad del haz de luz incidente
TB	Transmitancia.
m	Número de concentración de partículas.
a	Área proyectada de las partículas.
Q	Coefficiente de extinción de las partículas.
l	Longitud de la trayectoria de la luz a través de los gases de combustión.
D	Densidad óptica
A_E	Coefficiente específico de extinción
m_n	Masa de partículas

r Radio aparente de partículas

Estadística

n Número de muestras

x_i Promedio lineal de la muestra i

w_i Frecuencia lineal de la muestra i

k Factor de cobertura de probabilidad de ocurrencia

U Incertidumbre expandida

VM Valor medido

RM Resultado medido

$E_{\bar{w}}$ Promedio ponderado global

u_{EA} Incertidumbre estándar

$w_c(Y_{ind})$ Incertidumbre estándar combinada

Propiedades termodinámicas

ρ_{comb} Densidad del Combustible

ρ_m Densidad de la madera

W_m Humedad de la madera

V_{comb} Volumen del Combustible

Q_h Caudal de humos circulante por el ducto de dilución

v_{humos} Velocidad humos circulante por el ducto de dilución

A_{ducto} Área transversal del ducto de dilución

E_{adj} Emisión de Material Particulado según Ch-5G

E_{MP} Emisión de Material Particulado según Ch-28

Da Unidad de medida Dalton

D_A Densidad básica de madera proveniente de la zona de Arauco

D_V Densidad básica de madera proveniente de la zona de Valdivia

E Edad promedio de árboles en una zona

MP_{10} Material Particulado superior a 10 micras

$MP_{2,5}$ Material Particulado superior a 2,5 micras

Capítulo 1. Introducción

La contaminación atmosférica, producto de gases de combustión y polución ambiental, es el principal desafío para la autoridad ambiental a nivel mundial. Hoy 10 millones de personas en el país están expuestas a una concentración promedio anual de $MP_{2,5}$, superior a la norma (Instituto de Salud Pública Chile, 2012). Según la Organización Mundial de La Salud la contaminación atmosférica es responsable de al menos 4 mil muertes prematuras a nivel nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2014). Además de la disminución de visibilidad en las ciudades debido a partículas en suspensión, como también el daño que genera a nivel estructural en edificaciones y destrucción de flora (Vargas, 2011). Así es como uno de éstos contaminantes atmosféricos se clasifica según su diámetro, característica de la cual depende la intensidad de sus impactos.

A la fecha la contaminación atmosférica está presente en gran parte del País, principalmente es una situación que aqueja desde el Sur de Santiago hasta Coyhaique, en donde las regiones desde el Biobío hasta Aysén el uso domiciliario de biomasa es superior al 90% de la matriz energética local para usos de calefacción y cocción (División de Eficiencia Energética - Ministerio de Energía, 2015). Según los informes y estudios nacionales, la mayoría de las ciudades de la zona Sur de Chile, tales como Concepción, Osorno, Puerto Montt, Valdivia, Temuco y Padre las casas, están en presencia de promedios anuales de emisión, que superan los $20 \mu g/m^3 MP_{2,5}$ y $50 \mu g/m^3 MP_{10}$ (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

Actualmente la ciudad de Temuco y Padre las casas, se encuentran en proceso de abatimiento de polución ambiental, exigiendo las autoridades restricciones de funcionamiento de calefactores domiciliarios que utilicen biomasa forestal o dendroenergéticos como combustible. Con el fin de evitar la sobre generación de contaminantes atmosféricos en épocas de otoño e invierno, se instaura el Plan de Descontaminación Atmosférica, que se lleva a cabo en las comunas de Temuco y Padre las Casas para $MP_{2,5}$ y MP_{10} , en donde entrega medidas y cumplimientos aplicados a; combustión residencial, quemas agrícolas residenciales y forestales, emisiones industriales y enfocadas al transporte (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

El problema más notorio se debe al Material Particulado, cuya clasificación es según su métrica. Las partículas de fracción gruesa consideradas con un diámetro de 2,5 a 10 micrones, y las de fracción fina que son menores a 2,5 micrones (Instituto de Salud Pública Chile, 2012). Considerando que las concentraciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} se producen principalmente debido a emisiones directas e indirectas que pueden formarse por reacciones químicas entre contaminantes gaseosos precursores del material particulado, tales como SO_x , NO_x y otros compuestos atmosféricos. Éstos son provocados desde el punto de vista antropogénico, por emisiones de fuentes fijas y móviles, correspondientes a calderas, generadores eléctricos, estufas, incineraciones forestales y, para el caso de las móviles, vehículos motorizados (Instituto de Salud Pública Chile, 2012).

Las diferentes entidades que participan en la fiscalización, control y políticas de abatimiento de los contaminantes atmosféricos, son el Seremi del Medio Ambiente, el Seremi de Salud y La Superintendencia de Medio Ambiente. Dentro de las fiscalizaciones que se realizan a nivel nacional se encuentran los informes de emisión de gases de combustión, cuyo método de muestreo corresponde a las mediciones Isocinéticas en Fuentes Fijas y Móviles.

Según el Ministerio del Medio Ambiente, la distribución de contaminación por tipo de fuente está representada en la siguiente figura (Instituto de Salud Pública Chile, 2012) (Instituto de Salud Pública CH-28, 2013).

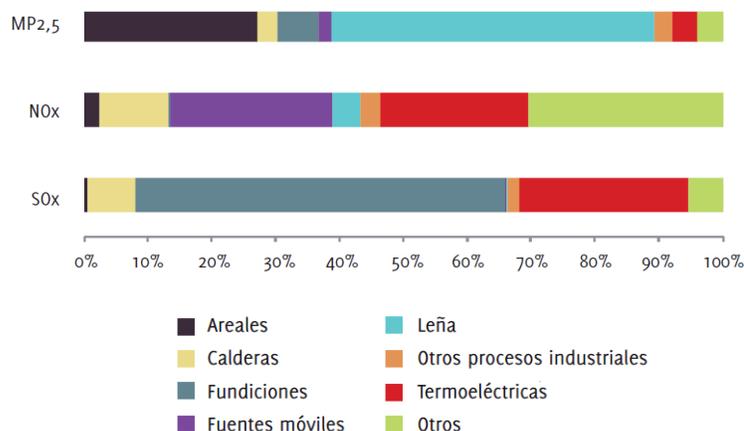


Figura 1: Aporte de Contaminantes Atmosféricos por parte de fuentes en Temuco y Padre Las Casas (Instituto de Salud Pública Chile, 2012)

De lo anterior se demuestra que la combustión por biomasa forestal o leña en sistemas de calefacción doméstica es cercana al 50% de los precursores de la contaminación ambiental en Temuco y Padre las Casas. Esto se debe a que los sistemas de control que utilizan la mayoría de los artefactos de combustión domiciliaria presentes en estas comunas, no cuentan con sistema de regulación eficiente de aire para asegurar una óptima combustión, a diferencia de otros equipos como lo son calderas las industriales de combustibles líquidos y gaseosos, con un robusto sistema de control que permite una generación eficiente de energía térmica.

En este marco, la presente Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, trata el análisis de factibilidad de diseño y desarrollo de un sistema óptico de bajo costo de monitoreo de Material Particulado para estufas y cocinas a leña.

Existen diversas herramientas tecnológicas de monitoreo y control de contaminantes atmosféricos, como analizadores de gases, opacímetros y muestreadores Isocinéticos. Particularmente este trabajo se centra en el desarrollo de dos aspectos importantes, el primero en la recopilación bibliográfica que permita abordar el concepto de opacidad para gases de combustión y segundo, la implementación de un sistema emisor-receptor óptico similar a un Opacímetro de Flujo Total en línea para medir la emisión del material particulado, ubicándose el sistema en la sección de extracción de MP en el ducto de dilución de estufas, en el Laboratorio de Medición de Estufas según la Metodología Ch-28 y Ch-5G.

1.1. Problema

Las mediciones de la polución ambiental debido a gases de combustión, presentan inconvenientes relacionados a los tiempos de preparación de muestras y recopilación de datos (Instituto de Salud Pública CH-28, 2013), que alcanzan en los ensayos de isocinetismo en calderas industriales la media de ocho horas de medición en régimen de funcionamiento normal, con el fin de obtener datos consistentes estadísticamente. Incluso para los ensayos de material particulado realizados en estufas de combustión domiciliaria los tiempos de muestreo y resultados de las muestras son similares.

Considerando lo antes expuesto, la experimentación y determinación real del material particulado presenta diversas restricciones, que afectan tanto a la obtención como al análisis de muestras, dificultando la aplicación de modelos y estudios que evalúen la generación de MP bajo condiciones locales, como: características del combustible, sistemas de combustión, relación aire combustible, densidad del aire, y además de los parámetros del equipo que realice la combustión. Dentro de los métodos matemáticos, la metodología analítica para la implementación de modelos y simulaciones asistidas por *Computational Fluid Dynamics* (CFD), consisten en evaluar la emisión en condiciones específicas y variables acotadas debido a la limitante tecnológica que existe actualmente, tanto para medir el material particulado como para modelar el fenómeno en sí.

Abordar el desarrollo de una alternativa de muestreo que permita obtener la concentración de Material Particulado en tiempo real y de manera más exacta, es un objetivo que permite reducir la incertidumbre combinada de los artefactos de medición, las horas de trabajo hombre, los tiempos de preparación de muestras y resultados de cada medición. La alternativa es una herramienta óptica aplicada a la instrumentación de detección del MP, para evaluar el proceso de combustión y además obtener resultados que se aproximen a valores reales asociados a cualquier cambio presente en el sistema de combustión.

1.2. Hipótesis

Basándose en la literatura, se toma como primera hipótesis que un sistema compuesto por un sensor óptico de gama baja y una fuente de luz led, permitan mensurar “in situ” la concentración de material particulado circulante por el ducto, utilizando las características de un Opacímetro de Flujo Total en Línea. Es decir, es factible determinar la cantidad de luz capaz de cruzar transversalmente una corriente de gases de combustión, lo que posibilita calcular el caudal másico de partículas presente en el flujo de gas. Situación que se realiza a nivel industrial con tecnología de alta gama y a un elevado costo energético como también financiero.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo de esta Tesis es diseñar un dispositivo óptico y adaptar la metodología existente, que permita determinar la concentración del flujo másico de Material Particulado (g/h) generado por la combustión de leña en estufas y cocinas, con un tamaño de partículas mínimo de 2,5 nanómetros, medición a realizar en túnel de dilución de estufas basado en el método Ch-28. Se compararán los resultados obtenidos con muestreos Isocinéticos de los métodos aprobados por La Agencia de Protección Ambiental EPA y el Gobierno de Chile Ch-28 y Ch-5G.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar y seleccionar las ecuaciones fundamentales relacionadas con la detección y comportamiento, en el ducto de gases combustión, del Material Particulado por combustibles lignocelulósicos.
- Utilizar un modelo matemático que relacione un comportamiento del haz de energía incidente con las partículas de hollín formadas, relacionando las Ecuaciones de Emisión de Material Particulado y las Ecuaciones de Lambert-Beer-Bouguer.
- Desarrollar mediciones de Material Particulado utilizando el sensor óptico diseñado, que permita obtener resultados del flujo másico en condiciones controladas.
- Evaluar las mediciones obtenidas con el sensor óptico utilizado en la medición de Material Particulado en estufas y cocinas que utilizan leña, con el equipo de muestreo Isocinético normado por la EPA. Según metodología Ch-28 y 5G.
- Analizar la resolución obtenida con el sistema diseñado, para obtener la incertidumbre metodológica en comparación con el equipo de isocinetismo.

Capítulo 2. Biocombustibles lignocelulósicos

La biomasa sólida de origen forestal o biomasa lignocelulósica es considerada como un combustible renovable, principalmente orgánico y como un producto de procesos naturales y antropogénicos. Donde el primero corresponde a la formación y crecimiento en ambientes naturales basado en el agua a través de la fotosíntesis, mientras que el segundo corresponde a la formación mediante la producción tecnológica y alteraciones de los constituyentes naturales anteriores (Vassilev, Baxter, & Andersen, 2009). El gran consumo a nivel mundial que posee, es principalmente motivado por la búsqueda de nuevas alternativas de energía reactiva con un bajo contenido de carbono (Lea-Langton & Baeza-Romero, 2015).

De la biomasa es posible obtener biocombustibles en diferentes estados, sólido, líquido y gaseoso, dando paso a la producción de bioenergía. En donde sus ventajas y desventajas se presentan en la tabla siguiente (Vassilev, Baxter, & Andersen, 2009):

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es una energía renovable proveniente de la biomasa natural.	Interrupción del ciclo de vida de la biomasa para fines energéticos.
Conversión neutral de CO ₂ .	Carencia de terminología aceptada, sistemas de clasificación y estándares en todo el mundo.
Posee comúnmente contenido bajo de cenizas, carbono, azufre, nitrógeno y oligoelementos.	Insuficiente conocimiento referente a la variabilidad de la composición y propiedades.
Normalmente altas concentraciones de materiales volátiles, como Calcio, Hidrógeno, Magnesio, Oxígeno y Fosforo.	Comúnmente presenta alto contenido de humedad, como también de elementos de Cloro, Potasio, Sodio, Manganeso y en pocos casos oligoelementos.
Mitigación de emisiones peligrosas, como CO ₂ , NO _x , SO _x y CH ₄ .	Baja densidad energética.
Alta disponibilidad y costos económicamente bajo en la producción del combustible.	Competición potencial con la producción de comida (plantaciones alimenticias).

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la utilización de la biomasa dendroenergética como combustible. (Vassilev, Baxter, & Andersen, 2009).

2.1. Características químicas

2.1.1. Composición química

A pesar de que la composición química varía en distintas especies de árboles, también lo hace de árbol en árbol, dependiendo del punto de medición como la raíz, el tallo, sus ramas, componentes del suelo, y además de su localización geográfica. Todas estas variables han obligado a muchos investigadores a utilizar resultados ponderados (Pettersen, 1984). Su composición básica a nivel de tronco se presenta en la Figura 2.

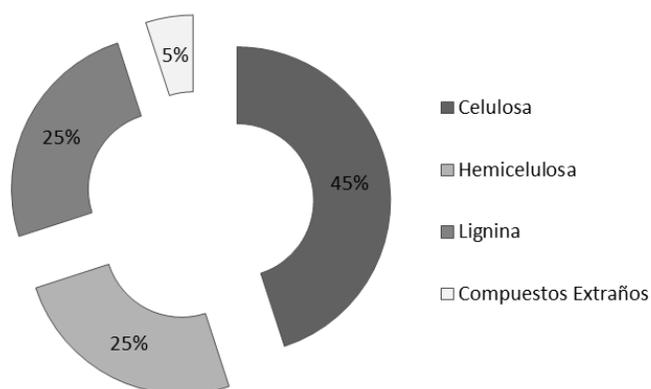


Figura 2: Composición de Biomasa correspondiente al Tronco. (Simoneit, Schauer, & Nolte, 1999)

El estudio de la composición química y caracterización dada por un combustible sólido, es un paso fundamental en su aplicación como combustible (Vassilev, Baxter, & Andersen, 2009). Por ejemplo, existen siete tipos de análisis diferentes para caracterizar combustibles sólidos, donde los dos primeros son presentados en esta investigación y el resto no genera información relevante para la determinación final del MP:

- Análisis proximal, que determina el carbono fijo (CF), el material volátil (MV), contenido de cenizas (A) y humedad.

Tabla 2: Propiedades químicas (análisis proximal) obtenidas en distintas biomásas. (Ebeling & Jenkins, 1985) (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)

Propiedades químicas en % peso (Ebeling & Jenkins, 1985)						
Tipo de Biomasa		CF	MV	A	PCS	PCI
Eucalyptus	Globulus	17,30	81,60	1,10	19,23	18,03
	Camaldulensis	17,82	81,42	0,76	19,42	18,23
	Álamo	16,35	82,32	1,33	19,38	18,19
Roble	Blanco	17,20	81,28	1,52	19,42	18,33
	Albura	15,36	83,61	1,03		19,07
Propiedades químicas en % peso (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)						
Sauce		16,07	82,22	1,71		19,59
Paja de Trigo		17,71	75,27	7,02		17,94
Cascaras de Almendra		20,07	73,80	6,13		18,89

- b. Análisis elemental, que determina el contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre.

Tabla 3: Propiedades químicas (análisis elemental) obtenidas en distintas biomásas. (Ebeling & Jenkins, 1985) (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)

Propiedades químicas en % peso (Ebeling & Jenkins, 1985)							
Tipo de Biomasa	C	H	O	N	S	Cl	
Eucalyptus	Globulus	48,18	5,92	44,18	0,39	0,01	0,20
	Camaldulensis	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,13
	Álamo	48,45	5,85	43,69	0,47	0,01	0,10
Roble	Blanco	49,48	5,38	43,13	0,35	0,01	0,04
Propiedades químicas en % peso (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998)							
Sauce	49,90	5,90	41,80	0,61	0,07	0,01	
Paja de Trigo	44,92	5,46	41,77	0,44	0,16	0,23	
Cascaras de Almendra	47,53	5,97	39,16	1,13	0,06	0,02	

Otros análisis que no son abordados en esta investigación son:

- Análisis de cenizas, que determina el contenido de Silicio, Aluminio, Hierro, Calcio, Azufre, Magnesio, Potasio, Titanio, Sodio y Potasio, además de Cloro, Manganeso y oligoelementos.
- Elementos petrográficos, que determina los componentes orgánicos e inorgánicos.
- Análisis mineralógico, que determina minerales y fases inorgánicas.
- Procedimientos de separación, que evalúa las diferentes fracciones.
- Otros análisis del combustible, considerados como las cenizas de baja temperatura o alta temperatura.

2.2. Características físicas

Las características físicas, la biomasa lignocelulósica se puede encontrar en formas de cuerpos sólidos grandes, leña o briquetas, y en cuerpos sólidos pequeños como el aserrín o las astillas.

La densidad y humedad ponderada presente en algunas de sus formas se expresa en la siguiente tabla.

Tabla 4: Propiedades de densidad y humedad en base seca de distintos formatos de madera. (Huhtinen, 2006)

Formato de Madera	Propiedad	
	ρ_m [kg/m^3]	W_m [%]
Residuos Forestales	313	6,30
Corteza Forestal	230	4,74

Capítulo 3. Material Particulado

Como se presentó en la tabla 2, una de las desventajas de la biomasa es la presencia de gran cantidad de materiales volátiles, que al momento de combustionar se liberan como gases al ambiente, en forma de Material Particulado. Lo que conlleva a abordar los siguientes temas; los efectos en la salud humana y las propiedades que posee el material particulado generado por la combustión de biomasa de origen forestal.

3.1.Efectos del Material Particulado en la salud humana

El material particulado tiene origen natural y antropogénico, considerando el último origen ya mencionado, como el particulado grueso que comprende polvo en suspensión o resuspendido de los caminos y procesos industriales, construcción, a un nivel urbano como el desgaste de neumático, frenos y pavimento, además del sector agrícola, la minería y el polvo proveniente de caminos no pavimentados, todo eso en conjunto con la acción del viento sobre la corteza terrestre, adquieren un alto impacto en el entorno de las personas (Vargas, 2011).

En la literatura actual, hay presentes estudios que hacen referencia a los efectos en la salud humana debido a la exposición de corto y largo plazo en relación a la mortalidad humana. Muchos estudios, tanto epidemiológico como experimentales en laboratorios, han demostrado que exposición al hollín es precursor de varios tipos de cáncer y problemas respiratorios (Hamins, 1993).

Los incrementos del material particulado presentan un efecto en la mortalidad, en especial en ciudades con clima seco y de gran altura. Donde el efecto, estadísticamente significativo, por material particulado fino en mortalidad total, cerebrovascular y respiratoria es del orden de 0.47 a 1.14% por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de incremento en $\text{PM}_{10-2.5}$. Referente a la fracción gruesa, hay estudios que encuentran un efecto estadísticamente no significativo en la salud humana (Vargas, 2011).

Referente a los estudios de la toxicidad del humo provocado por la combustión de la biomasa, pueden ir variando en función de las condiciones de combustión, principalmente por las propiedades fisicoquímicas de los compuestos gaseosos y sólidos de los humos (Bolling, Pagels, & Yttri, 2009). Las respuestas biológicas de la exposición de diversos gases de combustión de diversas fuentes y combustibles biomásicos son expresadas en la siguiente tabla.

Condiciones de Combustión	Clase de partituras dominantes	Modo de Exposición	Respuesta biológica
Estudios inhalación Humana			
Estufas de leña convencionales combustión completa.	Carbono y Hollín orgánico	Inhalación	<ul style="list-style-type: none"> • Inflamación en las vías aéreas distales. • Inflamación sistémica. • Coagulación sanguínea. • Peroxidación lipídica. • Estrés oxidativo.
Estufa a pellet por combustión incompleta.	Carbono y Hollín orgánico	Inhalación	
Estudios en Animales vivos			
Estufas de leña convencionales combustión completa.	Carbono y Hollín orgánico	Inhalación en ratones	<ul style="list-style-type: none"> • Inflamación crónica breve. • Inflamación alérgica de las vías aéreas. • Disminución de la función pulmonar.
Estufas de leña convencionales con combustión incompleta.	Carbono Orgánico	Inhalaciones en ratones	<ul style="list-style-type: none"> • Inmunotoxicidad sistémica. • Aumento de los niveles de plaquetas.
Estufa de leña combustión incompleta a altas temperaturas.	Hollín	Modelo de inmunización por almohadillas en ratones	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la sensibilidad alérgica.

Tabla 5: Respuestas biológicas a presencia de gases de combustión (Bolling, Pagels, & Yttri, 2009).

3.2. Definición y aspectos del Material Particulado

El Material Particulado se conforma por diferentes compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos. Dichos compuestos están presentes en forma de partículas sólidas y líquidas, que poseen diferencias morfológicas según la procedencia de emisión o la naturaleza del combustible oxidado en la que son generadas (Rodríguez, 2010).

Las partículas están segmentadas por tamaño dentro de dos grupos: partículas gruesas (MP₁₀) y partículas finas (MP_{2,5}). Las primeras con un rango métrico de los 2,5 a 10 micrómetros, y las segundas con medidas menores a 2,5 micrómetros. Las partículas están conformadas mayoritariamente de carbón, con pequeñas cantidades de hidrógeno y oxígeno (Kennedy, 1997).

La formación de elementos sólidos generados por la combustión incompleta del combustible, es uno de los factores principales en la emisión de MP. Se ha identificado, como uno de los factores preponderantes, que la mayor emisión de MP está asociado a la relación aire-combustible presente en la reacción de combustión, es decir, la proporción de aire que dispone el combustible en el proceso es menor a la necesaria para oxidarse completamente (Rodríguez, 2010).

Las partículas sólidas presentan diferencias en su composición química dependiendo del combustible utilizado y el método de combustión aplicado (Hamins, 1993). Dichas partículas se

originan por el resultado de reacciones químicas en fase gaseosa de partículas sólidas más pequeñas que conducen a la creación de partículas de mayor tamaño, conocido como aglomeración, y a la oxidación de otras (Hamins, 1993).

3.3. Formación del Material Particulado por Combustión de Biomasa

En ésta sección se abordará la formación, crecimiento y oxidación del material particulado obtenido por la combustión de biomasa lignocelulósica sólida.

El proceso de combustión, tanto de combustibles líquidos y sólidos, generalmente provocan la formación de partículas de aerosol, que contienen distintos tamaños. Estos tamaños usualmente difieren significativamente en sus propiedades químicas y físicas. Las partículas gruesas están formadas típicamente a partir de residuos de carbón o cenizas del combustible. También es posible que el desprendimiento de los depósitos de las superficies del hogar de combustión pueda producir este tipo de partículas (Sippula, 2010).

La combustión de la madera comienza cuando la biomasa es expuesta a energía calórica, que secuencialmente sigue con la hidrolización, oxidación, deshidratación y pirólisis, incrementando la temperatura formando combustible gaseoso. Estas sustancias son altamente reactivas y son derivadas del carbón (Simoneit, Schauer, & Nolte, 1999). El proceso se explica a continuación:

1. Cuando se alcanza la temperatura de ignición de éstos volátiles y las sustancias alquitradas comienza el proceso de combustión.
2. La liberación de calor generada por la flama de la combustión, provee energía necesaria para la gasificación de la biomasa y propagación de la llama, además de evaporar el agua que se encuentra en las paredes celulares de la biomasa, o agua capilar.
3. Luego, los productos volátiles, como el vapor de agua, compuestos resinosos y productos de la descomposición de la celulosa, las hemicelulosas y la lignina son separadas, para luego sufrir una combustión parcial o completa en la zona de la llama. Durante la combustión, la formación de carbón continúa hasta que el flujo de la gasificación de la biomasa cae por debajo del nivel mínimo requerido para la propagación de las llamas.
4. Comienza el proceso de combustión en caliente, que es la oxidación gradual del carbón reactivo. Durante éste proceso se produce suficiente calor para propagar el proceso de carbonización, como también la liberación de productos volátiles de la descomposición de la madera.

Se considera que la combustión de la biomasa es bajo la característica de una llama no premezclada turbulenta y laminar, debido a que no hay un mezclado anterior a la reacción de combustión entre el comburente y el combustible. En donde éste proceso emite grandes cantidades de partículas a la atmosfera y se dividen en dos categorías; la primera se refiere a las cenizas, generadas de elementos no inflamables dentro del combustible, que además no posean átomos de carbono ni hidrógeno (Flagan & Seinfeld, 1998), mientras que la segunda categoría consiste en las partículas carbonosas formadas por la pirólisis de las moléculas de combustible.

Del material particulado menor a los 10 micrómetros su formación es básicamente por tres vías (Nussbaumer, 2011):

- a. El proceso de combustión incompleto a baja temperatura, conlleva a la pirólisis y como un producto de esto se obtienen los *Compuestos Orgánicos Condensables* (COC), también llamados *tar*, que pueden formar aerosoles orgánicos primarios.
- b. Debido a una combustión incompleta en una llama a alta temperatura, principalmente por la falta de oxígeno local o por la extinción de la llama. Ambas situaciones pueden provocar como resultado el *carbono casi elemental* o *Black Carbón* (BC).
- c. La concentración presente en el combustible de materiales minerales que incluyen alcalinos y cloros, lo que contribuye principalmente a la formación de partículas de *cenizas volátiles inorgánicas* compuestas de sales (cloruros y óxidos). Además de otros metales que también pueden estar en menores concentraciones.

EL material particulado fino, generalmente, es formado por especies que se han vaporizado durante el proceso de combustión, que posteriormente saturan y forman partículas finas por nucleación (Sippula, 2010). Las partículas nucleadas crecen más aún por la coagulación, aglomeración, condensación y reacciones superficiales. Todas estas partículas se llaman partículas primarias. Además, algunos vapores liberados en el proceso de combustión pueden formar partículas de aerosol en la columna de escape de dilución (chimenea) que más tarde alcanzan la atmósfera, denominadas partículas secundarias. Las partículas secundarias pueden verse algunas veces en las mediciones como un tercer tipo de partículas, denominadas ultra fina.

Las partículas finas se dividen en tres categorías, dependiendo de su origen y mecanismo de formación (Kocbach & Pagels, 2009);

1. Cenizas (inorgánicos) Originado por el material no combustible que ingresa en el horno.
2. Hollín (Carbón elemental)
3. Material Orgánico.

A continuación, se explica el proceso de formación de cada categoría de las partículas finas.

3.3.1. Formación de Cenizas

Dentro de la primera categoría de las partículas, la formación de las cenizas está fuertemente ligada a las propiedades del contenido de cenizas del combustible, es decir, la composición química y la forma, tanto de las cenizas como de los elementos que unen a las cenizas. Estas cenizas pueden formar compuestos en estado gaseoso, como los HCl y SO₂, o partículas finas como KCl y K₂SO₄. En caso contrario, puede que las cenizas permanezcan en la parte baja del residuo del proceso de combustión o como ceniza volátil gruesa (Sippula, 2010).

Hay actores conocidos que influyen la liberación o retención de diferentes especies de cenizas durante la combustión.

1. La primera de ellas es la temperatura de la combustión, que está en clara correlación con las fracciones de liberación.
2. Segundo, en la combustión del carbón se ha encontrado que la liberación de cenizas se ve afectada significativamente por las condiciones oxido-reductoras. Estas condiciones de reducción aumentan la liberación de cenizas, ya que las formas reducidas de muchas especies de ceniza tienen presiones altas de vapor. Es probable que un mecanismo similar afecte a algunas especies de cenizas en la combustión de biomasa, por ejemplo el zinc.
3. Tercero, la composición del combustible afecta la liberación de complejos procesos químicos y físicos. Respecto a este punto, aun no se entiende suficiente como para realizar predicciones cuantitativas referentes a las cenizas, por ejemplo cuando se introduce nuevo combustible.
4. Cuarto, la partícula de combustible, su estructura y el tiempo de residencia afectan las velocidades de liberación medidas, ya que el equilibrio químico de especies evaporadoras puede tardar más tiempo en alcanzarse. Por otro lado, algunas especies volátiles pueden quedar atrapadas en la porosidad del combustible sin cambiar su composición química, es decir un proceso de fisisorción.

3.3.1.1. Liberación de metales alcalinos en la combustión de biomasa

Según (Sippula, 2010), los componentes más abundantes en el Material Particulado generado por la combustión de la biomasa son los metales alcalinos. Donde típicamente presentan sulfatos, cloruros, carbonatos, hidróxidos y algunas veces fosfatos. Esto se debe a que los metales alcalinos se liberan en mayor cantidad que otros elementos catiónicos formadores de cenizas en la biomasa, como (Ca, Mg, Al, Fe, Si, Mn). De lo anterior, el mayor interés en la formación de partículas finas de cenizas en el proceso de combustión de la biomasa, es la liberación de estos metales provenientes del combustible.

Los principales hallazgos son que en la fase de desvolatilización a bajas temperaturas solo se liberan metales alcalinos ligados orgánicamente, situación que no está influenciada significativamente por la composición del combustible. Mientras que la mayor parte de la liberación de los alcalinos ocurre a temperaturas en la fase de carbonización por encima de los 600°C y usualmente en la fase de carbonización, situación que si está influenciada significativamente por la composición del combustible.

Referente a la humedad del combustible, hay pocos estudios de cómo el contenido de la humedad del combustible afecte sobre el comportamiento de los metales alcalinos. Se sabe que un aumento en el contenido de humedad permite un aumento en la formación de vapor de KOH, como en la combustión de combustibles como la paja, e incrementa la liberación de metales alcalinos de las cenizas con diversas composiciones químicas.

Otros factores importantes que afectan la liberación de los metales alcalinos son el silicato y el aluminio presente en el combustible. En donde la formación de silicatos alcalinos, que presentan estabilidad química y son no volátiles en las condiciones de combustión, impide la liberación de

metales alcalinos. Mientras que los silicatos de aluminio capturan los metales alcalinos mediante una reacción química, formando silicatos alcalinos de aluminio.

3.3.2. Formación de Hollín

Existen dos maneras para la formación de núcleos de hollín (Sippula, 2010):

1. A bajas temperaturas los hidrocarburos aromáticos producen hollín directamente por el crecimiento en estructura similar al grafito.
2. A altas temperaturas, los hidrocarburos alifáticos y aromáticos se fragmentan, luego ocurre una polimerización de los fragmentos en moléculas más grandes formando el hollín.

El humo es generalmente relacionado con la emisión de aerosoles debido a una combustión incompleta, lo que incluye además cenizas, hollín, hollín negro o carbón que es referente a los productos sólidos carbonosos. El hollín, bajo condiciones favorables que permitan reacciones de polimerización/condensación del combustible da lugar a la nucleación y crecimiento de la partícula. Se estima que el tamaño de las partículas iniciales de hollín es de 1.5 nanómetros en la primera zona de hollín, con una masa de 2000 Da. (Fitzpatrick, Bartle, Kubacki, Jones, & Pourkashanian, 2009).

La pirolisis y combustión del carbón en la biomasa genera largas cadenas de componentes fenólicos e hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP), los cuales se consideran precursores del hollín.

3.3.3. Formación de material orgánico

Los compuestos inorgánicos provienen de la energía calórica que afecta a la biomasa, liberando una gran variedad de éstos compuestos. Pueden permanecer en la gasificación de la madera producto de la combustión incompleta. Principalmente éstos compuestos se derivan de monosacáridos, de la descomposición de la celulosa y otras cantidades de compuestos alifáticos y oxigenados, terpenoides, resinas y otros biopolímeros (Simoneit, Schauer, & Nolte, 1999).

3.4. Mecanismos de transformación de partículas

La nucleación de las partículas se obtiene como consecuencia de colisiones entre diversas moléculas de vapor, lo que forma un grupo molecular más grandes. De las muchas colisiones moleculares, algunas alcanzan un tamaño crítico que finalmente crecen más rápido de lo que pueden disociarse, formando partículas de aerosol estables (Sippula, 2010). Existen dos tipos de nucleación; la nucleación homogénea, consiste en que las partículas están formadas por una o varias sustancias que están todas inicialmente en forma de vapor, mientras que la nucleación heterogénea los materiales extraños ayudan a la formación de grupos moleculares estables.

La saturación de los vapores formadores de partículas finas se produce debido a la disminución de la temperatura en la combustión, o también, por la oxidación del vapor, es decir, cuando la

especie química entra desde la zona de combustión reducida a una zona rica en oxígeno o por otras reacciones químicas que conducen a la formación de especies de baja presión.

Los mecanismos de crecimiento de las partículas de aerosol involucran la condensación de vapores, coagulación, aglomeración, reacciones de superficie y absorción (Sippula, 2010).

- Crecimiento por condensación; depende del tamaño de partícula y su relación de saturación. Se requieren menores relaciones de saturación para la condensación que para la nucleación homogénea de las partículas.
- Crecimiento por coagulación y aglomeración; depende de las colisiones entre las partículas de aerosol, es decir, las partículas microscópicas colisionan y quedan unidas. Éstas colisiones pueden ser causadas por el movimiento browniano o coagulación térmica, como también por fuerzas externas coagulación cinemática.

El tamaño, la composición química y las condiciones del proceso influyen directamente en las propiedades de las partículas. Si colisionan partículas líquidas, éstas forman pequeñas gotas de líquido esférico. Si las partículas que colisionan son sólidas y permanecen unidas por la atracción de Van der Waals, forman estructuras dendríticas, proceso que recibe el nombre de aglomeración (Sippula, 2010).

En resumen, la formación del material particulado desde la combustión de la biomasa, se puede representar según la siguiente figura.

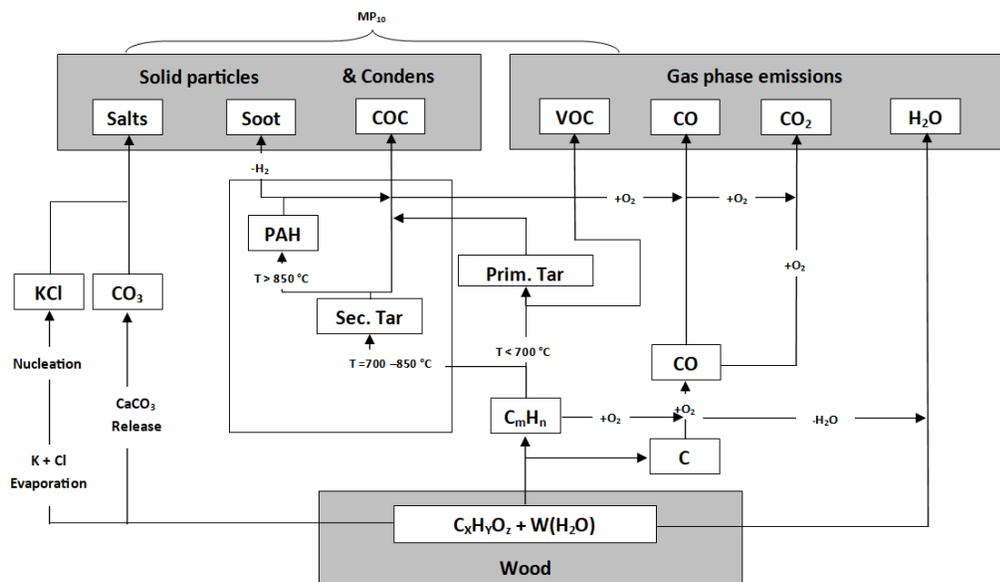


Figura 3: Esquema de la formación de componentes derivados de la combustión de madera. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)

La conversión del carbono durante la combustión de la biomasa y sus sub secuencias reactivas en la atmosfera, se pueden apreciar en la figura 4, donde los componentes en la chimenea son medidos durante el proceso de combustión.

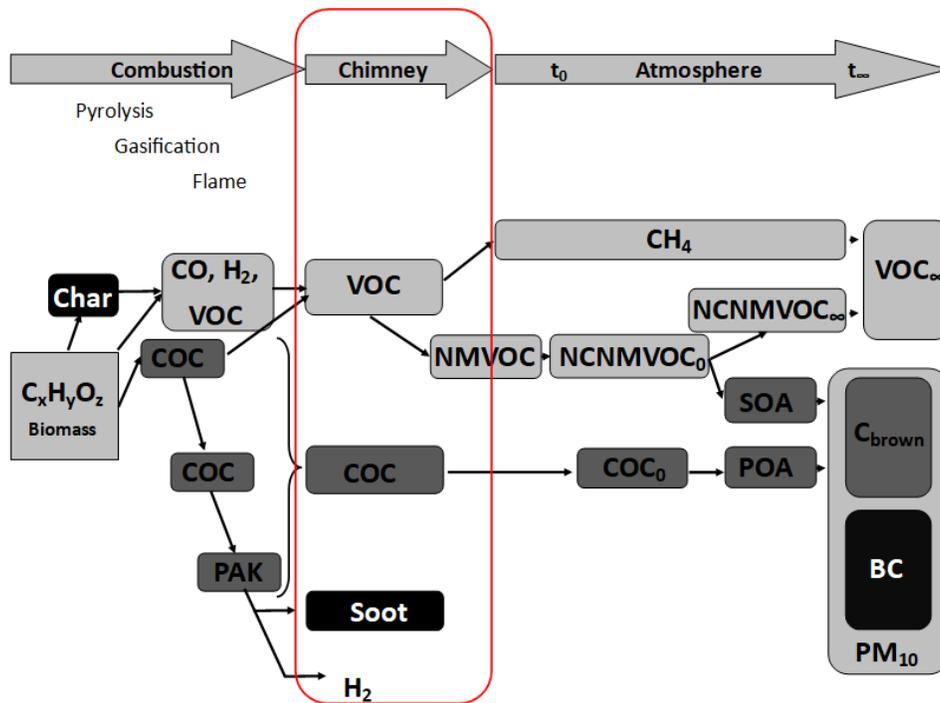


Figura 4: Proceso de transformación de los gases de combustión desde la combustión hasta la dilución en la atmósfera. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)

Según la figura anterior, esta investigación se centrará en medir las partículas en la sección transversal del túnel de dilución, que posee similitudes físicas con la chimenea. La sección roja representa dicho punto de muestreo, en donde se está en presencia de VOC, COC, Soot y H_2 .

3.5. Caracterización del Material Particulado

3.5.1. Composición

Las características de un flujo de partículas sólidas en suspensión al interior de un medio gas-sólido, varían significativamente con las propiedades geométricas y las propiedades del material que éstas poseen. En donde el tamaño, la distribución de porte y la forma son consideradas propiedades geométricas, mientras que la adsorción física, la fractura dúctil y elástica, deformación plástica y elástica, electrificación sólida, magnetización, conductividad y radiación térmica, y la transmisión óptica son consideradas propiedades químicas (Fan & Zhu, 1998) (Hamins, 1993). Cada una de las propiedades afecta directamente en las fuerzas inter partículas de corto y largo alcance, como también al comportamiento de la erosión y desgaste de las partículas en flujos gas-sólido.

La combustión de la biomasa está relacionada con tres tipos básicos de partículas primarias, catalogadas como “sales”, “hollín” y “compuestos orgánicos condensables”, los cuales poseen gran diferencia unos de otros, tanto química como físicamente (Nussbaumer, 2011). Generalmente se pueden obtener los siguientes compuestos químicos:

Tabla 6: Composición química del Material Particulado (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)

Composición Química	Moléculas	Cantidad en Porcentaje
Compuestos Orgánicos		<5
Compuestos de Potasio	K_2SO_4 KCl	>60
Compuestos de Calcio	$CaCO_3$ CaO	<20
Sales Iones Positivos	$K^+, Ca^{2+}, CaMg^{2+}$	
Sales Iones Negativos	$SO_4^{2-}, Cl^-, CO_3^{2-}, O^{2-}, OH^-, S_2O_7^{2-}$	

Generalmente la composición química de las partículas inorgánicas de la combustión de biomasa está dada por el siguiente gráfico (Johansson, Tullin, & Leckner, 2003)

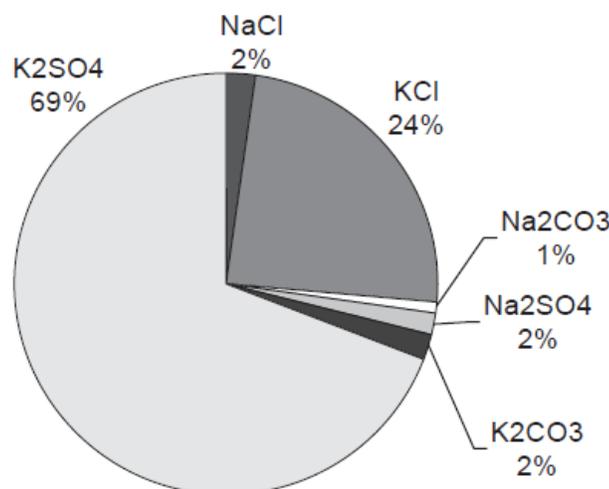


Figura 5: Composición química de Partículas Orgánicas de la combustión de biomasa. (Johansson, Tullin, & Leckner, 2003)

Dentro de las propiedades y características químicas, la tabla 7 presenta diferentes clases con respecto a las propiedades físicas, tales como tamaño, micro estructura interna, solubilidad y contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos (Kocbach & Pagels, 2009)

Tabla 7: Clases y propiedades del Material Particulado. (Oser, Nussbaumer, & Müller, 2003)

	Partículas esféricas orgánicas de Carbón	Hollín (agregados elementales del carbono)	Partículas de cenizas del combustible
Dibujo esquemático			
Diámetro medido por microscopía electrónica	50-600 nm	20-50 nm	50-125 nm
Diámetro de movilidad	100-300	50-300	50-125
Solubilidad en	Depende del medio.	Insoluble.	Soluble.
Característica química principal	Carbono orgánico (Compuestos orgánicos más abundantes: Metoxifenoles y Anhídrido Monosacáridos).	Carbono elemental con cantidades variables de compuestos orgánicos condensados.	Sales alcalinas (mayormente KCL y K2SO4 con pequeñas cantidades de elementos de traza, Zn).

3.5.2. Propiedades ópticas del Material Particulado

Para evaluar la fotometría óptica de partículas, se requiere conocer algunas propiedades ópticas de los diversos componentes presentes en los gases de combustión, tales como los coeficientes de extinción de hollín, polvo mineral o metales alcalinos, y aerosoles carbonosos, lo que permite determinar la concentración de cada uno. Situación que se complejiza debido a la cantidad de variables que no pueden controlarse, incluso en laboratorios, como lo son los compuestos y la distribución química del combustible utilizado, además de las propiedades del aire que se utiliza en la combustión y la forma de combustionar en el equipo térmico, lo que conlleva a un complejo escenario de detección puntual. Todas esas variables motivan a que en esta investigación solo se consideren las propiedades ópticas pertenecientes al “Hollín”.

3.5.2.1. Coeficiente de absorción o extinción de hollín

El coeficiente de extinción del “humo” dependiendo de distintos tipos de combustibles se presenta en la siguiente tabla (Colbeck, Atkinson, & Johar, 1997) (Mulholland & Croarkin, 2000).

Tabla 8: Propiedades ópticas de partículas de “hollín” de diversos combustibles. (Colbeck, Atkinson, & Johar, 1997) (Mulholland & Croarkin, 2000)

Combustible	Coeficiente de extinción específico [m²/g]	Albedo de Dispersión Simple
Diésel	10.3	0.3
Fuel Oil	11.6	0.31
Madera Roble	7.8	0.62

Capítulo 4. Principios de Radiometría

El material particulado circulante en ductos o chimeneas de escape, posee características físicas y químicas, que según lo mencionado en capítulos anteriores, varían en lapsos de segundos, como lo son la concentración, formación y composición de nuevas partículas de mayor o menor tamaño, que a su vez modifican otras propiedades como la temperatura, coeficientes de absorción, emisión y dispersión de la radiación electromagnética.

De lo anterior se evidencia la necesidad de evaluar la reacción que se produce al interactuar un haz de energía con diversas partículas en una muestra finita, y para esto se requiere el estudio de la radiometría de partículas.

La espectroscopia es un procedimiento experimental que estudia la adsorción, emisión y dispersión de la radiación electromagnética por átomos o moléculas (Hollas, 2004). Cuyo comienzo es por estudiar la radiación.

4.1. Radiación y Espectro Electromagnético

Según (Smith, King, & Wilkins, 2008), la radiación electromagnética incluye, en adición a lo que comúnmente nos referimos a “luz”, radiación de ondas largas o cortas. Como el nombre lo indica, contiene un componente eléctrico y un componente magnético, en donde los átomos o moléculas pueden estar en fase gaseosa, líquida o sólida.

El espectro electromagnético cubre un amplio rango de longitud de ondas, desde las ondas de radio (10^{-6} eV) hasta los rayos gamma (1 GeV), tal como se ilustra en la figura 6. Las diferencias de comportamientos en todo el espectro es muy variado, ya que las propiedades como la frecuencia (ν) y el ancho de onda (λ) están directamente relacionado con la velocidad de la luz (c), dado por $\lambda\nu = c$. En el esquema del espectro electromagnético la frecuencia varía desde 10^4 Hz para ondas largas de radio hasta más de 10^{21} Hz comúnmente para rayos gamma.

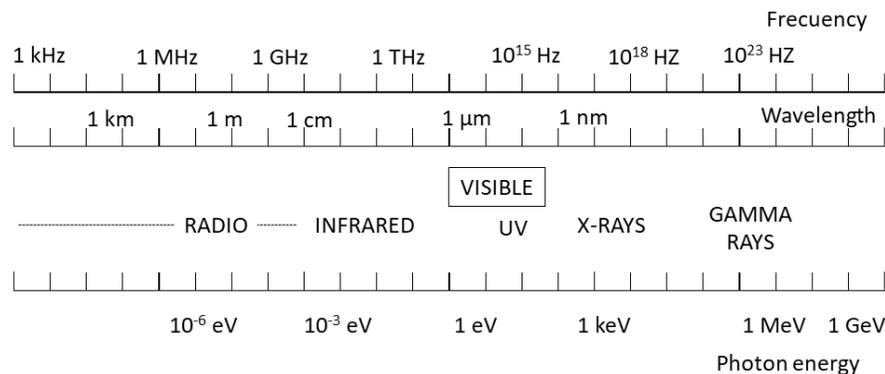


Figura 6: Espectro Electromagnético. (Smith, King, & Wilkins, 2008)

4.1.1. Espectro Electromagnético Visible y Ultravioleta cercano

Cuando la radiación interactúa con la materia, un gran número de procesos pueden ocurrir, incluyendo reflexión, dispersión, absorción, fluorescencia/fosforescencia (absorción y reemisión), y reacciones foto químicas como ruptura de enlaces (Owen, 2000). Generalmente si se desea medir algún fenómeno dentro del espectro UV-visible sólo se debe buscar absorbencia.

Se considera que el ancho de onda de la luz visible abarca un octavo del espectro electromagnético, aproximadamente entre los 400 a 800 *nm* (Smith, King, & Wilkins, 2008).

Convencionalmente, las fuentes para estas regiones son en base al tungsteno, o lámparas de incandescencia de ioduro de tungsteno para el espectro visible, y para el espectro ultravioleta cercano se utilizan lámparas de deuterio con envoltura de cuarzo (Hollas, 2004). Para una fuente de mayor intensidad se puede utilizar una lámpara de arco de xenón de alta presión.

La radiación electromagnética puede ser considerada como la combinación campos eléctricos y magnéticos, que viajan a través del espacio en forma de ondas. Debido a la acción de la radiación sobre la onda electromagnética, se pueden clasificar en términos como ancho de onda o frecuencia, cuya ecuación se representa a continuación (Owen, 2000):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Dónde ν es la frecuencia, c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío, y λ es el ancho de onda expresado en metros.

En la región del espectro visible, se define el ancho de onda en nanómetros (nm), correspondiente a 10^{-9} metros, lo que conlleva a otras sub unidades para cuantificar esta variable, como los mili micrones $m\mu$ o Angstrom Å . Su equivalencia se expresa a continuación (Kumar, 2006):

$$1 \text{ nm} = 1m\mu = 10 \text{ Å} \quad (2)$$

4.2. Transmitancia y absorbencia

Cuando la radiación electromagnética es absorbida, incrementa el nivel energético de las moléculas. En otras palabras, la energía que produce la radiación infrarroja es sólo suficiente para causar cambios a niveles de vibración y rotación en las moléculas, es decir, las partículas suspendidas en un gas absorberán, reflejarán y dispersarán la energía radiada (R.A. Herrick, 2003). Estos efectos atenúan la energía radiada que es recibida por el detector. Si la partícula es mucho más pequeña que la longitud de onda emitida, la mayor atenuación es causada por absorción. Para el caso en que la partícula sea igual o más grande que la longitud de onda utilizada, domina la dispersión de la energía.

La transmisión de la luz a través de un flujo transversal de gas que contiene material particulado se reducirá debido a la combinación del proceso de dispersión y absorción. Dicha dispersión y absorción de la luz da origen a la **opacidad**.

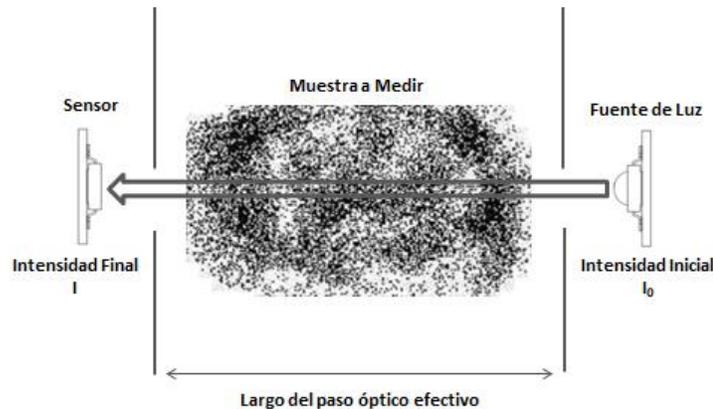


Figura 7: Principio básico de opacidad aplicada. (Elaboración propia)

Si la luz no es capaz de pasar a través de la columna de humo, se dice que el flujo de gas es opaco, figura 7, con una opacidad del 100%. La opacidad y transmitancia se pueden definir de la siguiente forma (Jahnke, 2000):

$$\text{Transmitancia (\%)} = 100 - \text{opacidad(\%)} \quad (3)$$

De la expresión anterior se infiere que si la columna de gas está completamente opaca la transmitancia será 0%, mientras que al momento de no presentar opacidad la transmitancia aumentará.

4.2.1. Ley de Bouguer

La dispersión y absorción provocadas por partículas suspendidas puede ser estudiada de manera similar a la absorción de luz por moléculas de gas. Mediante una expresión homóloga a la Ley de Lambert-Beer. La Ley de Bouguer establece lo siguiente (Jahnke, 2000):

$$TB = e^{-maql} \quad (4)$$

Dónde:

TB ; Transmitancia.

m ; Número de concentración de partículas.

a ; Área proyectada de las partículas.

l ; Longitud de la trayectoria de la luz a través de los gases de combustión.

Q ; Coeficiente de extinción de las partículas.

Se debe considerar que el coeficiente de extinción de partículas Q depende de la longitud de onda incidente y expresa cómo la partícula de un tamaño dado dispersa o absorbe la luz. Por lo tanto, dicha expresión está simplificada y asumida para una gama amplia de valores de gases de combustión.

La densidad óptica es usada frecuentemente para el monitoreo de gases de combustión, y se define (R.A. Herrick, 2003):

$$\text{Densidad optica} = D = \log_{10} \left(\frac{1}{1-\text{opacidad}} \right) \quad (5)$$

Según (Jahnke et al) también se define como:

$$D = \log_{10} \frac{1}{TB} \quad (6)$$

Donde la densidad óptica permite relacionar directamente la concentración de material particulado en gases de combustión, tal como sigue:

$$\ln TB = -maQl \quad (7)$$

Para lo cual la densidad óptica queda:

$$D = \frac{maQl}{2.3025} \quad (8)$$

Reemplazando en la ecuación anterior el término m , correspondiente a la densidad de número de partículas por la concentración de partículas c , y el área proyectada junto con el coeficiente de extinción de partículas se reemplaza por el coeficiente específico de extinción de masa A_E , dando la siguiente expresión para opacidad (Kenneth, 1998):

$$D = \frac{A_E cl}{2.3025} \quad (9)$$

Y

$$A_E = \frac{r^2 Q \pi}{m_n} \quad (10)$$

Dónde:

m_n ; Masa de partículas.

r ; Radio aparente de partículas.

4.3. Opacímetro y correlación Óptica-Concentración

Actualmente existe una gran variedad de instrumentación óptica que permite correlacionar la transmitancia de un haz de energía incidente con la concentración de partículas circulante por un flujo de gases de combustión, equipo que recibe el nombre de Medidor de Opacidad u *Opacímetro*.

El objetivo de los medidores de opacidad es la observación visible de las partículas tal como se puede ser apreciada por el ojo humano. El espectro de sensibilidad del ojo humano se conoce como luz fotópica, demostrando una sensibilidad máxima a una longitud de onda cercana a los $0,55 \mu\text{m}$. (R.A. Herrick, 2003). En la Figura 8 se entregan las respuestas espectrales de una luz fotópica y una luz incandescente. La luz incandescente no se recomienda para mediciones de opacidad, debido a la absorción de la luz en la región del infrarrojo cercano, que es provocada por el agua presente en el ambiente y en los humos, lo que es considerado un error. La mayoría de los tamaños de partículas en las emisiones industriales caen entre $0,1$ y $50 \mu\text{m}$ y la longitud de onda de la luz utilizada para la medición de la opacidad está en el rango de $0,38$ a $0,78 \mu\text{m}$. Debido a que la atenuación de la luz disminuye con el tamaño de partícula cuando se miden partículas submicrométricas, es deseable utilizar longitudes de onda cortas ($0,38$ a $0,78 \mu\text{m}$). De lo anterior se fundamenta el utilizar una fuente emisora de luz led en esta investigación.

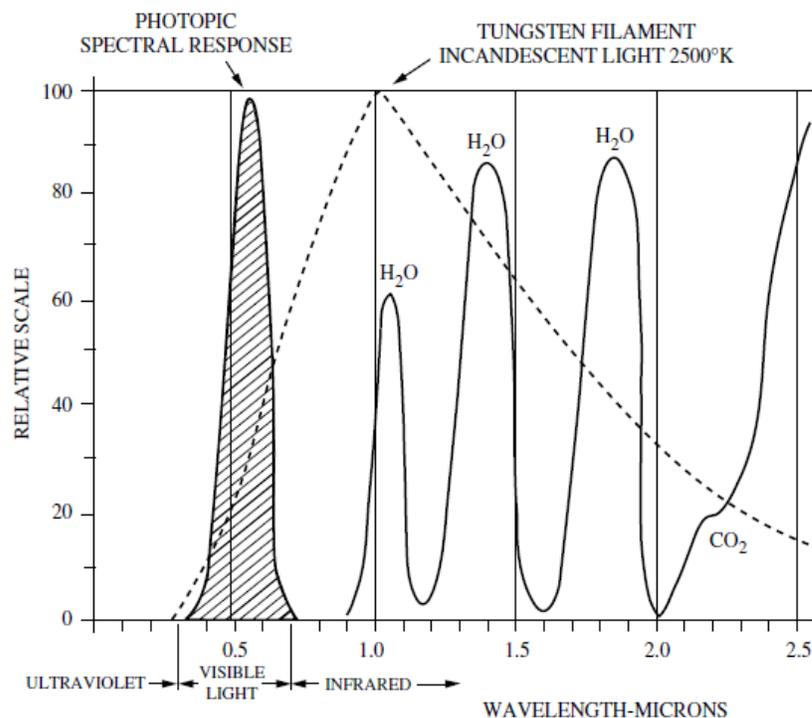


Figura 8: Respuesta espectral de la luz Fotópica e Incandescente. (R.A. Herrick, 2003)

La ley de Lambert-Beer-Bouguer permite determinar la cantidad de polvo circulando en ducto de gases de combustión, ya que la cantidad de polvo puede ser determinado por la correlación con

la transmitancia, tal como se presenta a continuación:

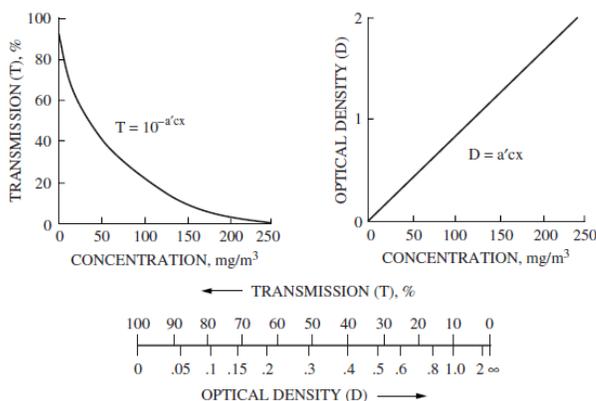


Figura 10: Correlación entre Transmitancia Óptica y Concentración. (R.A. Herrick, 2003).

<i>Optical Density</i>	<i>% Opacity</i>
0 to 0.09 and 0.18	0 to 18.7 and 33.9
0 to 0.18 and 0.45	0 to 33.9 and 64.5
0 to 0.45 and 0.90	0 to 64.5 and 87.4
0 to 0.90 and 1.80	0 to 87.4 and 98.4

Figura 9: Rangos estándares de Mediciones de Densidad Óptica en humos y Opacidad. (R.A. Herrick, 2003)

Además existen valores conocidos que permiten aproximar la densidad óptica de una muestra de polvo, tal como se presenta en la figura 10. Dichos valores permiten obtener la correlación entre la Densidad Óptica y el porcentaje de Opacidad, considerando que los resultados presentados en las figuras 9 y 10 son para calderas industriales que utilicen combustibles líquidos.

4.3.1. Tipos de Opacímetros

La medición de gases y partículas en las industrias representa diversos problemas y complicaciones, desde los puntos de vista de la seguridad laboral, medio ambientales y sobre todo económicos. Es un hecho que las empresas deban invertir gran cantidad de dinero en sistemas de monitoreo continuo, medición de partículas y gases de combustión. Para lo cual se utilizan Opacímetros, en el caso de partículas, y Analizadores de Gases para el caso de concentración de gases de combustión.

Existen tres tipos de clasificaciones de Opacímetros (Valencia, 2008):

1. *Opacímetro de Flujo Total en Línea:* Éstos equipos se instalan alrededor del ducto de salida de humos, chimenea, y son capaces de analizar una porción de los humos que circulan por el ducto. Posee lentes que permiten focalizar el haz de energía que atraviesan los gases, además de un sistema que permite proteger la fuente emisora y la receptora de los gases de escapes, mediante un sistema de ventilas o ingreso de aire al ducto. De esta forma se evita el contacto de partículas que puedan ensuciar el sistema de monitoreo. La situación se explica en la figura 11.

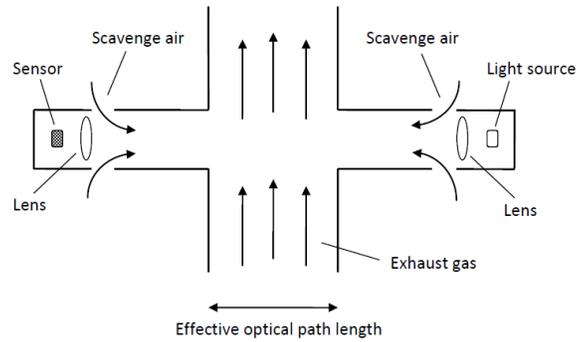
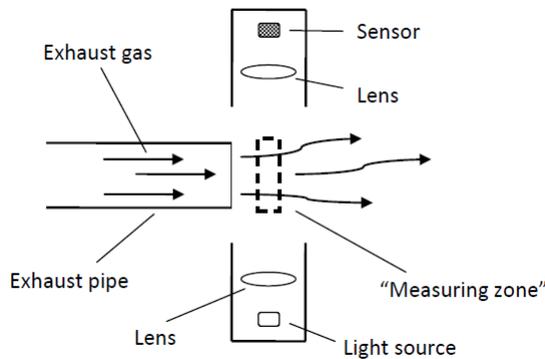


Figura 11: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Total en Línea (Bodin, 2010)

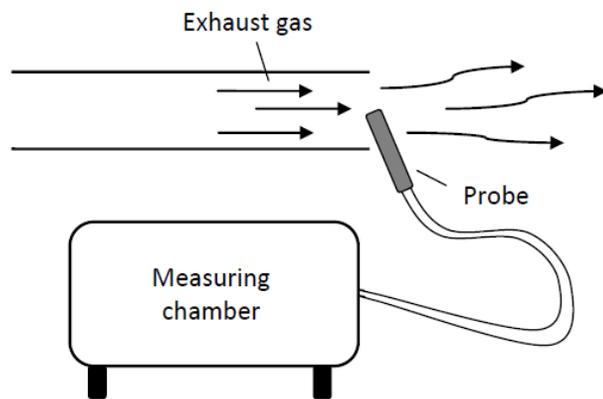
2. *Opacómetro de Flujo Total tipo Estela o Fin de Línea:* Los equipos de esta categoría se instalan a la salida de la chimenea, para medir los gases que se obtienen en este punto (figura 12). Este tipo de equipos son altamente útiles y eficientes en determinar la



opacidad de los humos, pero no el coeficiente de absorción de luz (Bodin, 2010). Esto se debe a que es imposible saber el largo del paso óptico efectivo del haz que contiene a la muestra, es decir, no se puede saber qué porción de espacio o volumen está utilizando el humo que está saliendo por la chimenea.

Figura 12: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Total tipo Estela. (Bodin, 2010)

3. *Opacómetro de Flujo Parcial o Muestreo:* Los opacómetro de flujo parcial son los opacímetros más modernos y los únicos portables que existen, presentado en la figura 13. Analizan una fracción de los humos que pasan por la salida de la chimenea, mediante una



sonda que se instala en el ducto de salida, permitiendo la medición exacta de la opacidad y el coeficiente de absorción de luz de los gases. Los únicos inconvenientes es que es muy costoso económicamente y posee un tiempo de monitoreo reducido debido a la gran cantidad de cálculos que realiza y a la transferencia de datos que lleva a cabo.

Figura 13: Esquema de funcionamiento y composición de Opacómetro de Flujo Parcial. (Bodin, 2010)

Capítulo 5. Materiales y Métodos

La metodología general utilizada para probar la hipótesis es diseñar una adaptación del método Ch-28 y 5G, mediante la implementación de un sistema simple de detección óptica y procesamiento de datos que se instalará en el ducto de dilución de gases de combustión. A continuación se especifica cada segmento que contempla la instalación requerida para abordar esta investigación.

5.1. Experimentación

La instalación de experimentación está desarrollada para facilitar la calibración y verificación del dispositivo. La figura siguiente muestra la disposición esquemática del banco de ensayos.

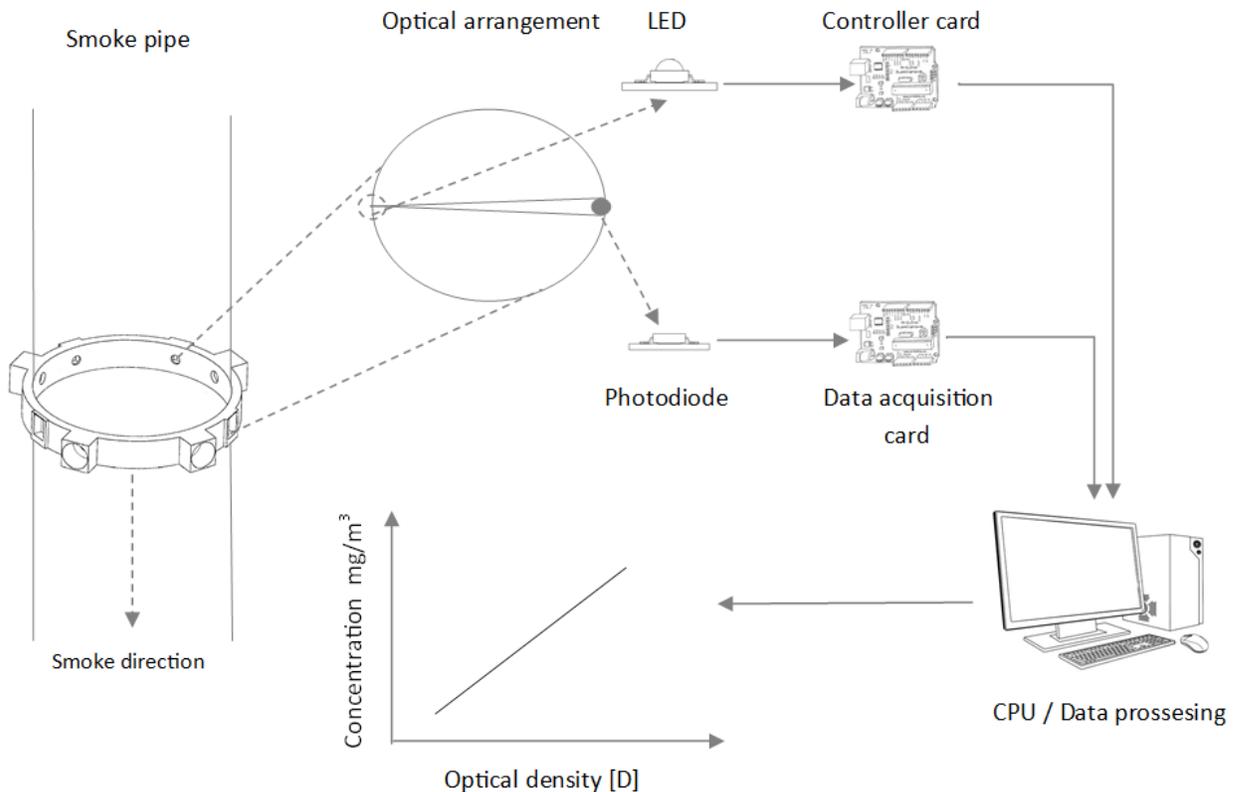


Figura 14: Esquema del banco de pruebas. (Elaboración propia)

El banco de ensayos se constituye, de derecha a izquierda, principalmente por los siguientes componentes:

1. Línea de partículas o ducto de dilución.
2. Estructura soportante de sensores y micro controladores.
3. Sensores ópticos “emisores y receptores”.
4. Sistema de procesamiento de datos y diagnóstico óptico.

5.1.1. Línea de Material Particulado

Consiste en un sistema que transporte, mediante un flujo controlado de aire, cierta cantidad de partículas, considerando las condiciones y propiedades del material que circula por el ducto.

5.1.1.1. Material Particulado no controlado

Corresponde al ensayo realizado según la Metodología de Ensayo Ch-28 y 5G (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud, 2013) para determinar la emisión de Material Particulado por Estufas en ductos de dilución durante la combustión del artefacto. Se utiliza el equipo Isocinético de marca Enviromental Supply para la extracción de partículas contenidas en los gases de combustión. Posterior a esto se realiza un proceso de gravimetría de los filtros contenidos en el tren de muestreo del Isocinético, según 5G (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud-CHILE, 2012). Dichos resultados se contrastan con los obtenidos de la fotometría de gases.

El ducto de desplazamiento del material de prueba, utiliza los siguientes sistemas:

- Túnel de dilución y todos sus componentes (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud- CHILE, 2012).
- Sistema de recolección de material particulado, ubicado en el Punto de extracción de gases. (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud- CHILE, 2012)
- Material de prueba generado en la estufa por la combustión de biomasa según el Método Ch-28.

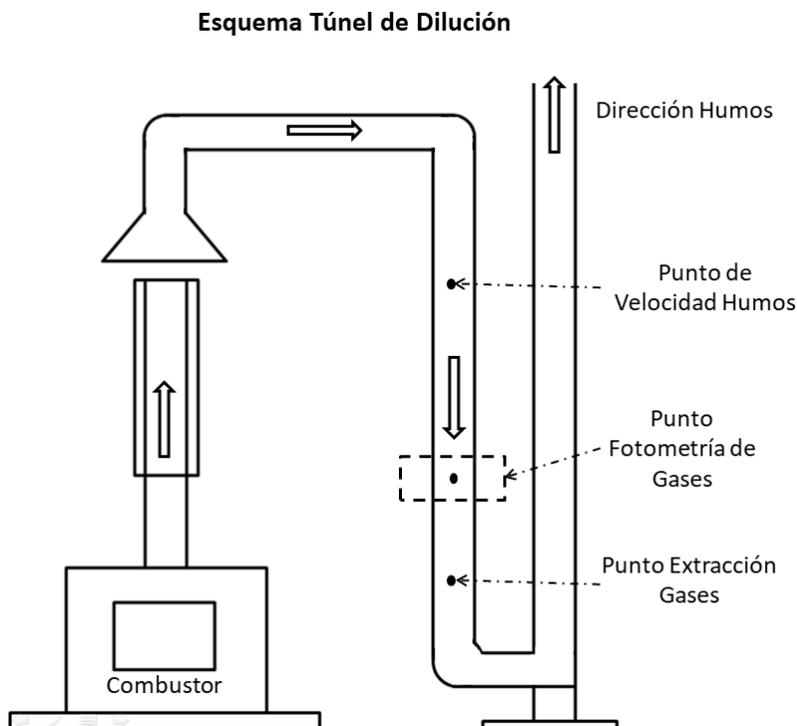


Figura 15: Esquema túnel de dilución adaptado para Fotometría. (Laboratorio de Combustión y Partículas)

Descripción de cada punto de muestreo:

- a. Punto de velocidad de humos: Corresponde al lugar en donde se determina la velocidad de los humos en función de la presión estática y dinámica. La forma de obtener la velocidad se resume en Método CH-5 (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud - CHILE, 2012).
- b. Punto Fotometría de Gases: Corresponde al lugar en donde se ubica el sistema óptico, encargado de determinar, no invasivamente, la densidad óptica en ese punto durante todo el tiempo de ensayo. A modo de correlacionar la emisión de Material Particulado obtenido por el método Ch-28 y 5G con la determinada por la fotometría de humos, utilizando las ecuaciones presentadas en la sección 5.3.4.1.
- c. Punto de Extracción de Partículas y Gases: Corresponde al lugar donde está introducida la sonda que conecta el tren de muestreo con el ducto de dilución. En éste punto las partículas son desplazadas desde el ducto hacia el porta filtros, en donde las partículas quedarán atrapadas para el posterior análisis. Dicho procedimiento se explica detalladamente en la Metodología Ch-28.

5.1.2. Estructura soportante de sensores y micro controladores

Se diseñó y fabricó una estructura capaz de soportar y sostener todos los sensores y micro controladores necesarios para esta investigación. El soporte se presenta en la siguiente figura:

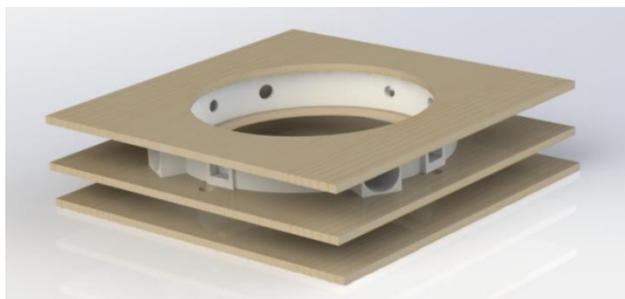


Figura 16: Estructura referencial utilizada para soporte del sistema electrónico en la investigación. (Fuente: Elaboración Propia)

La estructura está compuesta por tres superficies, la primera de abajo hacia arriba corresponde al soporte de los micros controladores y sistema electrónico de adquisición de datos. La segunda superficie, posee el soporte de los emisores y receptores, espaciados a 45° en torno a la circunferencia.

5.1.3. Sistema óptico

Este sistema se compone de los emisores y receptores necesarios para que el sistema funcione. La composición y ubicación del sistema emisor-receptor permiten obtener la aproximación del flujo total de material circulando por el área de observación.

La selección de la fuente emisora en la implementación del sistema óptico, depende netamente de la frecuencia de onda en la que se trabajará. En esta investigación se utilizó un emisor de luz, cuyas especificaciones se pueden apreciar en el Anexo B. El emisor de luz está acoplado a un lente que reduce el ángulo del haz luminoso, de 140° a 30° .

El emisor utilizado se muestra a continuación.



Figura 17: Ampolleta emisora led utilizada en la investigación. (Elaboración propia)

La selección del receptor en la implementación del sistema, depende de la frecuencia que genere el emisor. Para los emisores de luz, se requiere un receptor que opere dentro de los rangos de la luz visible. Complementando la información anterior, se utilizó un sensor, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo B. El ángulo de recepción del sensor es cercano a los 180° . El receptor se muestra en la figura 18.

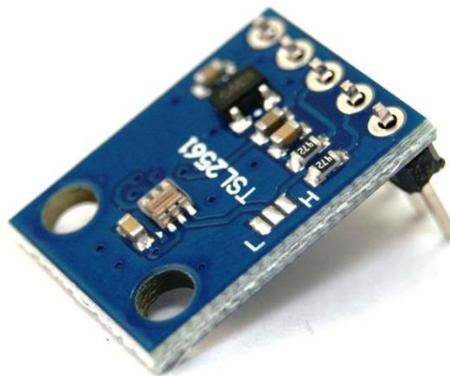


Figura 18: Receptor de luz Fotodiodo TSL2561 utilizado en la investigación. (Elaboración propia)

5.1.4. Sistema de procesamiento de datos y diagnóstico óptico

El control de las variables de los emisores ópticos se realizó mediante el uso de las tarjetas Arduino UNO con el respectivo software de *Arduino*. Referente a la adquisición de los datos ópticos, éstos se realizaron también con tarjetas Arduino UNO, y la información obtenida fue derivada a la unidad de procesamiento de datos.

Para el procesamiento de los resultados ópticos se hace utilización de una Unidad de Procesamiento Computacional (CPU) mediante el dispositivo Raspberry Pi 3 con el *Software Python 3.6*.

5.2.Arquitectura de la solución

5.2.1. Estructura de Hardware

En síntesis, el sistema debe monitorizar el material que atraviesa por el campo radiativo, para eso el conjunto compuesto por Raspberry Pi y Arduino hacen que la comunicación entre los equipos sea de bastante simplicidad, permitiendo al sistema la capacidad de ser flexible, tanto para agregar o quitar sensores, otorgando un diseño modular, lo que permite ser utilizado en otras experiencias.

La arquitectura del hardware se presenta en la siguiente figura.

Sensor de Temperatura DS18B20	S. Digital	SBM Arduino Uno R3 (Adquisición de datos y control de los intervalos de medición)	Cable USB	SBC Raspberry Pi 3 (Servidor y Procesador de datos)	PC (Procesador auxiliar de datos)
Sensor de Luz TSL2561	S. Digital	SBM Arduino Uno R3 (Adquisición de datos y control de los intervalos de medición)	Cable USB		
Emisor de Luz (Luz LED)	S. Digital	SBM Arduino Uno R3 (Control de los intervalos de emisión)	Cable USB		

Figura 19: Estructura de Hardware implementada en la investigación. (Elaboración propia)

Análisis de los equipos:

Tabla 9: Instrumentos y sensores utilizados en la investigación. (Elaboración propia)

Artefacto	Función	Rango de operación	Comunicación	Cantidad
Emisor Luz (Led)	Emisor campo radiativo.	370 a 790 nm	Señal digital	1
Fotodiodo	Receptor radiativo.	300 a 1100 nm	Señal digital I2C Four-Wire	1
Reloj RTC	Herramienta para los Arduino de medición de intervalos.	No aplica	Señal digital I2C Four-Wire	1
Arduino UNO R3	Controlar intervalos de emisión y detección.	5V	USB Señal diferencial	1
Shield Tarjeta SD Arduino UNO	Registra y guarda la información recibida de Arduino	No aplica	Señal digital	1
Raspberry Pi 3	Receptor de la información de los fotodiodos.	No aplica	USB Señal diferencial	1

5.2.2. Estructura de Software

5.2.2.1. Software y lenguaje de programación

Como ya se mencionó anteriormente, el software junto al hardware que aloja el sistema, está realizado en *Python 3.6* para el procesamiento en la Raspberry Pi y en *Código C* para los Arduinos.

No es el caso ni el objetivo de esta investigación entrar en detalles de la funcionalidad de Python, pero es necesario mencionar que su objetivo principal, y por el cuál he decidido utilizarlo en esta investigación, es la de ser un software libre u Open Source, como además de ser útil para el rápido prototipado y la amplia cantidad de bibliotecas que se disponen en la red.

El sistema no posee una interfaz de usuario intuitiva, por lo que la comunicación entre usuario y software será mediante la línea de comandos que disponga Python. El software y las tareas respectivas se comentan a continuación en la siguiente figura:

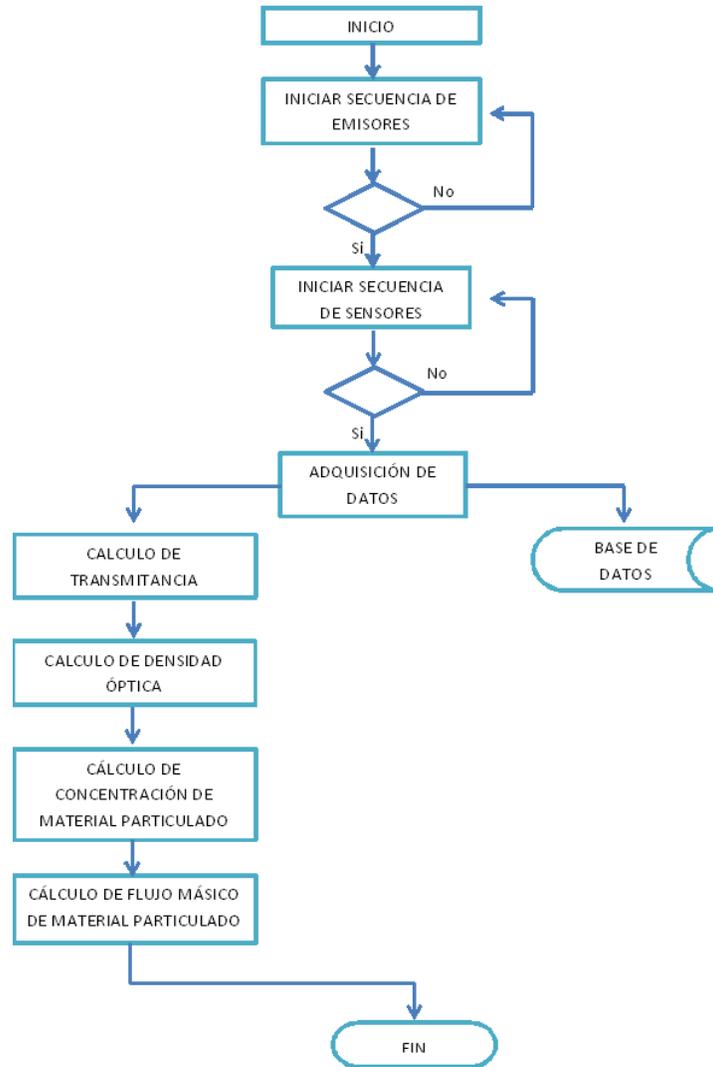


Figura 20: Diagrama de operación del software desarrollado para la investigación. (Elaboración propia)

5.2.2.2. Módulos y librerías para Arduino

Los módulos, utilizados por Arduino y Raspberry Pi, se utilizan principalmente para entregar las instrucciones y comunicación enfocada a cada tarea que se deba realizar. Estos módulos o librerías permiten la rápida construcción de sistemas y su comunicación respectiva, los cuales se presentan a continuación:

- OneWire
- DallasTemperature
- SPI
- SD
- RTCLib
- Adafruit_TSL2561

5.3. Metodología de Ensayos

5.3.1. Ensayos de Material Particulado según Metodología Ch-28 y 5G

El objetivo principal es la medición de la concentración “in-situ” del material particulado en ductos de dilución, que se realizan bajo los protocolos Ch-28 y 5G. Estas condiciones de operación de los ensayos, se refieren a los parámetros ambientales que están presentes durante cada actividad de monitoreo (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud- CHILE, 2012).

5.3.2. Ensayos de Material Particulado según Fotometría Óptica de Partículas

La metodología desarrollada para la medición no invasiva de material particulado, se define en tres actividades propias del proceso de medición.

1. Muestreo: El procedimiento de muestreo se lleva a cabo en el mismo ducto de dilución, mediante la perforación y correcto sellado de éste para poder ingresar los componentes que desarrollan la medición, los cuales son el emisor y el receptor de luz.
2. Preparación de la muestra: La muestra a medir corresponde a los gases o humos que circulan por el interior del ducto de dilución. Se deben considerar los rangos de operación enfocadas a la muestra tabla 11, como la temperatura y velocidad de humos, y además enfocadas a la funcionalidad del sistema electrónico, tabla 10, que realice la medición.
3. Procedimiento de medida:
 - a. El proceso de medición comienza haciendo funcionar el emisor y el receptor de luz, a modo de determinar la intensidad inicial ponderada de la medición, como también el ventilador extractor presente en el ducto de dilución. Todo lo anterior en ausencia de fuego. Se realiza esta operación por un tiempo de 20 minutos. Posterior a este tiempo el sistema se apaga.
 - b. Se continúa con el procedimiento explicado y planteado en el Método Ch-28, lo que básicamente es encender la estufa y verificar los instrumentos que son parte del protocolo ya mencionado.
 - c. El ensayo se divide en dos secciones, segmentadas por la combustión de dos cargas, homogéneas entre sí, de combustible de ensayo. En ambas secciones del ensayo se deben mantener constantes los rangos de operación del ensayo. Al momento de comenzar a combustionar la segunda carga de combustible es donde se comienza a medir, tanto el sistema de isocinetismo como el sistema sensor-emisor de luz presente en el ducto de dilución.
 - d. El ensayo finaliza al momento de consumir la totalidad de la segunda carga de combustible. Terminando el ensayo según el Protocolo Ch-28 y deteniendo la medición del sistema sensor-emisor de luz.
 - e. Se analiza y procesa la información inicial y final obtenida por el sistema emisor-receptor. Determinando la concentración de material particulado emitido por el calefactor utilizado.

4. Resultado de Medición: Con los resultados obtenidos por la gravimetría de filtros y cálculo de material particulado según Ch-28, es comparan con lo determinado por la fotometría óptica de partículas.

5.3.3. Condiciones de operación generales de los ensayos

Las condiciones ambientales presente en los ensayos de Material Particulado se resumen en la siguiente tabla (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud, 2013):

Tabla 10: Condiciones de operación ensayos de Material Particulado. (Instituto de Salud Pública CH-28, 2013)

Parámetro	Rango	Unidad
Temperatura ambiental	18-34	°C
Temperatura humos	30-150	°C
Presión atmosférica	735-770	mmHg
Velocidad del aire	0	m/s
Velocidad humos	3.4 – 3.7	m/s
Humedad combustible	12-18	%
Consumo de combustible	0.9 – 5	Kg/h
Intervalo de Muestreo máximo	1	min

Las condiciones ambientales presentes en los ensayos de Fotometría se ajustan según a las tolerancias físicas y técnicas que posea cada componente que participe en la detección y procesamiento de la fotometría óptica de partículas, situación expresada en secciones anteriores.

5.3.4. Ensayos de Material Particulado mediante Fotometría Óptica

5.3.4.1. Modelo de correlación a resolver

El sistema de ecuaciones a resolver para relacionar el flujo másico de partículas que circula por el ducto de dilución se presenta a continuación.

1. Obtener la transmitancia puntual:

$$TB = 1 - Op \quad (11)$$

2. Determinar la Densidad óptica puntual:

$$D = \log_{10} \left(\frac{1}{1 - Op} \right) \quad (12)$$

3. Luego, de (9) se despeja c , dando la siguiente ecuación:

$$\frac{D*2.3025}{A_E*l} = c \quad (13)$$

4. Se determina, con la velocidad de los humos y el área transversal del ducto, el caudal de gases, tal como sigue:

$$Q_h = v_{humos} * A_{ducto} \quad (14)$$

5. Finalmente se calcula el promedio de la concentración c y se multiplica por el caudal Q_h , obteniendo la emisión de Material Particulado en gramos por hora.

$$c * Q_h = \text{Emisión MP} \quad (15)$$

5.3.4.2. Modelo de Factor de Ajuste para concentración por fotometría óptica

El método desarrollado para determinar la cantidad emitida de material particulado no representa la realidad del fenómeno fotométrico, esto se debe a que el resultado obtenido de Material Particulado es el promedio lineal de los valores obtenidos en cada ensayo. De esta forma, el promedio no representa el valor real medido, para lo cual se utiliza el promedio ponderado de los valores de concentración de material particulado en cada ensayo. La ecuación se presenta a continuación (X. Xie & Liao, 2001)

$$E_{\bar{w}} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i w_i}{\sum_{k i=1=1}^k w_i} \quad (16)$$

5.3.4.3. Factor de Ajuste de Métodos

La metodología 5G utiliza un factor de ajuste al método Ch-28, es decir, una vez obtenido el cálculo del material particulado emitido por una estufa, se debe aplicar dicho ajuste a modo de corrección numérico del procedimiento. La ecuación se presenta a continuación. (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud- CHILE, 2012)

$$E_{adj} = 1,82 * E_{MP}^{0,83} \quad (17)$$

5.3.4.4. Densidad básica de la madera

Conocer la densidad básica del combustible que se utiliza es esencial para abordar diversas temáticas, desde los tipos de compuestos presentes en el combustible hasta la forma en que se combustione, situaciones que influyen el proceso de combustión, y por ende la dependencia de emisión de material particulado. Para esto se utiliza el modelo de densidad básica de la biomasa que se presenta como (Corvalán & Hernández, 2012):

$$D_A = 402 + 11,133 * E - 0,111 * E^2 \quad (18)$$

$$D_V = 368 + 12,67 * E - 0,222 * E^2 \quad (19)$$

Obtenida para Eucalyptus Globulus de la zona de Arauco y para la zona de Valdivia.

5.3.4.5. Incertidumbre de medidas

5.3.4.5.1. Incertidumbre estándar

La incertidumbre estándar corresponde a los valores que se presentan como errores en la medición debido a perturbaciones físicas que afectan a la herramienta que mide como al mensurando. Esta incertidumbre se expresa como una desviación estándar y los instrumentos de medición que están sometidos a la evaluación de incertidumbre corresponden a los que tienen una participación directa del proceso de análisis, estos son (JCGM 106:2012, 2012):

1. Tubo de Pitot, ya que permite mensurar las presiones estáticas y dinámicas al interior del ducto de dilución.
2. Fotodiodo, ya que permite mensurar la intensidad de luz que atraviesa la columna de gases al interior del ducto de dilución.

Existen dos metodologías de evaluación de la incertidumbre estándar; Evaluación tipo A se hace mediante análisis estadísticos de los valores medidos y la Evaluación tipo B, que corresponde a estimaciones basadas en incertidumbres anteriores de medidas, en errores sistemáticos no corregidos y límites máximos admisibles de variación de magnitudes de influencia.

En esta investigación se aplica sólo la Evaluación tipo A para el sensor foto-receptor debido a que no se posee información de incertidumbre de las herramientas sensoriales electrónicas que se utilizan para las mediciones, mientras que para analizar la incertidumbre del tubo de Pitot se utiliza la Evaluación tipo B ya que se posee el certificado de calibración de la entidad competente.

- **Estimación basada en desviación estándar para Fotodiodo**

La estimación de intensidad inicial de cada ensayo por parte del sensor, se obtuvo mediante la desviación estándar de la muestra ensayada, tal como se presenta en la siguiente ecuación (ISO21748, 2010), (Junga & Chudy, 2017):

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (20)$$

Luego

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

Posteriormente se utiliza la incertidumbre estándar de repetibilidad (BIPM, 2008), esto se debe a que solo se tiene una sola muestra con muchas observaciones, por lo tanto:

$$u(x) = s(\bar{x}) * t \quad (22)$$

Considerando el número de observaciones (Anexo C) correspondiente a la investigación.

- **Estimación basada en evaluaciones anteriores de incertidumbre del Tubo de Pitot**

Se hace uso del Certificado de Calibración y Verificación otorgado por el Instituto de Salud de Chile, entidad encargada de la labor ya mencionada para los equipos de muestreo de Isocinetismo.

Con los valores del Certificado de Calibración se utiliza la siguiente ecuación para la Incertidumbre Estándar (EURACHEM/CITAC Guide CG4, 2012):

$$u_{EA} = \frac{U}{k} \quad (24)$$

5.3.4.5.2. Incertidumbre estándar combinada

Se requiere solo un único número que estime la incertidumbre, relacionando las incertidumbres mencionadas anteriormente. De lo expresado en la subsección anterior se desarrolla la metodología para el cálculo de la Incertidumbre Estándar Combinada.

Existen dos incertidumbres combinadas, que dependen del tipo de entrada de las magnitudes, se expresan como; Medidas directas que corresponden a las medidas otorgadas por los instrumentos y que se operan de manera de adición o sustracción de las variables, y las Medidas Indirectas que corresponden a las mediciones que requieren más magnitudes y su operación es multiplicando o dividiendo dichos mensurados. Para esta investigación se utiliza la Medida Indirecta, cuya ecuación y propagación se presenta a continuación.

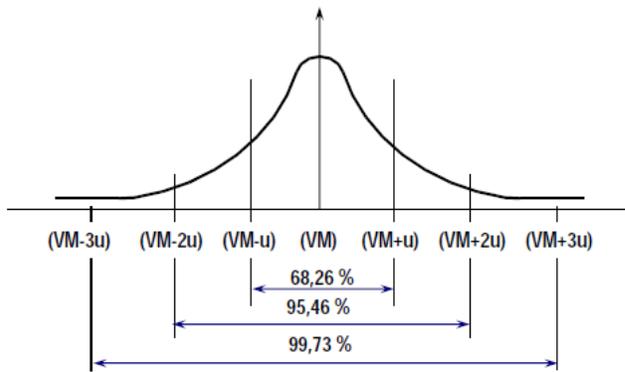
$$RM = Y_{ind} = (X_1)^{\pm a} * (X_2)^{\pm b} * (X_3)^{\pm c} \dots (X_n)^{\pm m} \quad (25)$$

Mientras que su cálculo directo se expresa como sigue (BIPM, 2008):

$$w_c(Y_{ind}) = \frac{u_c(Y_{ind})}{Y_{ind}} = \sqrt{\left(a \frac{u(X_1)}{X_1}\right)^2 + \left(b \frac{u(X_1)}{X_1}\right)^2 + \dots + \left(n \frac{u(X_3)}{X_3}\right)^2} \quad (26)$$

5.3.4.5.3. Incertidumbre Expandida

Una vez calculada la incertidumbre combinada, se debe calcular dicho valor con un factor de cobertura, valor que depende de la probabilidad de cobertura. El objetivo del factor es aumentar la probabilidad de que el valor verdadero esté contenido en el intervalo de cobertura especificado (Instituto Nacional de Normalización, 2017).



Según la figura 21, se tienen tres valores para el factor de cobertura. Si la probabilidad de que el valor verdadero esté contenido en el intervalo del 68,26% se utiliza un $k = 1$, si el intervalo es 95,46% el $k = 2$ y 99,73% corresponde a un $k = 3$. Para esta investigación se utiliza un factor de cobertura equivalente a 95,46%.

Figura 21: Gráfico de intervalos de probabilidad de valor verdadero. (Instituto Nacional de Normalización, 2017)

De las ecuaciones anteriores se desprende la incertidumbre expandida, tal como sigue

$$w_c(Y_{ind}) = \frac{u_{EA}}{VM} \quad (27)$$

Luego

$$U = u_{EA} * k \quad (28)$$

En donde finalmente el resultado medido queda como:

$$RM = (VM \pm U) \quad (29)$$

Capítulo 6. Resultados y discusiones

6.1. Condiciones de operación de los elementos de ensayos

En base a la velocidad de emisión-captura de datos, se decidió la siguiente secuencia metodológica.

Tabla 11: Características de la metodología usada en la investigación. (Elaboración propia)

Tipo de Metodología de Ensayo	Símbolo	Duración ensayo tiempo [h]	Volumen transversal de muestreo [cm ³]
Ensayo con el sistema de 1 emisor y 1 receptor	1x1	Correspondiente a la Metodología Ch-28	0,0135

Los parámetros y condiciones del combustible y las estufas utilizadas se presentan a continuación:

Tabla 12: Parámetros y condiciones que se utilizaron en la investigación. (Elaboración propia)

	Estufa N°1			Estufa N°2			Cocina N°1		
	E-1	E-2	E-3	E-6	E-7	E-10	E-11	E-12	E-13
Potencia Térmica [kW]	7,80	7,80	7,80	9,40	9,40	9,40	11,20	11,20	11,20
Duración Ensayo [min]	132	125	139	83	96	65	57	66	80
Carga de Combustible [kg]	4,65	4,65	4,65	3,4	3,75	3,75	1,90	2,00	1,85

6.1.1. Propiedades químicas del combustible utilizado

El poder calorífico de las distintas muestras de combustibles utilizado se presenta a continuación:

Tabla 13: Poder calorífico inferior de muestras de combustible Eucalyptus Globulus. (Laboratorio de Combustión y Partículas, UFRO)

Resultado Ponderado	Energía [MJ]	Masa [g]
Promedio	18.10	0.5333

6.1.1.1. Densidad básica

La densidad básica del combustible se calculó según la ecuación 18. La edad del sector forestal de donde proviene el combustible bordeaba una edad de 15 años, por consiguiente posee una densidad igual a:

Tabla 14: Densidad básica de muestras de combustible de ensayo. (Elaboración propia)

Resultado	D_A [kg/m ³]
Densidad	544,02

6.1.1.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad en base seca promedio del combustible de ensayo se presenta a continuación:

Tabla 15: Contenido de humedad en base seca de muestras de combustible de ensayo. (Laboratorio de Combustión y Partículas, UFRO)

Muestras de Ensayos	Promedio [%]
Ensayo 1	15,23
Ensayo 2	15,44
Ensayo 3	14,81
Ensayo 6	13,98
Ensayo 7	14,11
Ensayo 10	14,67
Ensayo 11	14,53
Ensayo 12	16,73
Ensayo 13	16,66

6.1.1.3. Geometría, volumen y densidad del combustible en cámara

La geometría del combustible ensayado corresponde a las especificaciones presentadas en el Libro de Metodologías Aprobadas Método CH-28 (Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud, 2013).

Tabla 16: Propiedades obtenidas en cada muestra del combustible de ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

Muestras	Ensayos	Geometría [m]	Densidad del combustible de la cámara de carga [kg/m ³]	Volumen [m ³]
N°1	1	0,30; 0,1016; 0,0508	110,29	0,001591
	3	0,30; 0,1016; 0,0508	110,29	0,001591
N°2	6	0,30; 0,1016; 0,0508	110,29	0,001591
	10	0,30; 0,1016; 0,0508	110,29	0,001591
N°3	11	0,32; 0,1016; 0,0508	122,04	0,001660
	13	0,32; 0,1016; 0,0508	122,04	0,001660

6.2. Análisis de resultados del sensor óptico

La primera etapa antes de utilizar el sensor óptico en esta investigación, es determinar la intensidad inicial y el comportamiento del mismo. Parámetros que se obtienen con el fin de identificar tanto la incertidumbre, como la resolución del sensor.

La respuesta espectral del voltaje utilizado por el emisor led, influye directamente en la intensidad recibida por el foto receptor, para eso se define la correlación Voltaje-Intensidad. Dicha correlación se determinó en pruebas previas a la utilización y montaje del sistema óptico en el banco de ensayos, de forma que al aumentar el voltaje de la fuente emisora se evalúe la respuesta recibida por el receptor. Los resultados de la correlación se presentan en la siguiente figura.

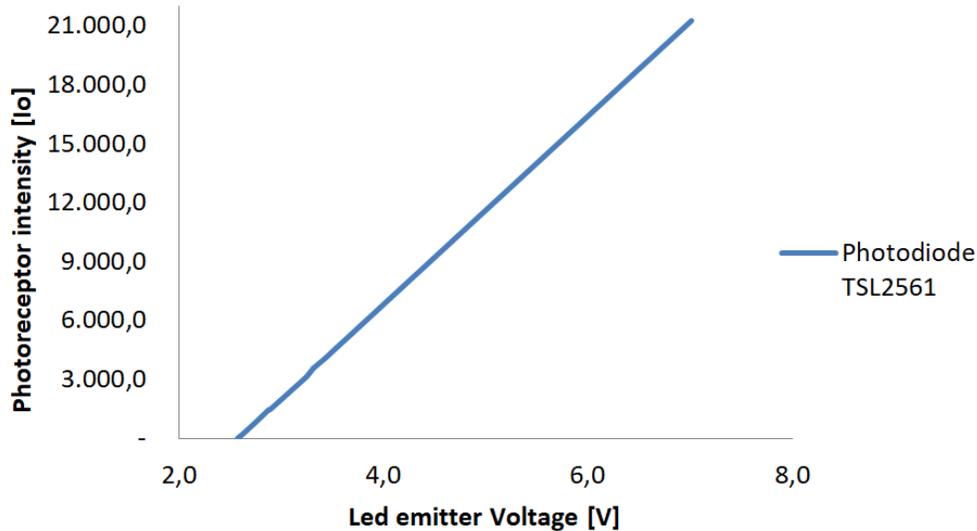


Figura 22: Correlación de Intensidad recibida por Foto-receptor y Voltaje del emisor led. (Fuente: Elaboración propia)

Los valores de la correlación se encuentran en el anexo A. La intensidad inicial detectada por el sensor se obtiene haciendo funcionar durante un periodo específico, la fuente emisora de luz visible, tal como se mostró en la sección 5, energizada por un voltaje y amperaje constantes, tal como se presenta en la tabla 16, en donde corresponde a los datos obtenidos con la estufa N°1, la tabla 17 a la estufa N°2, y la tabla 18 a la cocina N°1. Ni un equipo se encuentra en proceso de combustión en esta etapa del proceso.

Tabla 17: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Estufa N°1. (Elaboración propia)

Estufa N°1	Desviación Estándar	Desviación Estándar Media	Incertidumbre Estándar de Repetitividad	Promedio [lx]	Tiempo Ensayo [min]
Medición 1	11,55	0,13	0,13	309,99	20
Medición 2	0,85	0,00	0,00	325,00	20
Medición 3	0,47	0,01	0,01	272,02	20

Tabla 18: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Estufa N°2. (Elaboración propia)

Estufa N°2	Desviación Estándar	Desviación Estándar Media	Incertidumbre Estándar de Repetitividad	Promedio [lx]	Tiempo Ensayo [min]
Medición 1	7,64	0,03	0,03	872,73	20
Medición 2	2,25	0,02	0,02	1.090,91	20
Medición 3	3,56	0,03	0,03	2.523,99	20

Tabla 19: Análisis de incertidumbre en Medición Inicial en Cocina N°1. (Elaboración propia)

Cocina N°1	Desviación Estándar	Desviación Estándar Media	Incertidumbre Estándar de Repetitividad	Promedio [lx]	Tiempo Ensayo [min]
Medición 1	5,28	0,13	0,13	3.885,28	20
Medición 2	4,77	0,12	0,12	3.811,64	20
Medición 3	4,84	0,21	0,21	2.772,35	20

6.2.1. Resultado del análisis Incertidumbre Expandida

La incertidumbre expandida para el caso del tubo de Pitot, equivale a 0. Ya que el instrumento trabaja dentro de los rangos establecidos según la normativa legal, y cualquier variabilidad del resultado se corrige en el mismo cálculo de velocidades transversales de la norma 5G.

Los resultados de incertidumbres expandidas para la Fotometría se expresan para los valores de intensidades recibidas por el sensor, esto equivale a la incertidumbre expandida equivalente a cada medición, resultados presentados a continuación.

Tabla 20: Incertidumbre expandida de los resultados de intensidad del Foto-receptor. (Fuente: Elaboración propia)

Ensayos	Incertidumbre Expandida	Valor Promedio Intensidad
Ensayo 1	0,26107	302,89
Ensayo 2	0,00762	314,39
Ensayo 3	0,01098	247,71
Ensayo 6	0,06869	852,27
Ensayo 7	0,03250	1.065,18
Ensayo 10	1,21261	2.453,79
Ensayo 11	0,26251	3.819,68
Ensayo 12	0,24293	3.745,50
Ensayo 13	0,41540	2.696,03

De la tabla anterior, se determina la influencia en el valor final del cálculo de la emisión másica de material particulado, según la ecuación 15, entregando los rangos de valores en la siguiente tabla.

Tabla 21: Resultados Medidos y porcentaje de incertidumbre aplicado al valor medido. (Fuente: Elaboración propia)

Ensayo	Valor Medido [g/h]	Incertidumbre Expandida [g/h]	Incertidumbre [%]
Ensayo 1	4,6	+/-0,34	7,4%
Ensayo 2	6,5	+/-0,01	0,1%
Ensayo 3	18,3	+/-0,02	0,1%
Ensayo 6	4,7	+/-0,03	0,6%
Ensayo 7	4,8	+/-0,01	0,3%
Ensayo 10	6,4	+/-0,20	3,1%
Ensayo 11	3,3	+/-0,03	0,8%
Ensayo 12	3,5	+/-0,02	0,7%
Ensayo 13	5,5	+/-0,06	1,1%

6.2.2. Determinación del valor inicial del sensor

De las tablas anteriores se extraen los valores presentados en las tablas 19, 20 y 21, correspondientes a la intensidad inicial emitida por el emisor led y recibida por el fotodiodo. Dichos valores fueron los utilizados para el cálculo del modelo de correlación presentado en la sección 5.3.4.1.

Tabla 22: Resultados de intensidades iniciales utilizadas en la investigación, para cada ensayo. (Elaboración propia)

Mediciones	Intensidad Inicial [I _o]	
Estufa N°1	Medición 1	309
	Medición 2	325
	Medición 3	272
Estufa N°2	Medición 1	872
	Medición 2	1.090
	Medición 3	2.524
Cocina N°1	Medición 1	3.885
	Medición 2	3.811
	Medición 3	3.772

6.2.3. Resultados de las mediciones

6.3. Análisis de resultados de concentración y flujo másico determinado

El resumen de los resultados de velocidad de emisión de material particulado, determinado mediante el sistema fotométrico y la metodología Ch-28. Se obtuvieron cuatro valores de emisión de material particulado para cada ensayo realizado: las dos primeras equivalentes al protocolo ya establecido, donde La Emisión Ch-28 Sin Factor de ajuste corresponde al cálculo determinado por la Metodología Ch-28, y la Emisión Ch-28 Con Factor de Ajuste aplicada a la Metodología 5G. Las dos últimas corresponden a los resultados obtenidos por el sistema fotométrico, el primero es Fotometría Sin Factor que es el cálculo del promedio lineal de la opacidad total adquirida en los ensayos, mientras que la Fotometría Con Factor equivale al cálculo del promedio

ponderado de la opacidad respectiva en cada ensayo. Dichos resultados se presentan a continuación:

Tabla 23: Resultados comparativos de emisión de Material Particulado. (Elaboración propia)

Metodología	Estufa N°1			Estufa N°2			Cocina N°1		
	E-1	E-2	E-3	E-6	E-7	E-10	E-11	E-12	E-13
Emisión Ch-28 Sin Factor de Ajuste	0,54	1,75	1,48	0,73	2,91	8,80	1,42	1,21	6,19
Emisión Ch-28 Con Factor de Ajuste	1,09	2,9	2,52	1,39	4,42	11,07	2,41	2,11	5,18
Fotometría Sin Factor [g/h]	3,93	1,07	1,38	7,58	4,64	14,11	3,33	1,10	5,48
Fotometría Con Factor [g/h]	3,93	1,07	1,39	7,60	4,76	14,11	3,33	1,10	5,48

Teniendo en cuenta sólo los resultados oficiales de la tabla anterior, se grafican a continuación

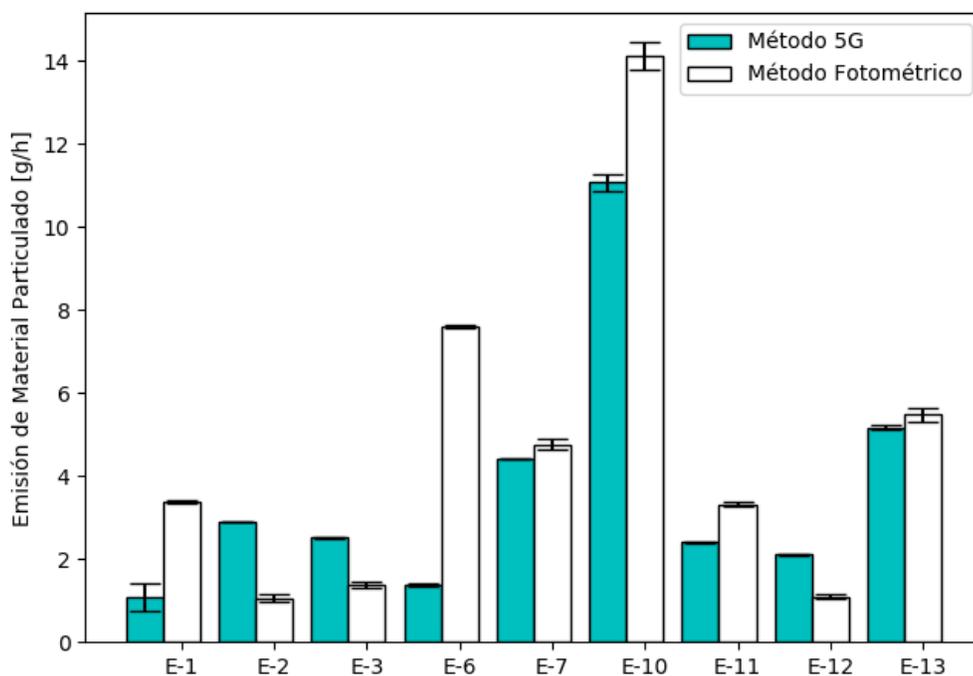


Figura 23: Gráfico comparativo de resultados de MP entre Fotometría Óptica y Metodología Ch-5G. (Elaboración propia)

6.3.1. Resultados obtenidos con el sensor

6.3.1.1. Emisión de material particulado en estufa N°1

Los resultados obtenidos con el sistema fotométrico, dieron cuenta del proceso de combustión que llevó a cabo en cada ensayo con la estufa N°1.

En los gráficos siguientes, se evidencian los resultados obtenidos referentes a la emisión de material particulado en el tiempo.

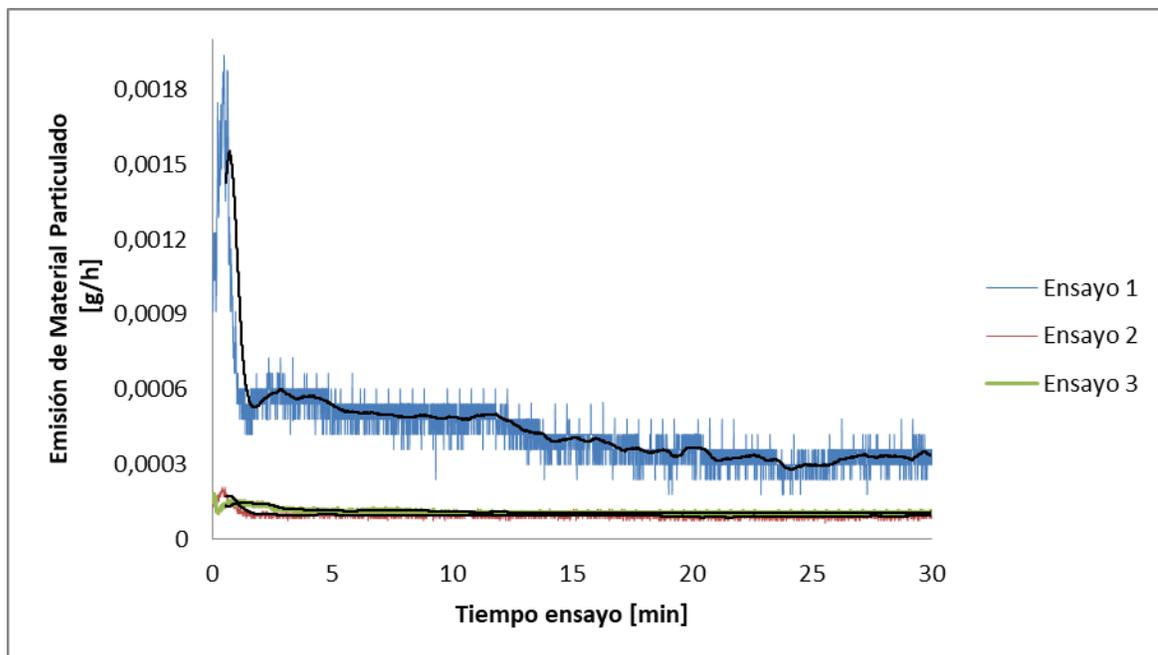


Figura 24: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 10 minutos, en Estufa N°1. (Elaboración propia)

Durante los diez primeros minutos de iniciada la combustión, se aprecia la mayor emisión de material particulado. Situación que es demostrada en la teoría, ya que al momento de la ignición de un combustible sólido éste libera grandes cantidades de gases debido a la masa de combustible que está reaccionando subitamente con el poco oxígeno disponible, lo que se traduce en humos visibles. Se obtuvo el 27, 17 y 15% del total de material particulado en cada ensayo en este tiempo.

En los 30 minutos de iniciada la combustión de la biomasa, se aprecia una estabilización en el proceso de combustión. Esto se traduce en la calidad y eficiencia del equipo térmico utilizado en los ensayos. Se presenta una combustión estable y constante en el tiempo, excepto en el ensayo N°1, cuya curva es superior en emisión de partículas que los otros ensayos.

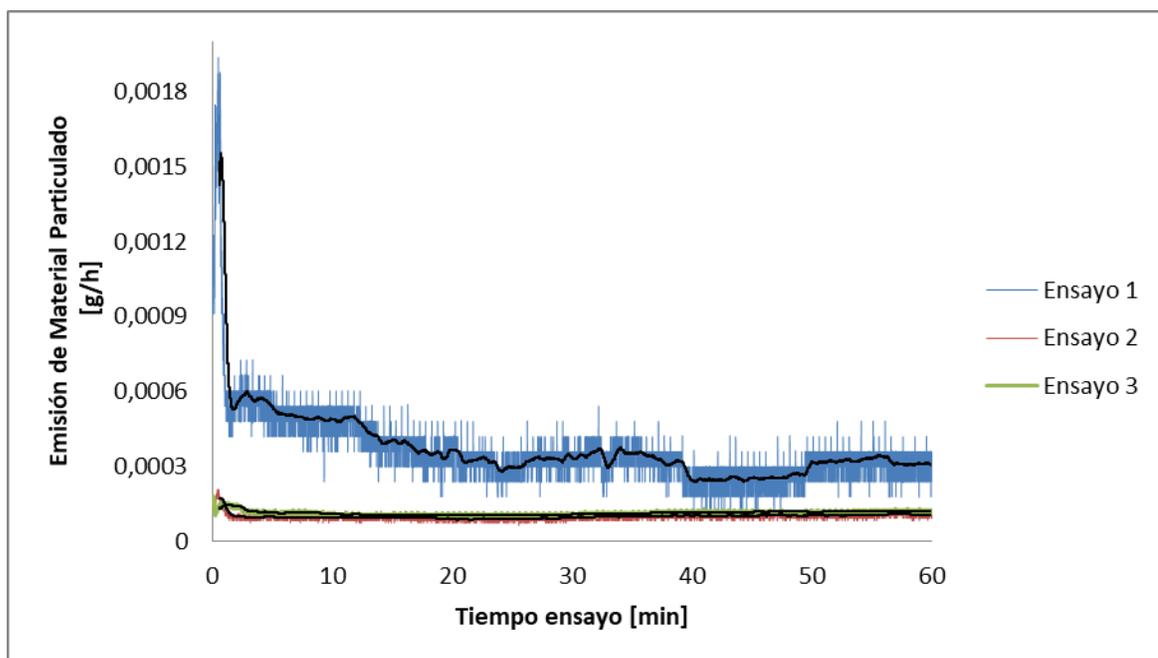


Figura 25: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Estufa N°1. (Elaboración propia)

En los gráficos no se evidencian alzas en la emisión de MP, salvo en el ensayo 3. El ensayo 2 se mantiene constante en el tiempo con una leve alza a medida que el combustible se va consumiendo. El ensayo 1 presenta una disminución evidente de la emisión de material particulado.

De los gráficos anteriores, se aprecia que la mayor emisión de MP se obtuvo en el Ensayo 2 según 5G, situación que no corresponde a la mayor opacidad presentada a lo largo de los ensayos. La mayor opacidad se evidencia en el ensayo 1, mientras que en los ensayos 2 y 3 la opacidad es bastante menor, no así la emisión de MP, ya que en los ensayos 1 y 2 son un 50% en promedio mayor que el ensayo 1 según el método fotométrico.

La suma de todos los valores obtenidos de la emisión de MP da como consecuencia el resultado de Emisión de Material Particulado presentado en la figura 28.

En los ensayos 1, 2 y 3 se obtuvieron porcentajes de error cercano a 72, 63 y 45%, respectivamente. Situación que se explica debido a la resolución capaz de tolerar el sistema de fotometría, ya que la estufa N°1 cumple con las normas de emisión de material particulado, normado por la metodología Ch-28, lo que implica que la estufa emite bajas concentraciones de MP durante el periodo de ensayo.

Otro aspecto importante a considerar es el tiempo de ensayo. Originalmente el protocolo Ch-28 utiliza todo el tiempo que se demora el combustible en consumirse completamente, llevando todos los resultados obtenidos a la constante de 1 hora de combustión. Este ajuste de valores lleva consigo la cantidad emitida en ese tiempo, por lo tanto, si la estufa emite pocos humos visibles y

la combustión tiene una duración cercana a las dos horas, esto puede afectar a la sensibilidad del sensor escogido en la investigación.

6.3.1.2. Emisión de material particulado en estufa N°2

Los resultados obtenidos con el sistema fotométrico, dieron cuenta del proceso de combustión que llevó a cabo en cada ensayo con la estufa N°2.

En los gráficos siguientes, se evidencian los resultados obtenidos referentes a la opacidad de los humos y la emisión de material particulado en el tiempo.

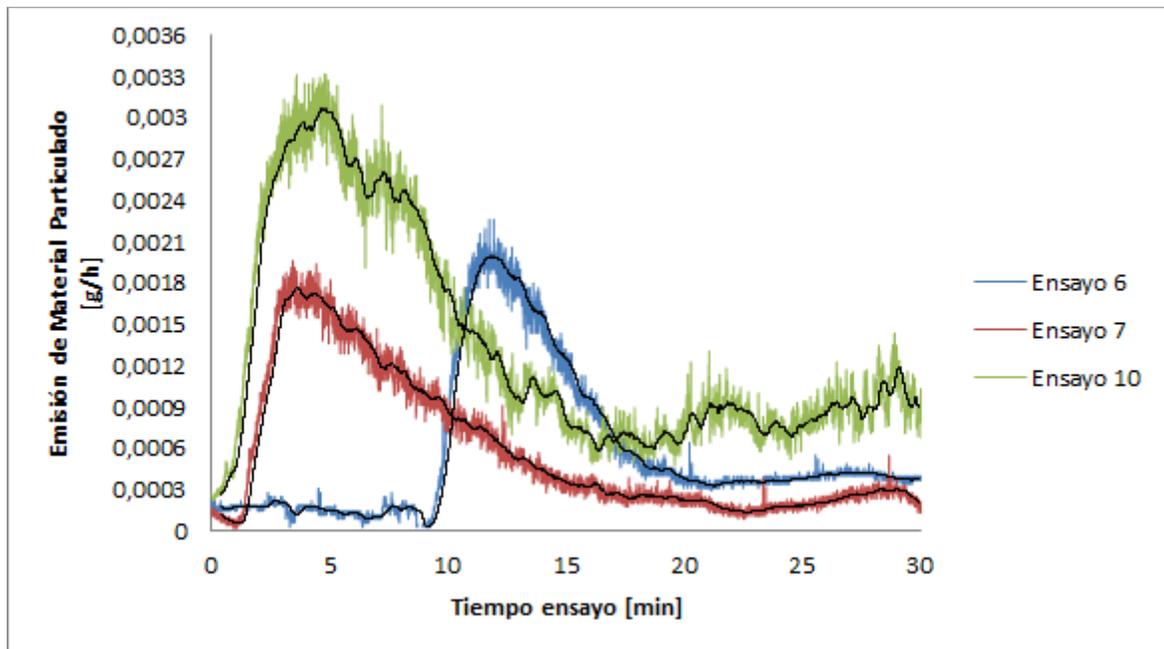


Figura 26: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 30 minutos, en Estufa N°2. (Elaboración propia)

En los primeros 10 minutos se aprecia notablemente la alta emisión de material particulado generado por la estufa. Situación que se presentó también en la estufa N°1.

Dentro de este tiempo de ensayo, se obtuvo 33, 76 y 51% del total de material particulado emitido en el lapso de 60 minutos para cada ensayo respectivamente.

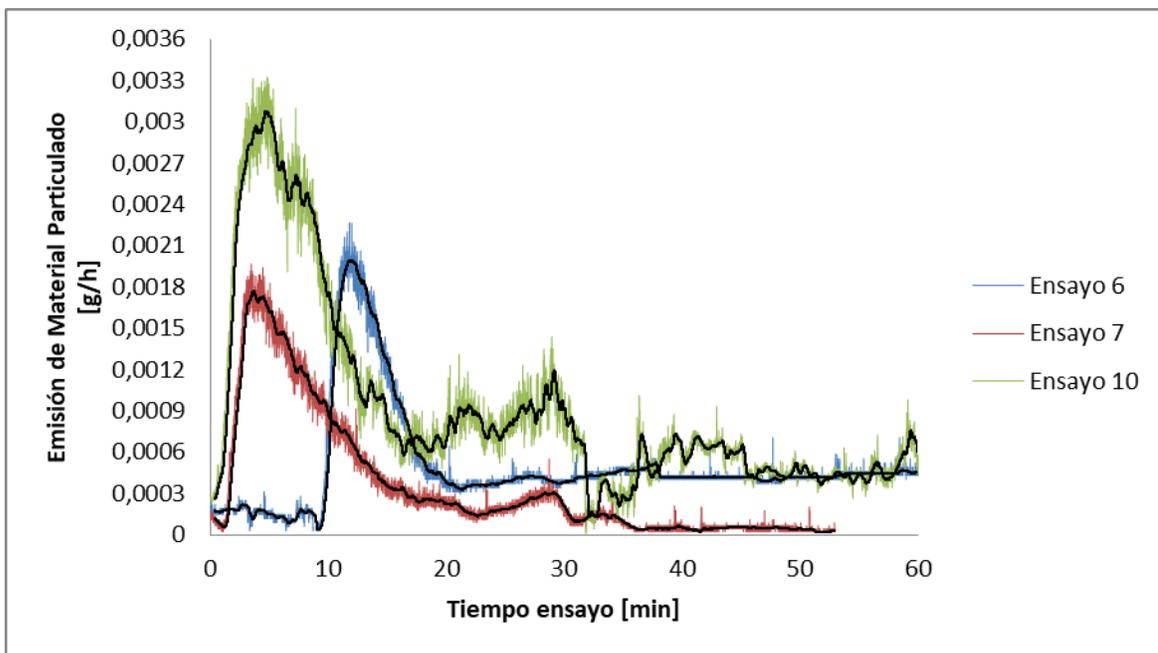


Figura 27: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Estufa N°2. (Elaboración propia)

El proceso de combustión durante los 30 minutos luego de iniciada la combustión, se aprecia la reducción del MP emitido para continuar en una emisión un poco mas controlada, salvo en el ensayo 10.

En resumen, la emisión de MP se mantiene en rangos más constantes luego de los 32 minutos de iniciada la combustión, esto claro para los ensayos 6 y 7, mientras que el ensayo 10 presenta una alta inestabilidad.

Los tres ensayos realizados, evidencian el comportamiento del proceso de combustión que realiza el calefactor 7. Situación que permite caracterizar la tasa de emisión de MP a lo largo de la oxidación del combustible.

Se aprecia que en el ensayo 10, la estabilidad es mucho menor en comparación a los ensayos 6 y 7, esto se evidencia en la alta oscilación de los resultados de emisión de MP posteriores a la estabilización “normal” de la estufa N°2, que se presenta transcurrido los 20 primeros minutos. Dicha inestabilidad se debe a que la estufa no posee un sistema de sellado hermético en la puerta ni en paredes, además de no poseer una segunda cámara de combustión, como la que posee la estufa N°1, que permita combustionar el combustible que no alcanza a oxidarse en la cámara de combustión. Esto en adición a la carencia de entradas de aire que garanticen la correcta combustión de la leña en su interior.

La mayor emisión de MP se obtuvo en el Ensayo 10, situación que también se demuestra en la opacidad.

La suma de todos los valores obtenidos de la emisión de MP da como consecuencia el resultado de Emisión de Material Particulado presentado en la figura 30.

En los ensayos 6, 7 y 10 se obtuvieron porcentajes de error cercano a 447, 7 y 22%, respectivamente. En donde el primer ensayo que se realizó fue a modo de exploración de la capacidad de recepción del sensor, situación corregida en los ensayos 7 y 10. Según los valores anteriores, el sensor se encuentra trabajando dentro del rango de su resolución.

6.3.1.3. Emisión de material particulado en cocina a leña N°1

Los resultados obtenidos con el sistema fotométrico, dieron cuenta del proceso de combustión que llevó a cabo en cada ensayo con la cocina N°1.

En los gráficos siguientes, se evidencian los resultados obtenidos referentes a la opacidad de los humos y la emisión de material particulado en el tiempo.

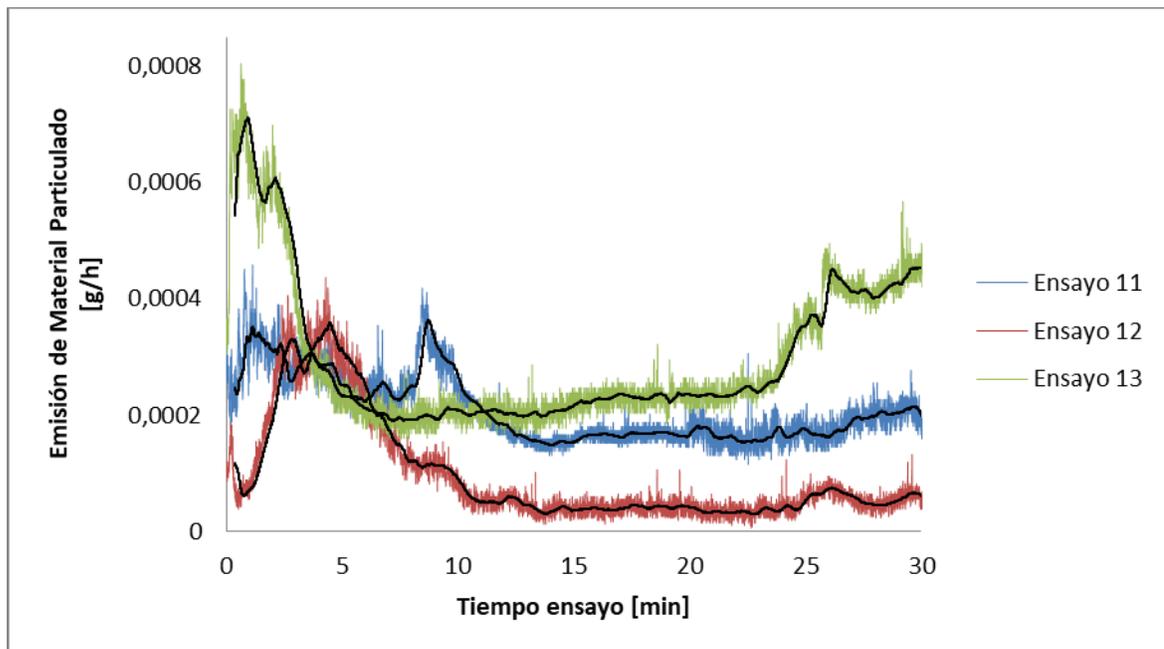


Figura 28: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 30 minutos, en Cocina N°1. (Elaboración propia)

En los primeros 10 minutos de la combustión de la leña, se repite la tendencia en el comportamiento de emisión del MP y la opacidad presentada en todos los ensayos. Resultando un 28, 52 y 20% del total de material particulado emitido en el lapso de 60 minutos para cada ensayo respectivamente.

Cuando se analizan los 30 minutos posteriores al inicio de la ignición, se evidencia el comportamiento estable de la combustión de la biomasa en el ensayo 11 y 12, mientras que en el ensayo 13 se aprecia un alza en la emisión de MP.

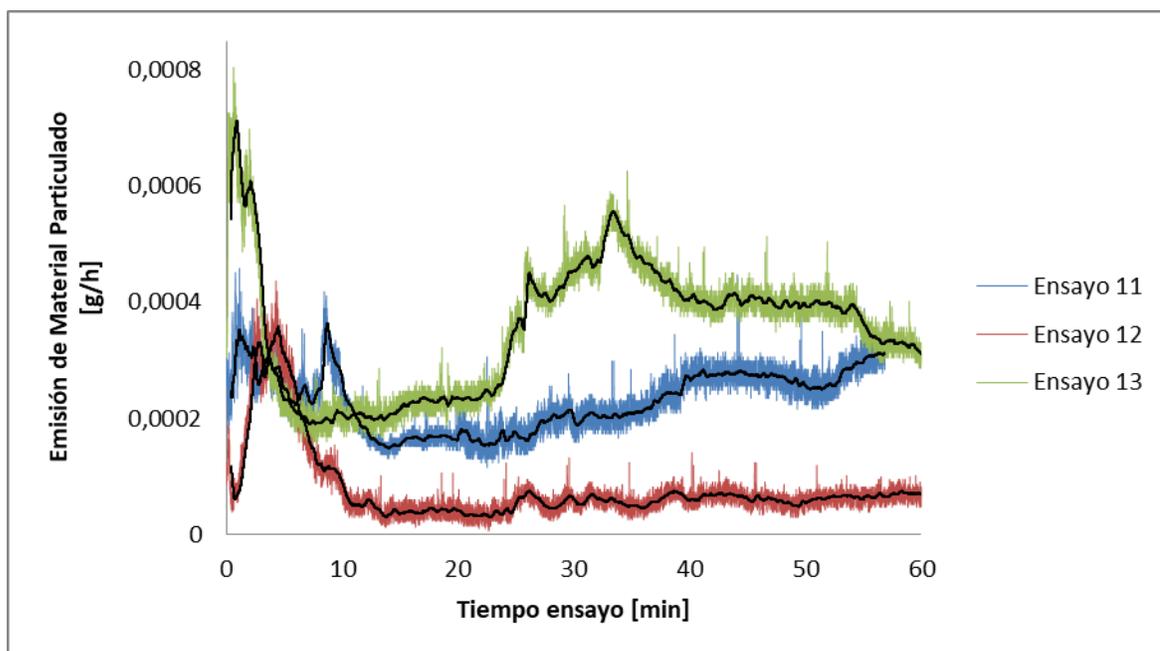


Figura 29: Resultado de Emisión de Material Particulado en un periodo de 60 minutos, en Cocina N°1. (Elaboración propia)

En resumen, la emisión de MP se mantiene en rangos más constantes sólo para el ensayo 12 luego de los 13 minutos de iniciada la combustión, mientras que los ensayos 11 y 13 presentan una alta inestabilidad.

Los tres ensayos realizados, evidencian el comportamiento del proceso de combustión que realiza la cocina N°1, aun así entre los ensayos no se aprecia un comportamiento constante, y esto se debe principalmente a que el equipo no tiene un sistema de sellado hermético en la puerta ni en el cenicero, lo que permite el paso descontrolado de aire a la combustión.

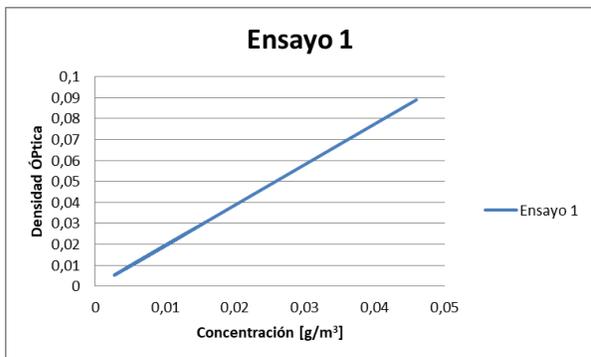
A diferencia de las estufas anteriores, la cocina posee una segunda cámara de combustión que permite reducir en gran medida la cantidad de emisiones de MP, a pesar de eso, no disipa en gran medida la emisión de partículas.

La suma de todos los valores obtenidos de la emisión de MP da como consecuencia el resultado de Emisión de Material Particulado presentado en la figura 30.

En los ensayos 11, 12 y 13 se obtuvo porcentajes de error cercano a 27, 48 y 6%, respectivamente. En donde el primer ensayo que se realizó fue a modo de exploración de la capacidad de recepción del sensor, situación corregida en los ensayos 12 y 13. Según los valores anteriores, el sensor se encuentra trabajando dentro del rango de su resolución de igual forma que en la cocina N°2.

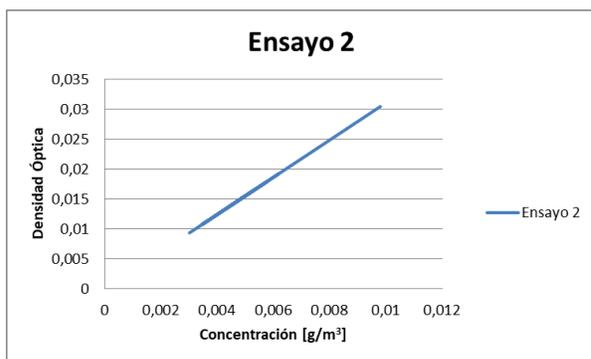
6.3.2. Análisis de concentración óptica versus Densidad Óptica

Un parámetro necesario a considerar, es la relación entre la densidad óptica y la concentración obtenida a lo largo de cada ensayo. Esto permite determinar un sistema de correlación y ajuste que se acomode a los datos conseguidos.



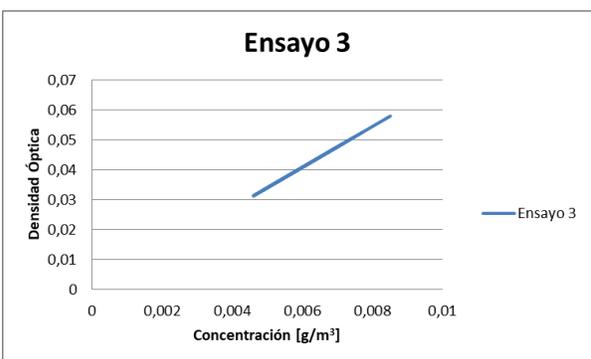
La concentración para el ensayo N°1 fluctúa entre los 0 a 0,08893 g/m³ en el lapso de 1 hora de ensayo, su equivalencia en densidad óptica es el rango entre 0,0028 a 0,0459.

Figura 30: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 1. (Elaboración propia)



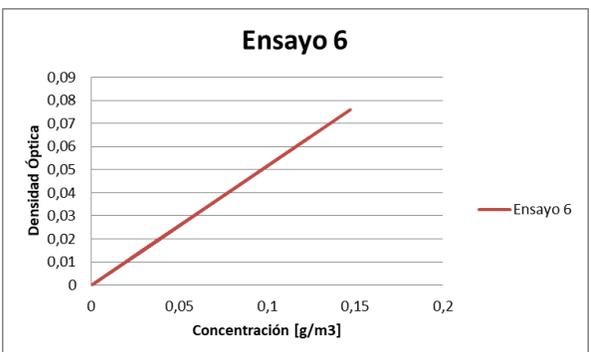
La concentración para el ensayo N°2 oscila entre 0,0030 a 0,0097 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0030 a 0,0094.

Figura 31: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 2. (Elaboración propia)



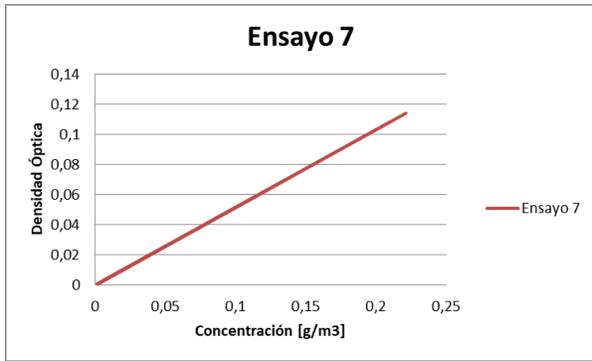
La concentración para el ensayo N°3 varía entre 0,0461 a 0,0085 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0314 a 0,0579.

Figura 32: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 3. (Elaboración propia)



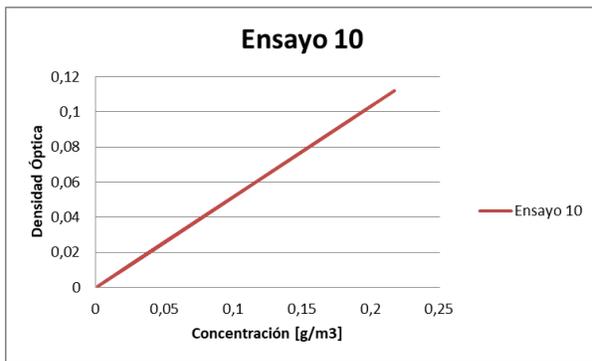
La concentración para el ensayo N°6 oscila entre 0,0019 a 0,1471 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0009 a 0,0759.

Figura 33: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 6. (Elaboración propia)



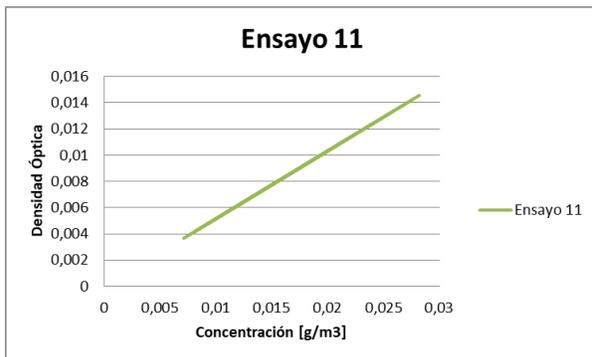
La concentración para el ensayo N°7 fluctúa entre 0,0015 a 0,2211 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0007 a 0,1141.

Figura 34: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 7. (Elaboración propia)



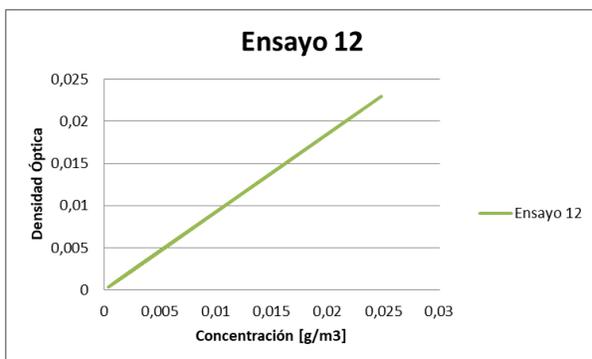
La concentración para el ensayo N°10 varía entre 0,0013 a 0,2171 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0006 a 0,1121.

Figura 35: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 10. (Elaboración propia)



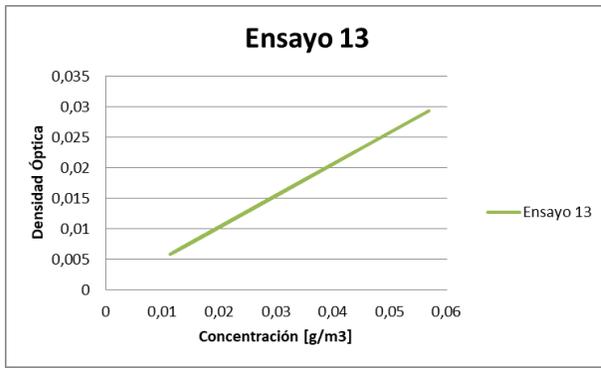
La concentración para el ensayo N°11 fluctúa entre 0,0071 a 0,0281 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0037 a 0,0145.

Figura 36: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 11. (Elaboración propia)



La concentración para el ensayo N°12 oscila entre 0,0003 a 0,0247 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0003 a 0,0229.

Figura 37: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 12. (Elaboración propia)



La concentración para el ensayo N°13 fluctúa entre 0,0113 a 0,0568 g/m³, mientras que su densidad óptica está dentro del rango de 0,0058 a 0,0293.

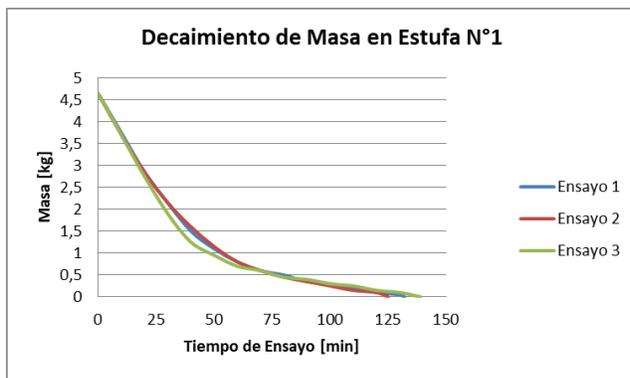
Figura 38: Correlación Densidad óptica y Concentración en Ensayo 13. (Elaboración propia)

Se aprecia que en todos los gráficos anteriores es constante el comportamiento entre la densidad óptica y la concentración de partículas, según la correlación que se presentó en la sección 4.3 figura 10.

6.4. Análisis y resultados del comportamiento de los combustores

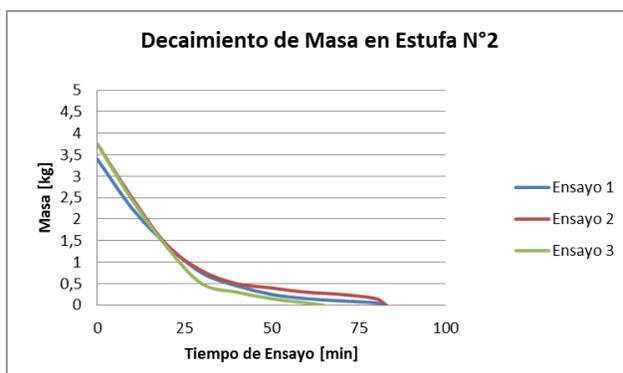
6.4.1. Decaimiento de masa

Durante cada ensayo realizado, se evaluó el comportamiento de cada equipo térmico, con el fin de verificar que las condiciones de la combustión de la biomasa sean similares en los respectivos ensayos. Dichos valores se encuentran en el Anexo A. Los resultados del decaimiento de masa se presentan a continuación.



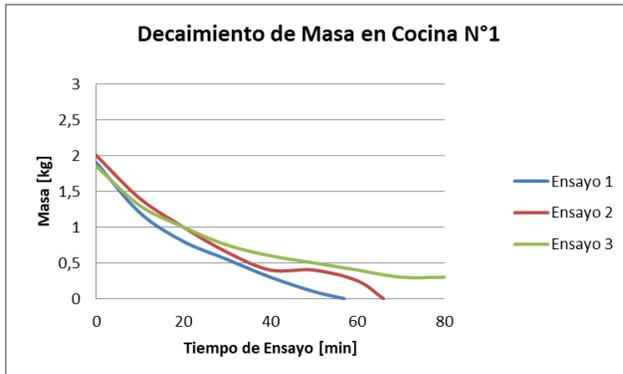
El decaimiento de masa obtenido en la Estufa N°1 presentó una diferencia porcentual en los ensayos se presentó en el ensayo 3 con un valor del 17% aproximadamente.

Figura 39: Decaimiento de masa en Estufa N°1. (Elaboración propia)



El decaimiento de masa obtenido en la estufa N°2 presentaron diferencias máximas de 16% aproximadamente. Diferencia que se demostró a lo largo de los ensayos.

Figura 40: Decaimiento de masa en Estufa N°2. (Elaboración propia)



El decaimiento de masa obtenido en la cocina N°1, presentó mayores diferencias que los ensayos anteriores, con una diferencia porcentual máxima de 87.5%

Figura 41: Decaimiento de masa en Cocina N°1.
(Elaboración propia)

El resultado del decaimiento de masa en los ensayos, representa la condición de operación estable obtenida por la combustión del combustible en cada equipo térmico.

Capítulo 7. Conclusiones y Perspectivas

Conclusiones

La detección del Material Particulado por parte de la Metodología Fotométrica utilizada en esta investigación permite aseverar las siguientes conclusiones:

- La alternativa de utilizar un sistema que permita determinar, de forma no invasiva, la cantidad de emisión de material particulado en Ductos de Dilución a un bajo costo, resulta factible sólo para rangos de emisiones entre 4 a 14 gramos por hora. Debido a la resolución y capacidad de muestreo que posee el sensor utilizado y la metodología óptica desarrollada.
- Los resultados presentados en los gráficos de emisión de material particulado y opacidad, demuestran que la evaluación del proceso de combustión es válida en esta metodología. Dado que la exactitud de las mediciones promedios es de 95%. Además de demostrar que la incertidumbre del sensor óptico no depende del voltaje recibido proveniente del emisor, explicado en la figura 24.
- La mayor tasa de emisión de material particulado se genera dentro de los primeros 15 minutos una vez iniciada la combustión, para ambas estufas. Mientras que en la cocina se visualiza una variabilidad en la emisión debido al poco control de la combustión que posee.
- Las menores diferencias obtenidas en la detección del MP entre la fotometría óptica y el método 5G corresponden a los ensayos N°7 y N°13, con porcentajes de error equivalentes a 7,14% y 5,68% de emisión de partículas respectivamente. Esto fue obtenido debido a la velocidad de muestreo del sistema óptico, que implica mejores aproximaciones al proceso de emisión de gases.
- Referente a la incertidumbre calculada en la medición y evaluación de material particulado mediante fotometría óptica, se obtuvo un valor máximo de incertidumbre 7%, correspondiente al Ensayo N°1. El ensayo N°10 con una incertidumbre 3%, mientras que el resto de los ensayos presenta una incertidumbre menor al 1%.
- La metodología 5G, presenta incertidumbre $\pm 3\%$ (Ferguson & Company, 2010). La metodología implementada en esta investigación determinando material particulado en el ducto de dilución, genera diferencia porcentual del 4%.
- Esta investigación deja las bases para optimizar el método fotométrico, que por costos puede ser una herramienta de ajuste y exploratoria en el sector productivo.

Perspectivas

Todos los resultados evidencian la complejidad que existe al momento de determinar la emisión de partículas generadas en combustión de biomasa. Dicha complejidad depende de una gran cantidad de variables difíciles de reconocer y controlar. Por lo tanto, resulta de gran utilidad desarrollar tecnología de bajo costo para agilizar los procesos de medición enfocados al tiempo de muestreo como a la sensibilidad y precisión del sistema de instrumentación.

En base a lo realizado, las perspectivas de trabajos pueden enfocarse en desarrollar y perfeccionar el sistema instrumental, y la medición de partículas de gases de combustión para distintos equipos térmicos de diferentes potencias.

El perfeccionamiento dice relación con: optimizar cada componente que interactúa en el sistema, disminuir la interferencia generada por el cableado y componentes electrónicos, disipar errores de medida por alzas de temperatura en los controladores, utilizar comunicación sincronizada entre el emisor y el receptor para mejorar los intervalos de muestreo y reducir errores, utilización de instrumentos de mayor y mejor resolución y sensibilidad. Además de la implementación de bancos de ensayos que permitan verificar y calibrar el sistema de monitoreo, con línea de partículas constantes y estables.

Este sistema desarrollado permitirá investigaciones de mayor profundidad para la emisión de material particulado, comportamiento fluido dinámico de partículas, variables de dependencia de fenómeno de aglomeración y nucleación de Gibbs para gases de combustión, sistemas de reducción de partículas y espectrometría aplicada de partículas.

Capítulo 8. Bibliografía

- Ambiente, C. N. (2009). *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*.
- BIPM. (2008). *JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. JCGM 100:2008.
- Bodin, A. (2010). *Opacimeter for high temperature diesel exhaust gases*. England: Department of Physics UMEA Universitet.
- Bolling, A., Pagels, J., & Yttri, K. (2009). Health effects of residential wood smoke particles: The importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. *Particle and Fibre Toxicology*, 1-20.
- Colbeck, I., Atkinson, B., & Johar, Y. (1997). The Morphology and Optical Properties of Soot Produced By Different Fuels. En E. S. Ltd, *J. Aerosol Sci Vol. 28, N°5* (págs. 715-723). Gran Bretaña: Elsevier Science Ltd.
- Corvalán, P., & Hernández, J. (2012). *Tablas de rendimiento en biomasa aérea en pie para plantaciones de Eucalyptus Globulus en Chile*. Santiago: Andros Impresores.
- División de Eficiencia Energética - Ministerio de Energía . (2015). *Guía práctica para el buen uso de la Leña: Leña Seca - Leña Eficiente*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Ebeling, J., & Jenkins, B. M. (1985). Physical and Chemical Properties of Biomass Fuels. *American Society of Agricultural Engineers*, 898-902.
- Edward F, O. (1971). *Motores de Combustion Interna, Analisis y Aplicaciones*.
- EURACHEM/CITAC Guide CG4. (2012). *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement 3rd Ed*. EURACHEM/CITAC.
- Fan, L.-S., & Zhu, C. (1998). Principles of Gas-Solid Flows. En L.-S. Fan, & C. Zhu, *Principles of Gas-Solid Flows* (págs. 3-39). Cambridge, United Estate: Cambridge University Press.
- Ferguson, R., & Company, A. a. (2010). *Analysis of Uncertainty, Repeatability and Reproducibility based on the EPA Accredited Laboratory Proficiency Test Database*. Heath Products Intertek Testing Services.
- Fitzpatrick, E., Bartle, K., Kubacki, M., Jones, J., & Pourkashanian, M. (2009). The mechanism of the formation of soot and the other pollutants during the co-firing of coal and pine wood in a fixed bed combustor. *Fuel*, 2409-2417.

- Flagan, R., & Seinfeld, J. (1998). *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- González, J. P. (s.f.). *Instrumentacion, Adquisición de Datos para Laboratorio Multidisciplinar y Motorización de Bomba Manual de Meca*.
- Hamins, A. (1993). Soot. *Enviromental Implications of Combustion Processes* (págs. 71-95). Maryland: CRC Press.
- Hollas, M. (2004). Modern Spectroscopy. En Hollas, & M. J, *Modern Spectroscopy Fourth Edition* (págs. 1-2). Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Huhtinen, M. (2006). *Europe Comission under the Intelligent Energy- Europe: Wood proprieties as a fuel*. Finland: Programme Intelligent Energy - Europe.
- Instituto de Salud Pública CH-28. (2013). Determinación de Material Particulado y Certificación y Auditoría de Calefactores a Leña. En *Libro de Metodologías Aprobadas* (pág. 36). Santiago: Gobierno de Chile.
- Instituto de Salud Pública Chile. (2012). *Contaminación del Aire*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud - CHILE. (2012). Libro de Metodologías Aprobadas: Método CH-5. En *Libro de Metodologías Aprobadas* (págs. 1-55). Santiago: Gobierno de Chile.
- Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud- CHILE. (2012). *Libro de Metodologías Aprobadas Método CH-5G*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Instituto de Salud Pública Ministerio de Salud, C. (2013). *Libro de Metodologías Aprobadas Método CH - 28*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (18-19 de Marzo de 2017). *Metrología Básica y Cálculo de Incertidumbre*. Santiago, Santiago, Metropolitana.
- ISO21748. (2010). *Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation*. ISO.
- Jahnke, J. A. (2000). *Continuous Emission Monitoring Second Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- JCGM 106:2012. (2012). *Evaluation of measurement data - The Role of measurement uncertainty in conformity assessment*. BIPM.
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., & Miles Jr, T. R. (1998). Combustion proprieties of biomass. *FUEL Processing Technology* 54, 17-46.

- Johansson, L., Tullin, C., & Leckner, B. (2003). Particle emission from biomass combustion in small combustors. En *Biomass and Bioenergy* (págs. 435-446). Suecia: Elsevier.
- Junga, R., & Chudy, P. J. (2017). Uncertainty estimation of the efficiency of small-scale boilers. *Measurement*, 186-194.
- Kennedy, I. M. (1997). Models of Soot Formation and Oxidation. En *Prog. Energy Combustion Science Vol 23* (págs. 95-132). Great Britain: Elsevier Science Ltd.
- Kenneth, J. (1998). *Continuous Emission Monitoring Compliance Assistance Program*. California: California Environmental Protection Agency.
- Kocbach, A., & Pagels, J. (2009). Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. *Particle and Fibre Toxicology*, 1-20.
- Kumar, S. (2006). *Organic Chemistry: Spectroscopy of Organic Compounds*. Amritsar: Guru Nanak Dev University.
- Lea-Langton, A., & Baeza-Romero, M. (2015). A Study of Smoke Formation From Wood Combustion. *Fuel Processing Technology* 137, 327-332.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Planes de Descontaminación Atmosférica Estrategia 2014 - 2018*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Plan de Descontaminación Atmosférica por MP 2.5 para las Comunas de Temuco y Padre las Casas y Actualización del Plan de Descontaminación por MP10 para las mismas Comunas. DS N°8*. Santiago: Contraloría General de Partes.
- Mulholland, G. W., & Croarkin, C. (2000). Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. *FIRE AND MATERIALS*, 227-230.
- Nussbaumer, T. (2011). *Characterisation of Particles from Wood Combustion with Respect to Health Relevance and Electrostatic Precipitation*. Zurich: PMid-European Biomass Conference.
- Oser, M., Nussbaumer, T., & Müller, P. (2003). Particle Formation in Wood Combustion and New Concept for a Low-Particle-Furnace. *7th ETH Conference on Combustion Generated Particles*, (págs. 1-30). Zurich.
- Owen, T. (2000). *Fundamentals of modern UV-visible spectroscopy*. Germany: Agilent Technologies .
- Pabst, W., & Gregorová, E. (2007). *Characterization of Particles and Particle Systems*. Prague: ICT Prague.

- Pettersen, R. (1984). The Chemical Composition of Wood. *Advances in Chemistry*, vol 207, 57-126.
- Presidencia, M. S. (2010). *Plan de Descontaminación Atmosférica Temuco-Padre Las Casas Decreto 78*.
- R.A. Herrick, G. M. (2003). Particulates, Opacity, Dust, and Smoke. *Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis, Fourth Edition, VOLUME I*, 1544-1557.
- Rincón, L. (2006). *Probabilidad y Estadística*. México: Facultad de Ciencias UNAM.
- Rodríguez, A. M. (2010). *Modelación de la generación de material particulado en función de la composición del combustible*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. United State of America: McGraw-Hill.
- Simoneit, B., Schauer, J., & Nolte, G. (1999). Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. *Atmospheric Environment* 33, 173-182.
- Sippula, O. (2010). *Fine Particle Formation and Emissions in Biomass Combustion*. Finland: University of Eastern Finland.
- Smith, G., King, T. A., & Wilkins, D. (2008). Optics and Photonics An Introduction Second Edition. En G. Smith, T. A. King, & D. Wilkins, *Optics and Photonics An Introduction Second Edition* (págs. 10-12). Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Unidad de Desarrollo Tecnológico, U. d. (2012). *Antecedentes para Elaborar una Norma de Emisión para Calderas y Procesos de Combustión en el Sector Industrial, Comercial y Residencia*. Santiago: Universidad de Concepción.
- Valencia, G. (2008). Trazabilidad en las Mediciones de Opacidad. *Simposio de Metrología* (págs. 50-56). Santiago de Querétaro, México: Centro Nacional de Metrología.
- Vargas, C. (2011). *Efectos de la Fracción Gruesa (MP10-2.5) del Material Particulado sobre la salud humana. Revisión Bibliográfica*. Santiago: MINSAL.
- Vassilev, S., Baxter, D., & Andersen, L. (2009). An Overview fo the CHEMICAL Composition of Biomass. *Fuel*, 914-924.
- Wylen, G. J. (1985). *Fundamentals of Classical Thermodynamics 3rd Edition*.
- X. Xie, S., & Liao, D. (2001). Measurement error reduction using weighted average method for repeated measurement from heterogeneous instruments. *Environmetrics*, 785-790.

Capítulo 9. Anexos

9.1. Anexo A (Tablas resultados referentes a las mediciones del Ch-28)

Tabla 24: Resultados de temperaturas de humos en ducto de dilución, según Metodología Ch-28. (Elaboración propia)

Tiempo [min]	Estufa 1			Estufa 2			Cocina 1			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 10	Ensayo 11	Ensayo 12	Ensayo 13	
0	56	67	61	75	62	91	83	82	80	
10	61	76	77	83	63	89	77	74	68	
20	52	77	79	86	64	95	69	73	63	
30	49	72	75	74	61	88	64	70	59	
40	47	68	60	64	52	63	62	65	54	
50	47	66	52	58	46	55	59	61	51	
60	43	61	49	53	41	52	56	58	47	
70	42	56	46	50	39	51		47	53	
80	42	52	44	47	38					43
90	40	50	43	40	37					
100	39	49	42		37					
110	39	47	42							
120	38	45	41							
130	37	47	41							
132	38		41							
Tiempo Total [min]	132	125	139	83	96	65	57	66	80	

Tabla 25: Resultados de la carga de combustible utilizado en los ensayos. (Elaboración propia)

Carga	Estufa 1			Estufa 2			Cocina 1		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 10	Ensayo 11	Ensayo 12	Ensayo 13
Pre test [kg]	4.30	4.45	4.6	2.9	2.75	3.25	1.7	1.65	1.65
Test [kg]	4.65	4.65	4.65	3.4	3.75	3.75	1.90	2.00	1.85

Tabla 26: Resultados del porcentaje de humedad en base húmeda, del combustible Eucalyptus Globulus. (Elaboración propia)

	Muestra	Pre test Humedad [%]	Promedio Humedad [%]	Test Humedad [%]	Promedio Humedad [%]
Ensayo 1	N°1	14.20		15.06	
	N°2	14.16	13.95	14.86	15.23
	N°3	13.50		15.60	
Ensayo 2	N°1	14.50		15.33	
	N°2	14.80	14.52	15.60	15.44
	N°3	14.26		14.50	
Ensayo 3	N°1	13.50		14.46	
	N°2	14.26	13.97	14.70	14.81
	N°3	14.16		15.26	
Ensayo 6	N°1	14.00	13.06	14.10	13.98
	N°2	12.13		13.86	
	N°3	13.26		13.53	
Ensayo 7	N°2	13.70	13.48	14.30	14.11
	N°3	-		14.50	
	N°1	14.30		14.56	
Ensayo 10	N°2	14.13	14.21	14.50	14.67
	N°3	-		14.63	
	N°1	13.13	13.13	15.70	15.70
Ensayo 12	N°1	14.93	14.93	16.73	16.73
Ensayo 13	N°1	16.53	16.53	16.66	16.66

Tabla 27: Tabla de resultados de ensayos de Calorimetría Directa con Calorímetro. (Elaboración propia)

Muestras	Energía [MJ]	Masa [g]
N°1	18.84	0.5526
N°2	16.77	0.5439
N°3	18.26	0.5063
N°4	18.26	0.5100
N°5	18.26	0.5063
N°6	18.06	0.5537
N°7	17.47	0.5461
N°8	18.93	0.5048

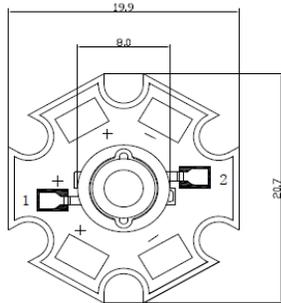
Tabla 28: Correlación de Voltaje emisor LED con Intensidad detectada por Fotodiodo. (Elaboración propia)

Regresión y progresión de datos de Foto-receptor					
[V]	I [lo]	[V]	[lo]	[V]	[lo]
2,6	-	4,3	8.184,6	6,0	16.398,7
2,6	227,1	4,3	8.441,3	6,0	16.655,4
2,7	483,8	4,4	8.698,0	6,1	16.912,1
2,7	740,5	4,4	8.954,7	6,2	17.168,8
2,9	1.425,0	4,5	9.211,3	6,2	17.425,5
2,9	1.430,0	4,6	9.468,0	6,3	17.682,2
2,9	1.422,0	4,6	9.724,7	6,3	17.938,9
2,9	1.470,0	4,7	9.981,4	6,4	18.195,6
2,9	1.472,0	4,7	10.238,1	6,4	18.452,3
2,9	1.473,0	4,8	10.494,8	6,5	18.709,0
3,3	3.156,0	4,8	10.751,5	6,5	18.965,7
3,3	3.152,0	4,9	11.008,2	6,6	19.222,3
3,3	3.158,0	4,9	11.264,9	6,6	19.479,0
3,3	3.580,0	5,0	11.521,6	6,7	19.735,7
3,3	3.590,0	5,0	11.778,3	6,7	19.992,4
3,3	3.580,0	5,1	12.035,0	6,8	20.249,1
3,4	4.077,5	5,1	12.291,7	6,9	20.505,8
3,5	4.334,2	5,2	12.548,3	6,9	20.762,5
3,5	4.590,9	5,2	12.805,0	7,0	21.019,2
3,6	4.847,6	5,3	13.061,7	7,0	21.275,9
3,6	5.104,3	5,4	13.318,4		
3,7	5.361,0	5,4	13.575,1		
3,7	5.617,7	5,5	13.831,8		
3,8	5.874,3	5,5	14.088,5		
3,9	6.131,0	5,6	14.345,2		
3,9	6.387,7	5,6	14.601,9		
4,0	6.644,4	5,7	14.858,6		
4,0	6.901,1	5,7	15.115,3		
4,1	7.157,8	5,8	15.372,0		
4,1	7.414,5	5,8	15.628,7		
4,2	7.671,2	5,9	15.885,3		
4,2	7.927,9	5,9	16.142,0		

9.2.Anexo B (Sistema Electrónico)

Tabla 29: Especificaciones técnicas del emisor de luz led HP5. (Fuente: Empresa DEMASLED SPA.)

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C) :



Items	Symbol	Absolute maximum Rating		Unit
		Blue/Green/White	Red/Yellow	
Power Dissipation *	P_D	5000	5000	mW
DC Forward Current	I_F	700	700	mA
Peak Pulse Forward Current*	I_{FP}	900	900	mA
Average Forward Current	I_{avg}	400	400	mA
Reverse Voltage	V_R	5	5	V
LED Junction Temperature	T_j	125	125	°C
Operating Temperature	T_{op}	-30 ~ +80	-30~+80	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +100	-40 ~ +100	°C
Soldering Temperature	T_{sol}	Max.180°C for 10 sec Max (4mm from the base of the lens)		

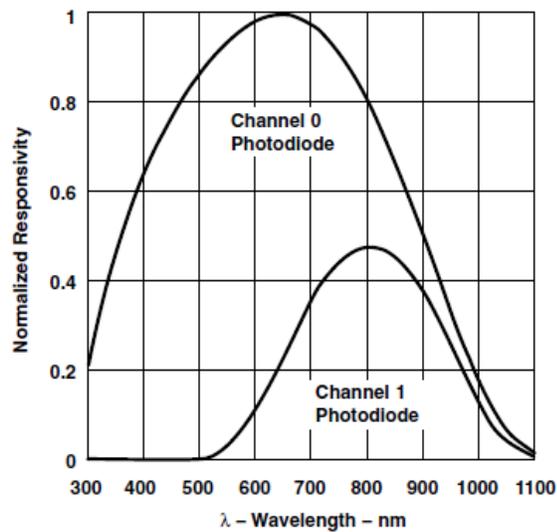


Figura 42: Especificaciones técnicas de receptor de luz Fotodiode TSL2561. (Fuente: Texas Advanced Optoelectronic Solution.)

9.2.1. Anexo C (Estadística e Incertidumbre)

Tabla 30: Valores de corrección de t para incertidumbre de repetibilidad. (Instituto Nacional de Normalización, 2017)

Número de observaciones n	t
2	1,84
3	1,32
4	1,20
5	1,14
6	1,11
7	1,09
8	1,08
9	1,07
10	1,06
100	1,005
∞	1,000