



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**Análisis de la influencia de la tasa de quemado en las emisiones de material particulado generadas por cocina a leña, utilizando un método óptico para medición de material particulado.**

POR

**Reinaldo Alberto Puentes Uribe**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Dr. Óscar Francisco Farías Fuentes  
Dr. Jorge Rodrigo Jiménez Del Río

Diciembre 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 Reinaldo Alberto Puentes Uribe

© 2024 Reinaldo Alberto Puentes Uribe

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

## Resumen

El presente estudio aborda la influencia de la tasa de quemado en las emisiones de material particulado generadas por cocinas a leña, empleando un método óptico basado en el sensor PMS5003 para la medición instantánea de dichas emisiones. Este trabajo se enmarca en la importancia de la biomasa como fuente energética renovable y su relevancia en Chile, donde la combustión de leña es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica. El enfoque experimental considera las características específicas de las cocinas a leña y busca proporcionar soluciones técnicas y modelos que optimicen su uso, minimizando el impacto ambiental.

Entre los objetivos alcanzados, se destaca el desarrollo y validación del método óptico para la medición de material particulado. La implementación del sensor PMS5003 permitió obtener datos en tiempo real, los cuales fueron comparados con el método isocinético convencional, mostrando una alta correlación entre ambos, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.97. Adicionalmente, se formuló un modelo adimensional para representar la tasa de quemado, estableciendo una relación directa con las emisiones de material particulado, lo que valida su aplicabilidad para diferentes configuraciones de operación de la cocina.

Los resultados experimentales demuestran que el tiraje medio proporciona mejores condiciones para una combustión eficiente y controlada en comparación con el tiraje abierto. En esta configuración, las emisiones de material particulado y monóxido de carbono (CO) son considerablemente menores, lo que optimiza el uso del combustible y reduce el impacto ambiental. El modelo propuesto mostró una excelente correlación con los datos experimentales, especialmente durante la fase de ignición, donde se obtuvo un error promedio del 6.96%. En el caso más desfavorable, correspondiente a la etapa de burnout, se registró un error promedio de 27.34%, lo que valida su capacidad para predecir de manera precisa el comportamiento de la combustión.

En conclusión, la configuración de tiraje medio es recomendada para operar la cocina Alcázar M-70, ya que minimiza las emisiones de material particulado y CO, al tiempo que mejora la eficiencia térmica del sistema. El desarrollo de herramientas como el método óptico y el modelo adimensional contribuye significativamente al diseño de soluciones más sostenibles, ofreciendo un enfoque técnico y práctico para mejorar la calidad del aire y el desempeño energético en el uso de cocinas a leña.

**Palabras claves:** Emisión de material particulado, Tasa de quemado, Sensor PMS5003, Cocina leña.

## ABSTRACT

This study investigates the influence of the burn rate on particulate matter emissions generated by wood-burning stoves, using an optical method based on the PMS5003 sensor for the real-time measurement of these emissions. The research emphasizes the importance of biomass as a renewable energy source and its relevance in Chile, where wood combustion is a significant source of atmospheric pollution. The experimental approach considers the specific characteristics of wood-burning stoves and aims to provide technical solutions and models to optimize their use, minimizing environmental impact.

Among the achieved objectives, the development and validation of the optical method for particulate matter measurement stands out. The implementation of the PMS5003 sensor allowed for real-time data collection, which were compared with the conventional isokinetic method, showing a high correlation between both methods, with a determination coefficient ( $R^2$ ) of 0.97. Additionally, a dimensionless model was developed to represent the burn rate, establishing a direct relationship with particulate matter emissions, thus validating its applicability for different stove operating configurations.

Experimental results show that the medium draft provides better conditions for efficient and controlled combustion compared to open draft. In this configuration, particulate matter and carbon monoxide (CO) emissions are significantly lower, optimizing fuel use and reducing environmental impact. The proposed model showed excellent correlation with the experimental data, especially during the ignition phase, where an average error of 6.96% was obtained. In the most unfavorable case, corresponding to the burnout stage, an average error of 27.34% was recorded, validating its ability to accurately predict combustion behavior.

In conclusion, the medium draft configuration is recommended for operating the Alcázar M-70 stove, as it minimizes particulate matter and CO emissions while improving thermal efficiency. The development of tools such as the optical method and the dimensionless model significantly contributes to the design of more sustainable solutions, offering a technical and practical approach to improve air quality and energy performance in the use of wood-burning stoves.

**Keywords:** Particulate matter emissions, Burn rate, PMS5003 sensor, Wood-burning stoves.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, a mi mamá y a mi papá, por su amor y enseñanza a lo largo de mi vida, por todas esas palabras de aliento y los mejores consejos que un padre puede dar a su hijo, y sobre todo por inculcarme valores y la confianza en Dios.

También quiero agradecer a mis increíbles hermanos Nacho y Nico, quienes estuvieron del día uno, brindándome cariño, apoyo, consejos, jornadas deportivas y sin duda, esas infaltables risas.

Extiendo mi agradecimiento a toda mi familia: a mis abuelos, seniors, tíos, tías y primos, quienes siempre estuvieron presentes, preocupándose y demostrando su cariño de una u otra forma.

Agradezco también a mi polola, Rosi, quien este año, sin dudarlo, fue fundamental. Me dio palabras de aliento, me acompañó y siempre me recordó que era capaz de lograr todo. Cada muestra de su cariño, desde una simple palabra hasta llevarme comida cuando tocaba estudiar por horas en la universidad.

Quiero agradecer a todos mis amigos y amigas: los del colegio, de la iglesia, de la universidad, los de Chillán, del voluntariado, y a todas las personas que, sin ser parte de mi familia, demostraron su cariño hacia mí, regalándome siempre buenos momentos.

Agradezco de manera especial a mis grupos de amigos, quienes han sido fundamentales en este proceso, brindándome momentos inolvidables. Entre ellos, destaco a los grupos de las Carreras de Tractores 2030, a los cabros de Planco, a los chiquillos de Chillán y el tridente de colegio. Su compañía siempre estuvo acompañada de risas y experiencias memorables, que han marcado una huella importante en mi recorrido.

Agradezco a la Universidad de Concepción por brindarme la oportunidad de crecer como persona y como futuro ingeniero. En particular, agradezco al profesor Óscar Farías, Roberto Menay, Jorge Jiménez y a los tíos del laboratorio, quienes fueron fundamentales en este proceso de mi memoria de título.

Por último, pero no menos importante, agradezco a Dios por darme sabiduría, paz y tranquilidad en cada momento.

Gracias a cada uno de ustedes por estar siempre presente.

## Tabla de Contenidos

1 CAPÍTULO 1: Introducción .....	1
1.1 Contexto .....	1
1.2 Estado del arte.....	4
1.2.1 Tasa de quemado: .....	4
1.2.2 Modelos de tasa de quemado.....	5
1.2.3 Material particulado.....	7
1.3 Hipótesis.....	8
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivos Generales.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9
1.5 Metodología.....	9
1.5.1 Método de ensayo .....	10
1.5.2 Cantidad de combustible para ensayo.....	11
1.5.3 Contenido de CO .....	12
1.5.4 Potencia térmica nominal y Rendimiento.....	12
1.5.5 Cálculo de material particulado.....	14
2 Capítulo 2: Análisis experimental .....	14
2.1 Descripción banco de ensayo.....	14
2.1.1 Cocina Alcázar M-70.....	15
2.1.2 Termo cañón.....	15
2.1.1 Precipitador electrostático .....	16
2.1.2 Tren de muestreo material particulado.....	17
2.2 Instrumentación.....	18
2.2.1 Instrumentación tasa de quemado.....	19
2.2.2 Instrumentación gases de combustión.....	20
2.2.3 Instrumentación de material particulado.....	21
2.2.4 Instrumentación de temperaturas y condiciones ambientales.....	22
2.3 Desarrollo sensor PMS5003 .....	22
2.3.1 Sensor PMS5003 .....	22

2.3.2 Calibración sensor PMS5003 .....	23
2.3.3 Sistema de adquisición de datos. ....	25
2.4 Descripción ensayos. ....	26
3 Análisis de resultados. ....	28
3.1 Modelo Tasa de quemado.....	29
3.1.1 Formulación del modelo. ....	29
3.1.2 Resultados del modelo .....	30
3.1.3 Influencia del tiraje en el modelo .....	32
3.1.4 Estimación del error.....	33
3.2 Análisis de temperaturas.....	34
3.3 Análisis de emisiones. ....	35
3.3.1 Comparación método isocinético y óptico.....	35
3.3.2 Comparación de emisiones.....	37
4 Conclusión .....	40
Referencias.....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de emisiones de contaminantes, estimadas según tipo de fuente emisora (Ton/año) para Concepción metropolitana. (Fuente: Sistema de monitoreo de consumo de leña. Santiago 2020) [5] .....	3
Tabla 2: Características cocina Alcázar M-80 .....	15
Tabla 3: Datos del banco de ensayo y las variables medidas .....	19
Tabla 4: Contantes para la ecuación de modelación de material particulado bajo el efecto de humedad. ....	24
Tabla 5: Pines del sensor PMS5003 .....	25
Tabla 6: Configuraciones y resultados. ....	28
Tabla 7: Resultados de la regresión lineal para cada curva de ensayo .....	31
Tabla 8: Coeficientes del modelo de regresión lineal para cada etapa de combustión. ....	32
Tabla 9: porcentaje de error para cada etapa de quemado con su respectivo tiraje. ....	33
Tabla 10: Mediciones de material particulado (MP) mediante métodos isocinético y óptico. ....	36
Tabla 11: Anexo 2 - Especificaciones técnicas sensor PMS5003.....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico evolución de la aportación energética primaria de la biomasa. (Fuente: CNE 2015-2022).....	1
Figura 2: Gráfico aportación energética de cada biomasa. (Fuente: BNE 2022 y FAOSTAT [3].)....	2
Figura 3: Influencia entre el flujo de calor, densidad y espesor para la tasa de quemado. (Fuente: [12]) .....	4
Figura 4: Esquema de conversión adimensional .....	5
Figura 5: Modelo de Nicolás Aguilera, comparación tasa de quemado modelada y real. ....	6
Figura 6: Composición química del PM10 en la ciudad de Chillán. (Fuente: Air pollution in a middle-size city: the case of Chillán (Chile)) .....	7
Figura 7: Gráfico comparación entre emisiones de MP2,5 en ensayos de laboratorio y en terreno. (Fuente: [17]) .....	8
Figura 8: Metodología con sus respectivos objetivos y actividades. ....	10
Figura 9: Esquema de conexión hidráulica para la cocina y recuperador de calor. ( Fuente:Amesti)	11
Figura 10: Principales componentes cocina Alcázar M-80. ....	15
Figura 11: Termo cañón de tres pasos .....	16
Figura 12: Medidas termo cañón.....	16
Figura 13: MPZERO instalado en el cañón. ....	17
Figura 14: Esquema del tren de muestreo. (Fuente: [24]) .....	18
Figura 15: Balanza tipo plataforma. ....	19
Figura 16: Marcador digital. ....	20
Figura 17: Medidor de humedad. ....	20
Figura 18: TESTO 350 .....	21
Figura 19: Balanza gravimétrica. ....	21
Figura 20: Tren isocinético de método 5 G. (Fuente: CleanAir) .....	22
Figura 21: Sensor PMS5003. (Fuente: Plantower Technology [23]) .....	23
Figura 22: Datos Experimentales bajo condiciones controladas. (Fuente: [11]) .....	24
Figura 23: Factor de corrección aplicable a PM1.0, PM2.5, PM10.0, según porcentaje de humedad. ....	25
Figura 24: Montaje circuito Arduino - PMS5003. ....	26
Figura 25: Comparación masa y emisiones de CO en el tiempo para ensayo de tiraje abierto .....	29
Figura 26: Comportamiento masa y emisiones de CO para ensayo de tiraje medio .....	30
Figura 27: Comparación del modelo de la tasa de quemado con el ensayo TA-1 en tiraje abierto. ...	31
Figura 28. Comparación del modelo de la tasa de quemado con el ensayo TM-4 en tiraje medio ...	32
Figura 29: Comparación modelos para cada tiraje. ....	33
Figura 30: Comparación de las temperaturas en la entrada del recuperador de calor. ....	34
Figura 31: Comparación de las temperaturas en la salida del recuperador de calor. ....	34
Figura 32: Condensado recolectado en un día de ensayos de tiraje medio. ....	35
Figura 33: Comparación de resultados del método óptico con el isocinético.....	37
Figura 33: Comparación de emisión de material particulado en tiraje medio y abierto.....	37
Figura 34: Emisiones de CO para tiraje medio y abierto .....	38

## CAPÍTULO 1: Introducción

### 1.1 Contexto

La biomasa forestal o leña, considerada la primera fuente de energía utilizada por la humanidad, sigue siendo relevante en la actualidad como la fuente de energía renovable más significativa, representando aproximadamente el 6% del suministro global de energía primaria. Según el informe Perspectivas del sector forestal mundial 2050 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se prevé que el consumo global de madera como combustible aumente entre un 11% y un 42% para el año 2050. Actualmente, más de 2 mil millones de personas, especialmente en países en desarrollo, dependen de la madera para cocinar y calentar sus hogares, siendo para muchos la única fuente de energía disponible y asequible [1].

En Chile, según datos de la Comisión Nacional de Energía [2], la evolución energética de la biomasa forestal, que incluye la madera, ha mostrado una notable estabilización. A partir del año 2018, se observa un crecimiento significativo en el uso de la madera en los sectores comercial, público y residencial, como se puede apreciar en la Figura 1.

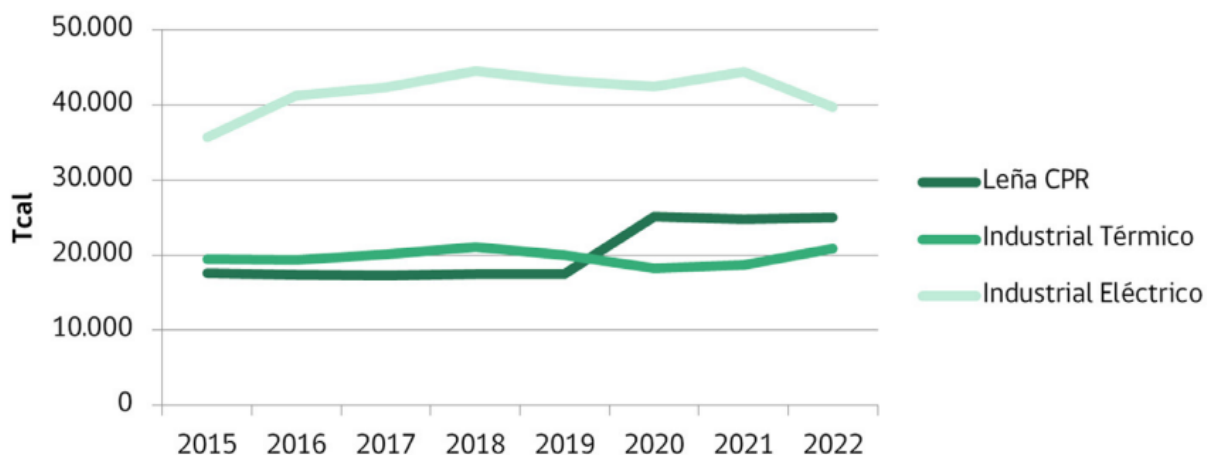


Figura 1: Gráfico evolución de la aportación energética primaria de la biomasa. (Fuente: CNE 2015-2022)

Como se muestra en la figura 2, la leña es la segunda biomasa más utilizada en Chile. Según un estudio realizado por la Unidad de Dendroenergía de la Gerencia de Conservación de Ecosistemas Boscosos y Xerofíticos del Ministerio de Agricultura [2], el consumo anual de leña en el país asciende a 19 millones de m<sup>3</sup>, siendo utilizada principalmente para calefacción, cocción de alimentos, agua caliente sanitaria y secado de ropa.

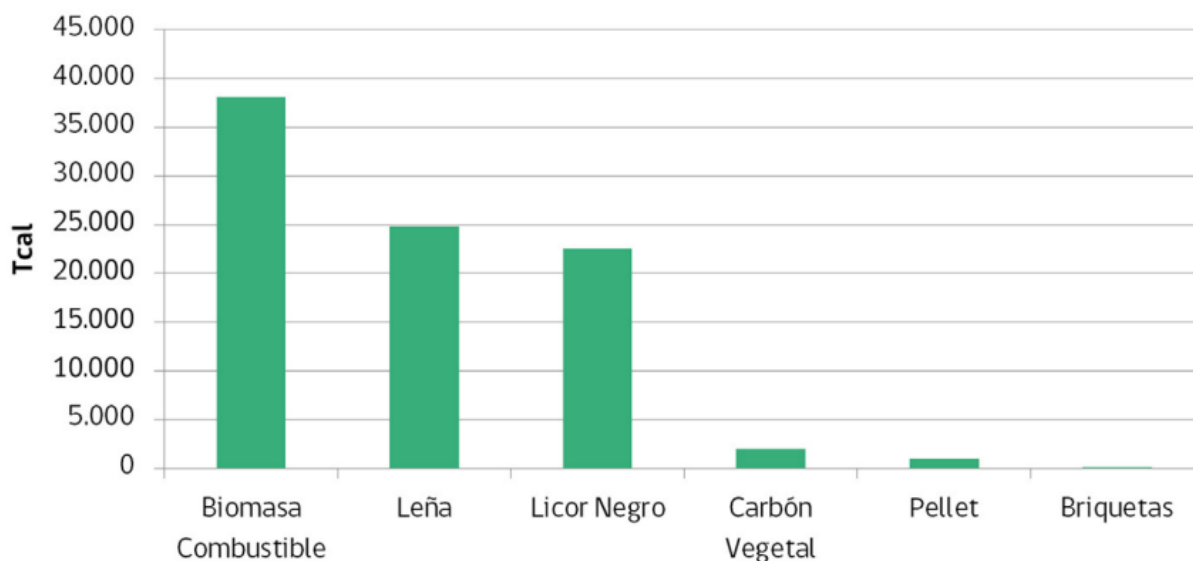


Figura 2: Gráfico aportación energética de cada biomasa. (Fuente: BNE 2022 y FAOSTAT [3].)

La combustión de leña en Chile plantea importantes desafíos relacionados con la contaminación atmosférica, especialmente debido a la emisión de material particulado (MP). Este material se clasifica según su tamaño, incluyendo partículas gruesas (MP10), finas (MP2,5), y ultrafinas (MP1), entre otras. El material particulado fino, particularmente perjudicial para la salud humana [3], sigue siendo emitido principalmente por la combustión residencial de leña. De hecho, según el informe RETC del Ministerio del Medio Ambiente [4], esta fuente representa aproximadamente el 70% de todas las emisiones de MP2,5 en Chile, con una mayor concentración en las regiones del centro y sur del país. En la Tabla 1 se presentan las emisiones anuales para la ciudad de Concepción.

Tabla 1 Resumen de emisiones de contaminantes, estimadas según tipo de fuente emisora (Ton/año) para Concepción metropolitana.  
(Fuente: Sistema de monitoreo de consumo de leña. Santiago 2020) [5]

Fuentes	Emisión Ton/año						
	MP10	MP2,5	SOx	NOx	CO	COVs	NH3
Puntuales	3244	2740	5479	4623	93700	2307	-
Combustión residencial de leña	3056	2847	18	627	59590	34451	1077
Móviles	319	287	551	10142	20404		96
Otras de área	673	16	104	139	9045	59	550
Quemas e incendios forestales	114	99	1106	36	22	10	-
Polvo resuspendido	2485	356	-	-	-	-	-
<b>Total de emisiones</b>	<b>9891</b>	<b>6345</b>	<b>7258</b>	<b>15567</b>	<b>182761</b>	<b>36827</b>	<b>1723</b>

Durante la combustión, varios factores influyen directamente en la emisión de material particulado, entre ellos el tipo de combustible y las condiciones de combustión, como la temperatura, el exceso de aire y la tasa de quemado. Es fundamental considerar las diferentes etapas de la combustión, como la fase de pirólisis, en la cual, a medida que aumenta la temperatura, el combustible se descompone en compuestos más simples, liberando gases volátiles como metano, monóxido de carbono y otros hidrocarburos. Otra fase clave es la combustión de volátiles, donde, con el incremento de la temperatura, estos se queman en presencia de oxígeno. Estas fases y condiciones serán analizadas en detalle más adelante.

Unas de las tecnologías empleadas para reducir las emisiones de material particulado originadas por la combustión de leña es el precipitador electrostático. Esta tecnología ha sido implementada en algunas ciudades del sur de Chile y está siendo evaluada por investigadores del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), en colaboración con la Universidad Austral, la Universidad de Aysén, la Seremi de Medio Ambiente, y con apoyo financiero del Gobierno Regional de Aysén. El objetivo de este estudio es implementar y evaluar el desempeño técnico, ambiental y social de los precipitadores electrostáticos en cocinas residenciales en la ciudad de Coyhaique. A partir de esta evaluación, se busca determinar su eficacia y estimar el impacto de una posible masificación de estos filtros en la reducción de emisiones de material particulado en la ciudad [6].

El funcionamiento del precipitador electrostático se basa en la captura del material particulado antes de que este sea liberado a la atmósfera. Cuando los gases de combustión ingresan al precipitador, pasan a través de una sección de ionización donde se les aplica un campo eléctrico. Este campo ioniza las partículas, otorgándoles una carga negativa. Posteriormente, las partículas cargadas son atraídas hacia placas colectoras que tienen una polaridad opuesta, adhiriéndose a ellas. Con el tiempo, estas placas deben ser limpiadas para evitar que el dispositivo se deteriore y mantener su eficacia operativa.

Otro tipo de tecnología utilizada a nivel mundial para reducir las emisiones de material particulado son los catalizadores [7] [8]. Estos dispositivos pueden disminuir las emisiones en un 60% al promover reacciones químicas que aceleran los procesos de oxidación y reducción. De este modo, los catalizadores transforman los contaminantes en productos menos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana.

En esta ocasión, a diferencia del semestre anterior en el cual se hizo un análisis del material particulado de la misma cocina a leña [9], se realizaron ensayos en esta cocina utilizando el termo cañón y el

precipitador electrostático, se implementará un dispositivo óptico para la medición instantánea de material particulado. Este dispositivo, que fue utilizado previamente en el proyecto de Gutiérrez [10], emplea el sensor de contaminación atmosférica PMS5003, fabricado por Plantower.

Considerando la importancia de la leña tanto a nivel mundial como en Chile, y el impacto directo de su combustión en el medio ambiente y la salud de las personas, resulta crucial abordar el problema ambiental que representa si no se controla adecuadamente. En este contexto, la presente investigación propone un análisis de cómo la tasa de quemado afecta directamente la emisión de material particulado en una cocina a leña.

Como parte de las configuraciones experimentales, se utilizará un precipitador electrostático y un recuperador de calor. Este último se propone como una opción para alimentar sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), aprovechando el calor residual de los gases emitidos por la cocina. Para la medición instantánea del material particulado, se empleará un dispositivo óptico, lo que permitirá establecer una correlación entre la tasa de quemado y las emisiones de material particulado.

## 1.2 Estado del arte.

En este capítulo, se abordarán temas esenciales para este informe, como la tasa de quemado, el material particulado y las investigaciones realizadas en torno a estos aspectos. Además, se discutirá la utilidad de los sensores y los recopiladores de datos en el contexto de este estudio.

### 1.2.1 Tasa de quemado:

La tasa de quemado en los equipos residenciales de combustión, como el que se analizará en este informe, se define como el consumo de masa de leña en un período de tiempo determinado. Sin embargo, esta tasa se ve influenciada por diversos factores, como el tipo de leña, el contenido de humedad, la cantidad de aire disponible, el peso de las astillas y la temperatura.

En un estudio [11] realizado para evaluar el comportamiento de la tasa de quemado, se presentan varios de estos factores en la figura 3. Este estudio demuestra cómo el flujo de calor, la densidad y el grosor de la madera afectan directamente la tasa de quemado, manteniendo las mismas condiciones experimentales.

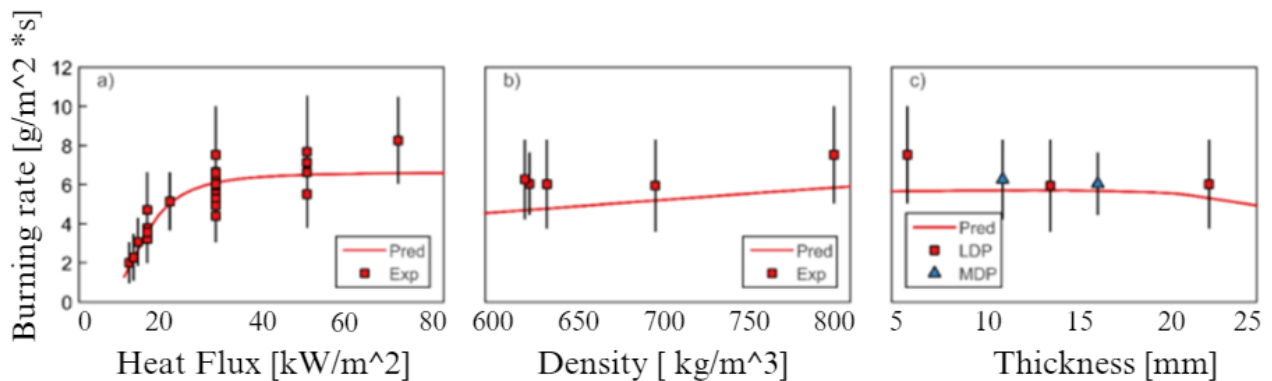


Figura 3: Influencia entre el flujo de calor, densidad y espesor para la tasa de quemado. (Fuente: [12])

### 1.2.2 Modelos de tasa de quemado.

Un modelo de tasa de quemado permite analizar la combustión de leña en este caso, maximizando la eficiencia energética y reduciendo emisiones contaminantes. Permite ajustar los sistemas de combustión para evitar ineficiencias y combustiones incompletas que incrementan la contaminación. Su aplicación es clave para la sostenibilidad energética y la mejora de la calidad del aire.

Un estudio realizado en la Universidad de Concepción por Nicolás Aguilera en 2023 [12], en su memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, se enfoca en la modelación de la tasa de quemado. Este estudio analiza cada etapa de la combustión de manera individual, centrándose en las tres fases de esta, y evalúa el cambio en la emisión de monóxido de carbono durante cada una de estas etapas.

Para la formulación del modelo, se realizaron a cabo ensayos con diversos ajustes en la cocina a leña, seleccionando aquellos ensayos más representativos. Se realizó una regresión lineal para cada etapa de la combustión. En la figura 4 se presenta un esquema de cómo se llevó a cabo la conversión adimensional para cada etapa.

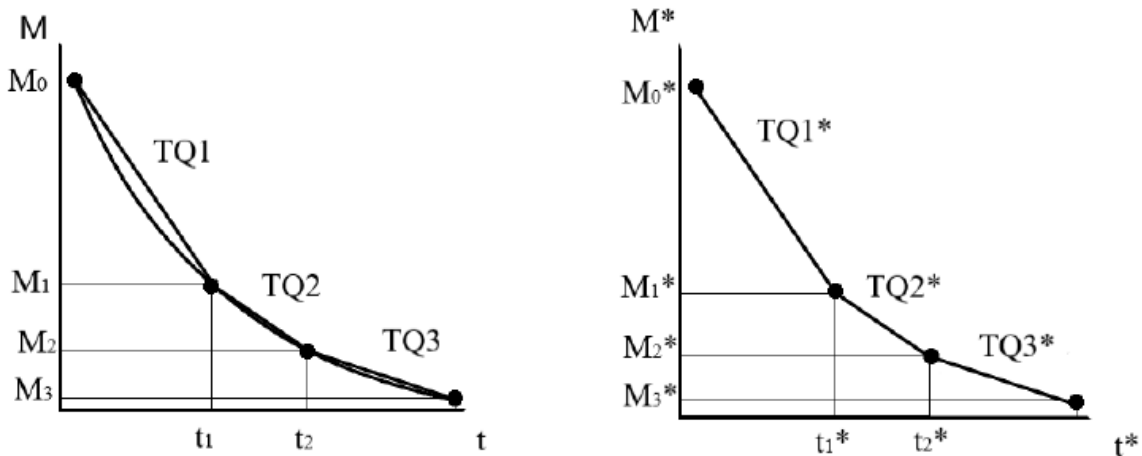


Figura 4: Esquema de conversión adimensional

Donde la relación de la tasa de quemado y el factor de conversión para pasar de la tasa de quemado adimensional a dimensional está en la siguiente ecuación:

$$TQ_n = \frac{(M_n^* - M_{n-1}^*)}{(t_n^* - t_{n-1}^*)} * \frac{M_T}{t_T}$$

Donde  $TQ_n$ , siendo  $n=1, 2$  o  $3$ , son las tasas de quemado para cada etapa de la combustión.

Posteriormente obtiene los resultados de la regresión para el modelo y se implementa a un modelo en el software ESS, dejando como variable de entrada el tipo del cañón, el tiraje y la masa total de la leña. En la figura 5 se muestra un ejemplo de su modelo en comparación con una tasa de quemado real.

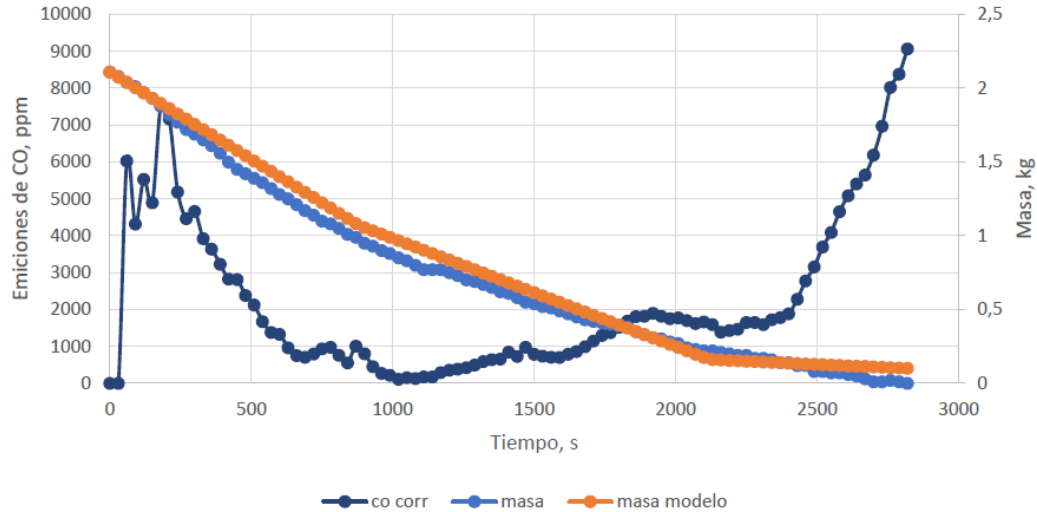


Figura 5: Modelo de Nicolás Aguilera, comparación tasa de quemado modelada y real.

En otro estudio que presenta un modelo matemático de la pirolisis de la madera [13], se centra en describir los procesos físicos que ocurren durante la combustión de la madera. Este modelo incluye aspectos como la conducción térmica, la convección interna de volátiles, la endotermicidad y diversas propiedades relacionadas. La ecuación principal del modelo se describe a continuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha * \nabla^2 + Q$$

Donde:

- T es la temperatura.
- $\alpha$  es la difusividad térmica.
- Q representa los términos de generación de calor, que incluyen la contribución de la descomposición endotérmica y la convección de volátiles.

Dentro de las simplificaciones realizadas en este estudio, se incluyen una geometría simplificada, una única reacción de descomposición, propiedades de materiales constantes, omisión de la convección externa y condiciones de frontera simplificadas. Entre las conclusiones de este estudio se destacan el impacto de la conductividad de la madera, la endotermicidad y la convección interna. Sin embargo, aunque se hayan obtenido resultados cualitativos, se enfatiza la necesidad de realizar comparaciones con datos experimentales para validar el modelo.

Existen numerosos estudios que modelan la tasa de quemado utilizando diversas herramientas, como se mencionó anteriormente. Estos incluyen la dinámica de fluidos computacional (CFD) [14], modelos térmicos de velocidad de combustión de la madera [15] y modelos de tasa de quemado de combustibles de madera de gran tamaño [16], entre otros. Sin embargo, cada uno de estos enfoques presenta diferencias en su metodología para alcanzar el mismo objetivo: modelar de manera precisa la tasa de quemado. Al considerar estos estudios, se pueden identificar las variables determinantes a la hora de decidir si simplificar o no una variable en el modelo.

### 1.2.3 Material particulado.

El material particulado se refiere a una mezcla de partículas sólidas o líquidas que puede generarse como resultado de la combustión de leña. La composición química del material particulado en el aire ha sido analizada en diversos estudios, como el realizado en la ciudad de Chillán [17], un lugar donde la combustión de leña es frecuente, especialmente durante los periodos de invierno. En la figura 6 se presenta la composición del aire para dicha ciudad, evidenciando el impacto de esta fuente de contaminación.

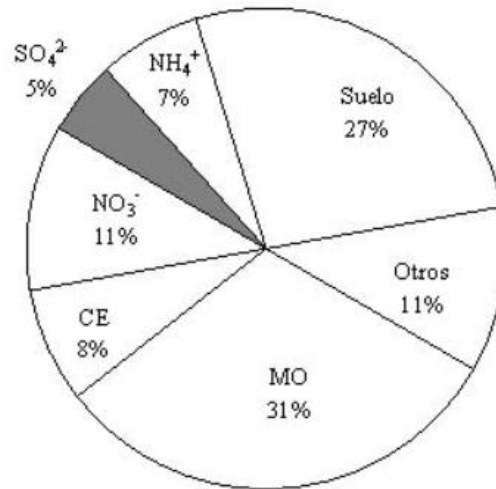


Figura 6: Composición química del PM10 en la ciudad de Chillán. (Fuente: Air pollution in a middle-size city: the case of Chillán (Chile))

Las especies de madera tienen diferentes proporciones de hemicelulosa, lignina y celulosa, y estas tienen diferentes velocidades de reacción y pueden producir contaminantes del aire en diferentes niveles, hay un estudio en la Universidad de Concepción [18] que respalda esto, para diferentes tipos de maderas hay variación en la emisión de material particulado teniendo las mismas condiciones, en este estudio se hace el análisis con madera seca de Eucalipto, Roble y Acacio Dealbata, uno de los puntos que señala es que el promedio de factores de emisión de material particulado fue de 2,03, 4,06 y 3,84 g/kg respectivamente. En otro estudio [19] se informó que, tanto en estufas como en chimeneas, la combustión de madera de Eucalipto produjo mayores emisiones que la madera de pino en estufas, para PM10 fueron de  $7,61 \pm 2,46$  g/kg para el eucalipto y de  $4,74 \pm 2,36$  g/kg para la madera de pino. Y para CO en la chimenea fueron de  $94,47 \pm 0,71$  g/kg para el eucalipto y de  $62,56 \pm 4,90$  g/kg para la madera de pino. Demostrando la relevancia incluso del tipo de madera que se ocupará.

Otro factor que considerar es el tamaño del combustible, el cual puede influir en las emisiones durante la combustión. En un estudio realizado [20], se demostró que en la combustión de troncos más pequeños generaba material particulado fino (PM2.5) 4.8 veces mayor en comparación con la combustión de troncos más grandes. Además, las emisiones de monóxido de carbono (CO) eran aproximadamente 2,3 veces más elevadas cuando se utilizaban troncos de menor tamaño.

Otro aspecto que no se discute con frecuencia es la influencia de la manipulación del operador durante las pruebas y/o el uso cotidiano en equipos residenciales. La adición de combustible en

estufas y cocinas a leña afecta la combustión, y esta alteración depende en parte de la cantidad de masa agregada, la frecuencia de recarga y la forma en que se introduce el combustible. Por lo tanto, es posible deducir que existe una diferencia significativa en las emisiones de una cocina a leña entre las pruebas realizadas en laboratorio y el uso real en el día a día. En las pruebas de laboratorio, el proceso se lleva a cabo con cuidado, siguiendo protocolos y normas específicas, mientras que, en el uso cotidiano, la recarga de leña tiende a ser más irregular.

Un estudio [21] que comparó pruebas de laboratorio y de campo verificó esta diferencia, encontrando que las emisiones de PM<sub>2.5</sub> fueron hasta un 70% más bajas en las pruebas de laboratorio sin recarga de combustible, en comparación con 16 pruebas de campo. En la figura 7 se presenta una comparación de las emisiones de material particulado en las diferentes fases de los ensayos, lo que refuerza la discrepancia entre los entornos controlados y el uso real de estos equipos.

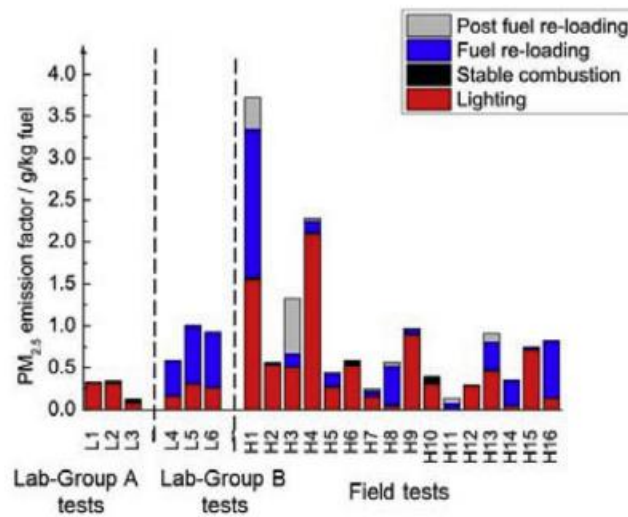


Figura 7: Gráfico comparación entre emisiones de MP<sub>2,5</sub> en ensayos de laboratorio y en terreno. (Fuente: [17])

La relevancia de estos factores se encuentra en su influencia sobre las emisiones de material particulado, a aspectos específicos como el tipo y tamaño del combustible, así como su manipulación. Comprender y controlar estas variables es fundamental para el objetivo de este informe, ya que permitirá obtener una aproximación más precisa sobre cómo la tasa de quemado impacta en la emisión.

### 1.3 Hipótesis.

La hipótesis plantea que se desarrollará un modelo basado en datos empíricos que proporcionará una aproximación de la relación entre la tasa de quemado y la emisión de material particulado. Se espera que el error de esta aproximación sea inferior al 10%. Este modelo podrá ser utilizado en el futuro para diversas aplicaciones, como soluciones técnicas, modelos computacionales, y la simplificación de cálculos.

## **1.4 Objetivos.**

### **1.4.1 Objetivos Generales.**

Analizar en forma experimental las relaciones entre formación de material particulado y tasa de quemado en una cocina a leña, utilizando un método óptico para medición de material particulado.

### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

1. Desarrollar una metodología con el método óptico para analizar la evolución del material particulado y correlacionarlo con la tasa de quemado.
2. Analizar la evolución de material particulado para cada etapa del proceso de combustión en la cocina a leña.
3. Formular un modelo adimensional que sea capaz de representar la tasa de quemado y buscar una relación con la emisión de material particulado para la cocina a leña.
4. Validar el modelo mediante la comparación con datos experimentales para diferentes condiciones de operaciones de la cocina.

## **1.5 Metodología.**

La metodología empieza con una búsqueda de literatura académica y técnica. Esta revisión bibliográfica constituye el punto de partida fundamental para tener un contexto actual, comprender teorías, análisis y nuevos descubrimientos acorde al tema. Esta etapa fundamental de la metodología permitirá establecer una base sólida de conocimiento que será de suma importancia en el momento de toma de muestras y decisiones.

Posteriormente se hace un análisis experimental para medir diversas variables como. Temperaturas, flujos, entre otros. Es importante que este muestreo sea con suma precaución debido a que cualquier alteración o mal toma de datos puede significar un resultado erróneo o una pérdida de tiempo.

En la Figura 8 se presenta la metodología de esta investigación, que se centra en el desarrollo y validación de un modelo adimensional para relacionar la tasa de quemado con la emisión de material particulado en una cocina a leña. El proceso comienza con la implementación de un método óptico para analizar el material particulado, seguido de la ejecución y verificación de ensayos que permitan comprender su evolución durante la combustión. Posteriormente, se formulará el modelo utilizando software, como Excel y/o ESS, para establecer la correlación entre estos factores. Finalmente, el modelo se validará comparando sus resultados con datos experimentales obtenidos bajo diferentes condiciones operativas, realizando los ajustes necesarios para garantizar su precisión.

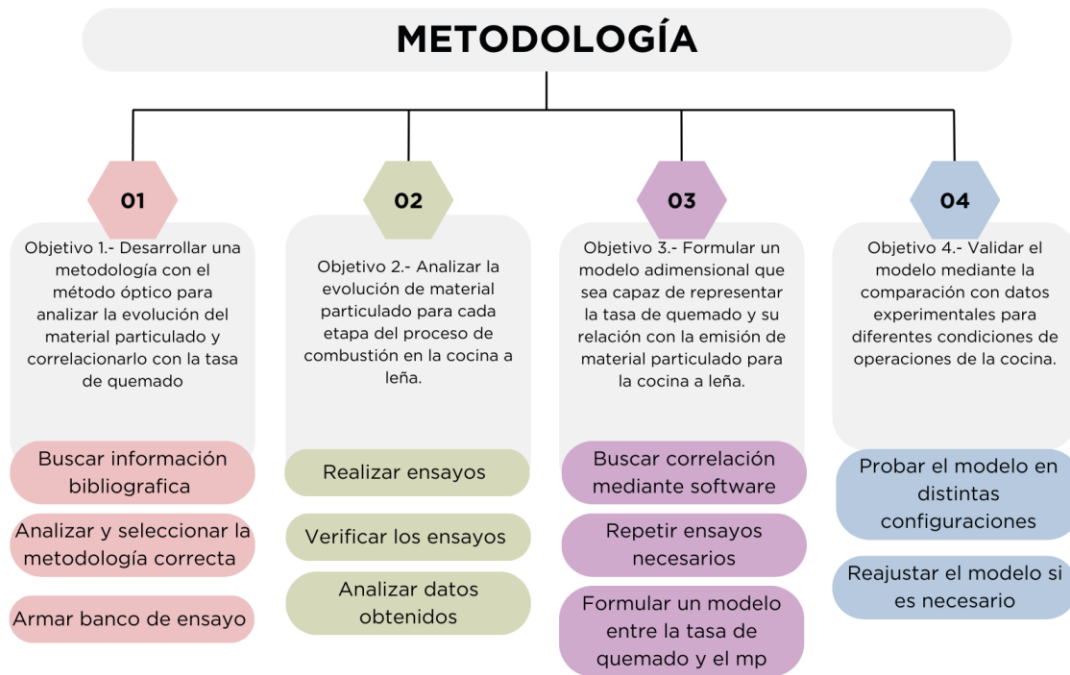


Figura 8: Metodología con sus respectivos objetivos y actividades.

### 1.5.1 Método de ensayo

En la figura 9 se presenta el banco de ensayo mediante un esquema que muestra una conexión hidráulica entre la cocina a leña y un sistema de termo cañón para la generación de agua caliente sanitaria. El termo cañón (1) está conectado a la salida de humos (3) de la cocina a leña (2), lo que permite aprovechar el calor residual para calentar agua. El agua fría entra al sistema a través de un flexible (7). Una vez calentada, el agua caliente sale a través de otro flexible (9) y se dirige a diferentes puntos de consumo, como un lavaplatos (12).

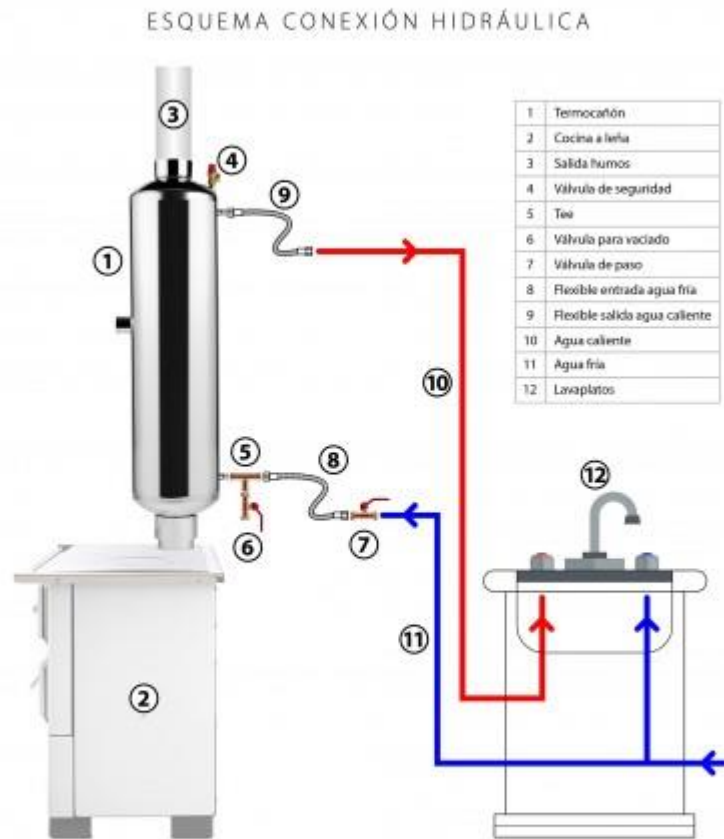


Figura 9: Esquema de conexión hidráulica para la cocina y recuperador de calor. ( Fuente:Amesti)

Dentro de la normativa chilena que se ocupará para la NCH 3173 “Protocolo de análisis y/o ensayos de seguridad de producto de leña y otros dendroenergéticos.”, NCH 28 “Determinación de material particulado y certificación y auditoria de calefactores a leña.”, NCH 5G “Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución.”. Por otra parte, para el cálculo de error se utilizará el software ESS y/o Excel para una mayor exactitud.

### 1.5.2 Cantidad de combustible para ensayo

Según la norma NCh 3173 [22] , la cantidad de combustible necesaria para cada ensayo se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$B_{fl} = 360000 * \frac{P_n * t_b}{H_u * \eta}$$

Donde:

- $B_{ft}$ : Masa de la carga del combustible, expresada en kilogramos [kg]
- $P_n$ : Potencia térmica nominal, expresada en kilowatt [kW]
- $t_b$ : Intervalo mínimo de recarga, expresada en hora [h]
- $H_u$ : Poder calorífico inferior del combustible de ensayo [kJ/kg]
- $\eta$ : Rendimiento mínimo de acuerdo con esta norma para artefactos (debe ser mayor a 70%)

### 1.5.3 Contenido de CO

Según la NCh 3173 [22] el contenido de CO se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de CO} = \text{CO}_{\text{med}} * \frac{21 - \text{O}_{2\text{nomrlizado}}}{21 - \text{O}_{2\text{med}}}$$

$$\text{Contenido de CO} = \text{CO}_{\text{med}} * \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_{2\text{med}}} * \frac{21 - \text{O}_{2\text{nomrlizado}}}{21}$$

Donde:

- $\text{CO}_{\text{med}}$ : Valor medio del monóxido de carbono calculados de todos los datos CO procedentes de las lecturas de instrumento en  $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ .
- $\text{O}_{2\text{nomrlizado}}$ : Contenido de oxígeno normalizado, aproximadamente un 13%.

Para calcular el término  $\text{CO}_{2\text{max}}$  se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{CO}_{2\text{max}} = \frac{1}{1 + m_s + A * \left(\frac{79}{21}\right)} * 100$$

Para el cálculo de  $m_s$  y A estará dada por la siguiente fórmula:

$$A = 1 + 3 * \frac{h}{c} + \frac{3o + 3s}{8c}$$

$$m_s = \frac{3s}{8c}$$

Donde:

- C: Contenido en carbono del combustible.
- h: Contenido de hidrogeno del combustible.
- o: Contenido de oxígeno del combustible.
- s: Contenido de azufre del combustible.

### 1.5.4 Potencia térmica nominal y Rendimiento.

Según la NCh 3173 [22], la potencia térmica total se debe calcular a partir de la masa del combustible quemado por hora, el poder calorífico y el rendimiento, obteniendo la siguiente fórmula.

$$P = \frac{\eta * B * H_u}{3,6 * 10^5}$$

Donde:

- $\eta$ : Rendimiento.
- $B$ : Masa de combustible de ensayo quemada cada hora.
- $H_u$ : Poder calorífico inferior del combustible de ensayo.

En donde el rendimiento del equipo estará dado por las siguientes ecuaciones.

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r)$$

En el cual  $q_a$ ,  $q_b$  y  $q_r$  están netamente relacionadas con las pérdidas de calor sensible de los humos, pérdidas de calor latente de los humos y las pérdidas de calor debido a los sólidos no quemados respectivamente. Siendo estos términos las siguientes formulas:

$$q_a = 100 * \frac{Q_a}{H_u}$$

$$Q_a = (t_a - t_r) * \left[ \frac{C_{pmd} * (C - C_r)}{0,536 * (CO + CO_2)} + \frac{C_{pmH_2O} * 1,92 * (9H + W)}{100} \right]$$

$$q_b = 100 * \frac{Q_b}{H_u}$$

$$Q_b = \frac{12644 * CO * (C - C_r)}{53,6 * (CO_2 + CO)}$$

$$q_r = 100 * \frac{Q_r}{H_u}$$

$$Q_r = 3,35 * b * R$$

Donde:

- $b$ : Constituyentes combustibles en residuo con respecto a la masa de material residual, en % de masa.
- $C$ : Contenido de carbono del combustible, en % de masa.
- $C_{pmd}$ : Calor específicos de los humos secos en condiciones estándar, en  $\frac{KJ}{K * m^3}$ .
- $C_r$ : Contenido de carbono de los residuos con respecto a la cantidad de combustible, % en masa.  $C_r = 0,01 * R * b$ .
- $CO$ : Contenido de monóxido de carbono en los humos secos.
- $CO_2$ : Contenido de dióxido de carbono en los humos secos.
- $H$ : Contenido del hidrogeno del combustible, en % de masa.
- $H_u$ : Poder calorífico inferior del combustible, en  $\frac{KJ}{kg}$ .
- $R$ : Residuo que pasa a través de la parrilla, con respecto a la masa de combustible, en % de masa.
- $t_a$ : Temperatura de los humos.
- $t_r$ : Temperatura ambiente.
- $W$ : Contenido de humedad del combustible.

### **1.5.5 Cálculo de material particulado.**

Como se mencionó previamente, para la medición de material particulado (PM) se utilizó el sensor PMS5003, el cual estará conectado a un Arduino UNO para la extracción de datos. La organización y el almacenamiento de los datos en el computador se realizó mediante el uso del programa RealTerm, que es una herramienta eficaz para la captura y el ordenamiento de la información proveniente del sensor.

Además, el sensor será calibrado siguiendo el procedimiento descrito por Gutiérrez (2016) [10], el cual consiste en la comparación de los datos de humedad relativa y temperatura ambiente con un caso base previamente establecido. Esta calibración es fundamental para asegurar la precisión de las mediciones del sensor en diferentes condiciones ambientales.

Finalmente, se realizó la configuración del sistema de medición óptico. El sensor PMS5003 se conectará al Arduino mediante cables Dupont, mientras que la comunicación entre el Arduino y el computador se llevará a cabo a través de un cable USB. Estos detalles serán ilustrados en secciones posteriores.

Por otra parte, también se tomó mediciones de material particulado con el tren isocinético el cual es un método utilizado para medir las concentraciones durante el ensayo, asegurando que la velocidad de la muestra tomada sea igual a la velocidad del flujo de gases de combustión en el punto de muestreo. Esto permite obtener una representación precisa de la concentración de contaminantes sin alterar la dinámica del flujo. Todos los equipos, instrumentos y cálculos están basados en el método CH-5 G [23]

## **Capítulo 2: Análisis experimental**

### **2.1 Descripción banco de ensayo.**

El banco de ensayo comienza en la cocina a leña, donde, una vez iniciada la combustión, los gases generados pasan a través del termo cañón de tres pasos, equipado con termocuplas y sensores de medición. Este dispositivo aprovecha el calor de los gases para calentar agua caliente sanitaria (ACS). Tras el intercambio de calor por radiación y convección con el agua, los gases son dirigidos a un precipitador electrostático que emite una descarga eléctrica para ionizar las partículas, atrapándolas de manera efectiva. Posteriormente, los gases de combustión son expulsados al tren de muestreo de material particulado. En este ducto parte de los gases pasan por una sonda de muestreo, que contiene un filtro de fibra de vidrio en el que se impregna el material particulado, permitiendo su pesaje tras el ensayo. Además, está instalado el sensor óptico PMS5003, que proporciona de forma instantánea los valores de material particulado. Ambas técnicas se complementan para lograr un muestreo de datos más preciso. A continuación, se presentan los principales equipos en donde se produce la combustión y circulan los gases de esta.

### 2.1.1 Cocina Alcázar M-70

La cocina a leña utilizada en este ensayo es de uso doméstico y cuenta con una cámara de combustión de 2023 cm<sup>3</sup>, un horno que alcanza hasta 300 °C, una superficie de cocción de 200 cm<sup>2</sup> y una salida de humos. Específicamente, se empleó una cocina Alcázar M-70, que incluye platillos de cocina, un horno convencional y una cámara de combustión. Sus características detalladas se encuentran en la Tabla 2, y los componentes principales se ilustran en la Figura 10.

Tabla 2: Características cocina Alcázar M-80

Característica	M-70
Alto	90 [cm]
Ancho	82 [cm]
Profundidad	56 [cm]
Peso	130 [kg]
Potencia	11 [KW]
Capacidad horno	50 [L]

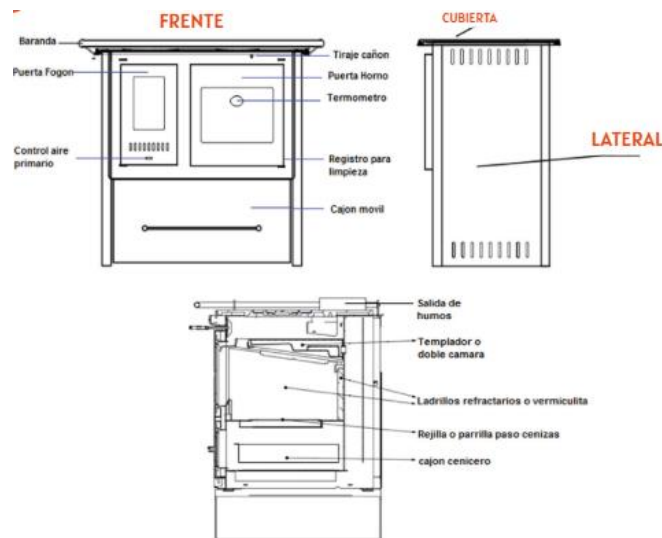


Figura 10: Principales componentes cocina Alcázar M-80.

### 2.1.2 Termo cañón

El termo cañón, con un volumen aproximado de 50 litros, permite que los gases de combustión circulen a través de tres etapas, con la opción para el usuario de regular el tiraje y expulsar los gases en la primera etapa, similar a un cañón de estufa convencional, o en la tercera etapa para una transferencia de calor más eficiente. Este dispositivo intercambia calor con el agua mediante convección y conducción, ingresando el agua fría por la parte inferior y saliendo caliente por la parte superior, proporcionando agua caliente sanitaria para uso doméstico. Este proceso maximiza la recuperación del calor de los gases de combustión, mejorando la eficiencia energética y optimizando el uso del calor generado.



Figura 11: Termo cañón de tres pasos

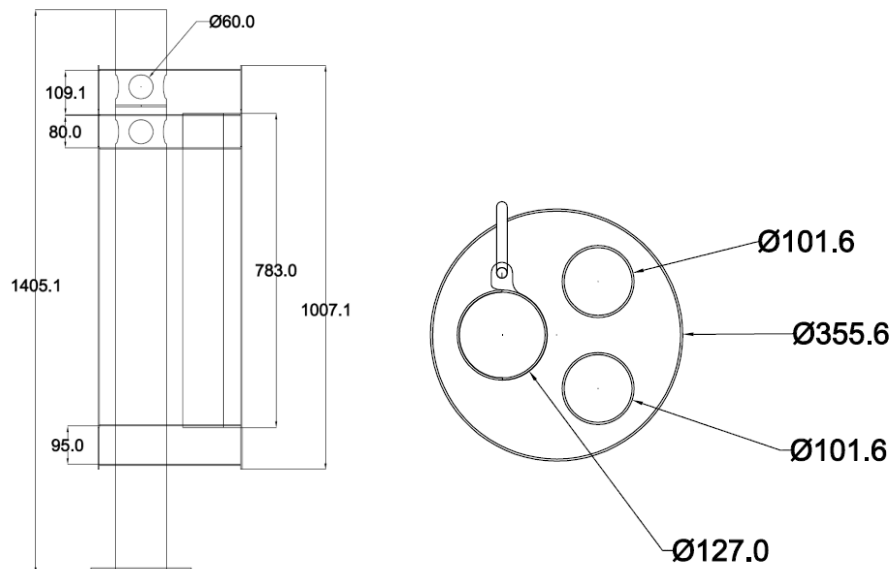


Figura 12: Medidas termo cañón

### 2.1.1 Precipitador electroestático

El precipitador electroestático que se utilizará es el MPzero [24], un dispositivo diseñado para reducir hasta un 90% las emisiones de material particulado generadas por la cocina. Su funcionamiento se basa en ionizar las partículas que se liberan a través del ducto, aplicándoles una carga eléctrica que permite que el material particulado se adhiera al cañón del dispositivo evitando que salgan a la atmosfera.



Figura 13: MPZERO instalado en el cañón.

### **2.1.2 Tren de muestreo material particulado.**

El tren de ensayo se utiliza para medir de manera más precisa las emisiones de material particulado. Su principio clave es que la velocidad de los gases de combustión en la sonda de muestreo debe igualar la velocidad del flujo del conducto, garantizando que las muestras sean representativas. Este sistema incluye una sonda de muestre, medidores de flujo, sistema de filtración de partículas, bomba de succión para mantener el flujo constante, etc. Todas las dimensiones e instrumentos están descritas en el Método CH-5G [23]

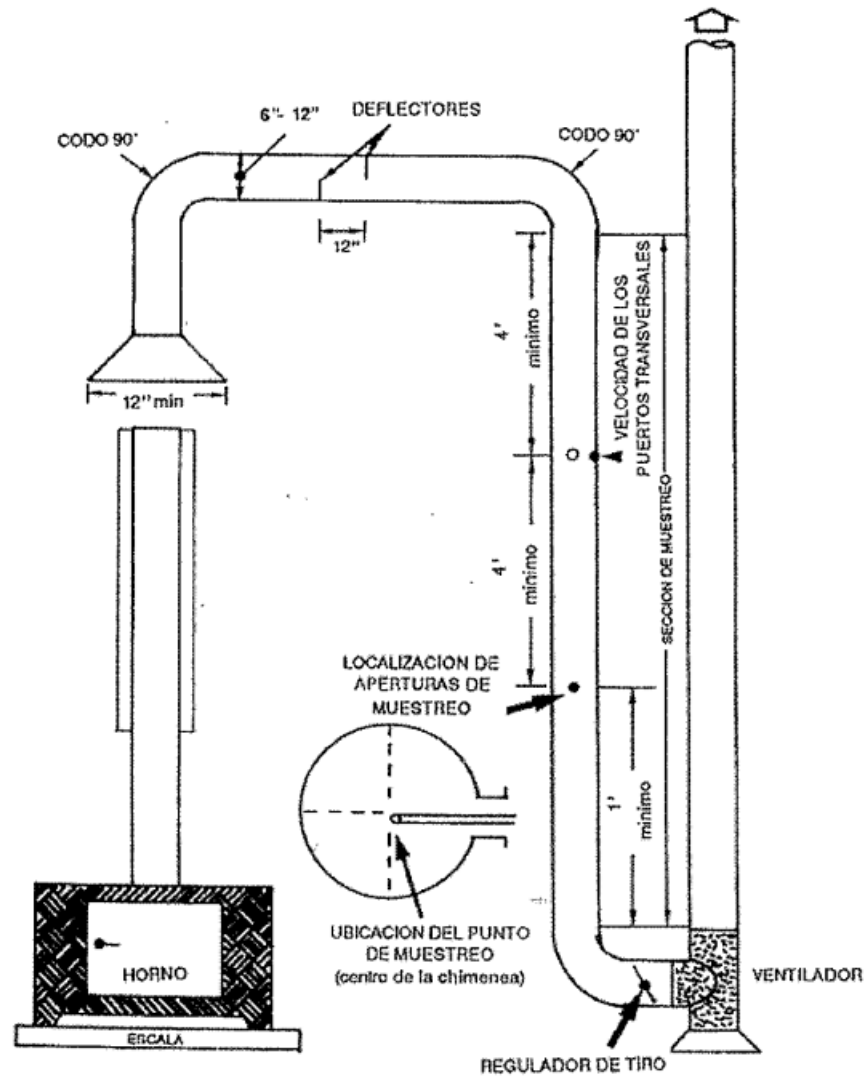


Figura 14: Esquema del tren de muestreo. (Fuente: [24])

## 2.2 Instrumentación

La instrumentación en la toma de datos para el equipo mencionado anteriormente es fundamental para obtener mediciones precisas y controladas de los parámetros operativos, lo que permite evaluar su rendimiento térmico y emisiones. El monitoreo de variables como el peso, la temperatura de la combustión, la concentración de gases de combustión y material particulado es esencial para optimizar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental y garantizar la seguridad en su operación. Además, la instrumentación adecuada permite la identificación de posibles mejoras en el diseño y la operación de la cocina. En la tabla 3 se encuentra las variables y la instrumentación necesaria para la toma de datos.

Tabla 3: Datos del banco de ensayo y las variables medidas

Item	Instrumento	Variable	Rango	Error
Tasa de quemado	Balanza LP-7516	Masa kg	0 - 300 kg	$\pm 0.01$ kg
	Analizador de humedad	% Humedad	8 - 23 %	$\pm 0.1$ %
Gases de Combustión	Testo 350	%O <sub>2</sub>	0 - 25 %	$\pm 0,2$ Vol. %
		CO	0-10000 ppm	$\pm 10$ ppm
		CO <sub>2</sub>	0-50 % Vol.	$\pm 0,3$ Vol. %
		Temp humos	de -200 a 1370 °C	$\pm 0,4$ °C
Material particulado	Balanza gavimetrica	Masa filtro	0.001 - 200 g	$\pm 0.001$ g
	Tren de ensayo isocinetico	Presión	50 - 5000 Pa	$\pm 1\%$
		Flujo	0 - 30000 L/h	$\pm 3\%$
Temperaturas	Termocuplas tipo K	Temperaturas	de -180 a 1330 °C	$\pm 2,5$ °C
Condiciones ambientales	Extech WTH600- kit	Humedad ambiental	20-90 % RH	$\pm 5$ % RH
		Temp. Amb.	40-70 °C	$\pm 1$ °C
		Presión Amb.	405-825 mmHg	$\pm 3$ mmHg

### 2.2.1 Instrumentación tasa de quemado

Para realizar una medición más precisa de la tasa de quemado es fundamental llevar un control de la masa a través del tiempo, esto se lleva empleando una balanza fija como plataforma del banco de ensayo. Esta balanza permite cuantificar la variación del peso del sistema causada por el proceso de combustión de la leña. Esta balanza se muestra en la figura 15.



Figura 15: Balanza tipo plataforma.

Esta balanza está sincronizada al marcador digital LP-7516, Figura 16. El beneficio de este marcador radica en que aparte de digitalizar el valor de la masa, es ofrece una interfaz programable que facilita la visualización y la recopilación de datos, permitiendo una efectiva adquisición de datos.



Figura 16: Marcador digital.

Otro factor que afecta a la tasa de quemado es la humedad que la madera representa, debido a que se necesita más energía en evaporar la humedad que tiene la madera en su interior. En la figura 17 se muestra el medidor de humedad.



Figura 17: Medidor de humedad.

### 2.2.2 Instrumentación gases de combustión.

Como fue mencionado en el capítulo anterior para poder entender mejor el comportamiento de la tasa de quemado y la emisión de material particulado, aun mas para separar las diferentes etapas de combustión, es por esto la importancia de medir la emisión de gases de combustión, para esto se emplea el testo 350 en conjunto con una lanza especial para la medición de gases, los datos son registrados digitalmente mediante el uso de software que proporciona la misma marca. El TESTO 350 es capaz de medir la concentración de oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), rendimiento, temperatura de humos, etc.



Figura 18: TESTO 350

### 2.2.3 Instrumentación de material particulado.

Para medir el material particulado por el método 5G primeramente se tiene que pesar el filtro antes de ser utilizado, para ver la diferencia cuando se impregne el material particulado, para esto es de suma importancia contar con una pesa milimétrica, es por esto que se cuenta con una balanza gravimétrica para medir más preciso.



Figura 19: Balanza gravimétrica.

Para cumplir con los requisitos establecidos por el método 5 G y poder extraer los gases por medio de la sonda, se ocupa el tren de ensayo del método EPA 5 de muestreo isocinético fabricado particularmente de la empresa CleanAir [25] donde señala que por la compra del equipo (sin contar embarcación) tiene un costo de más de \$8,000,000

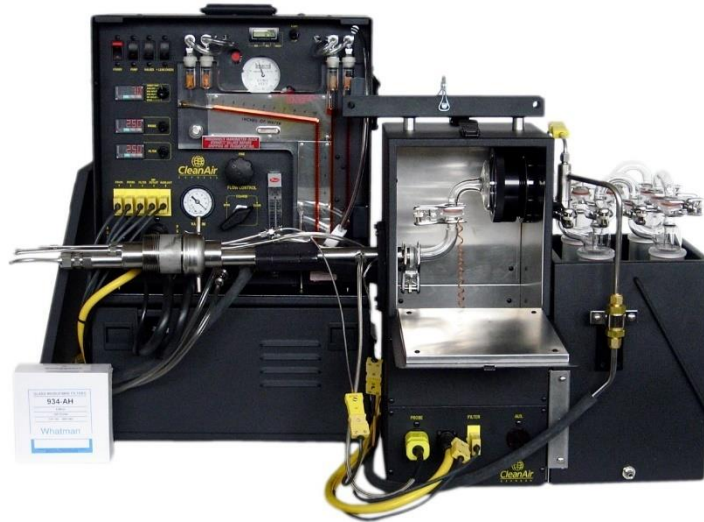


Figura 20: Tren isocinético de método 5 G. (Fuente: CleanAir)

#### **2.2.4 Instrumentación de temperaturas y condiciones ambientales.**

Para poder saber el comportamiento de las temperaturas a lo largo de la combustión de la masa y/o buscar alguna relación con el material particulado es necesario incorporar termocuplas a lo largo del recorrido de los gases desde la cámara de combustión hasta que se van al ambiente, es por esto que se incorpora estas termocuplas en el interior de la cocina, en los pasos del termo cañón y en la salida de este, también se registra las temperaturas de entrada y salida del agua al termo cañón para esto se utilizan las termocuplas tipo K.

Para las condiciones ambientales como lo es la temperatura ambiental, humedad relativa y presión ambiental se utiliza la estación de monitoreo meteorológico Extech WTH600-kit [26].

### **2.3 Desarrollo sensor PMS5003**

#### **2.3.1 Sensor PMS5003**

El sensor, fabricado por la empresa PlanTower Technology y mencionado en el capítulo anterior, es un dispositivo avanzado diseñado para medir la concentración de material particulado en el aire, incluyendo partículas de los tamaños PM1, PM2.5 y PM10. Este sensor emplea tecnología láser para ofrecer datos en tiempo real, lo que lo convierte en una herramienta ideal para el ensayo en cuestión. Su funcionalidad permite un monitoreo preciso de la calidad del aire, especialmente en lo referente a los gases de combustión producidos por la cocina a leña. Los detalles técnicos completos se encuentran en el Anexo 2.

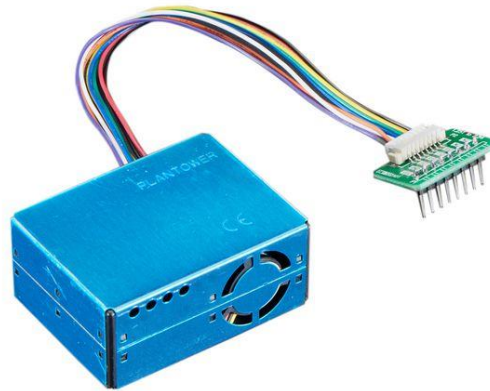


Figura 21: Sensor PMS5003. (Fuente: Plantower Technology [23])

Este sensor utiliza el principio de dispersión de la luz para medir partículas en el aire. Una vez que el aire aspirado ingresa al sensor, pasa a través de un haz de luz emitido por un láser, lo que provoca que la luz se disperse al impactar las partículas presentes. Un fotodetector luego mide la cantidad de luz dispersada en diferentes direcciones. Es importante destacar que la cantidad de luz dispersada es proporcional al número y tamaño de las partículas. Posteriormente, el sensor aplica algoritmos para convertir estos datos sobre la luz dispersada en valores de concentración de material particulado. El precio de este sensor ronda los \$20.000.

### 2.3.2 Calibración sensor PMS5003

La calibración es esencial para garantizar la precisión y confiabilidad en las mediciones realizadas por equipos y sensores. Un equipo calibrado adecuadamente asegura que los datos obtenidos sean precisos. En un estudio [10] que analiza la calidad del aire en la ciudad de Concepción, se utilizó este mismo sensor, el cual fue calibrado teniendo en cuenta las condiciones de humedad y temperatura a las que fue expuesto. En la figura 22 se presentan tres curvas que se ajustan a los datos experimentales, obtenidos mediante aproximaciones numéricas.

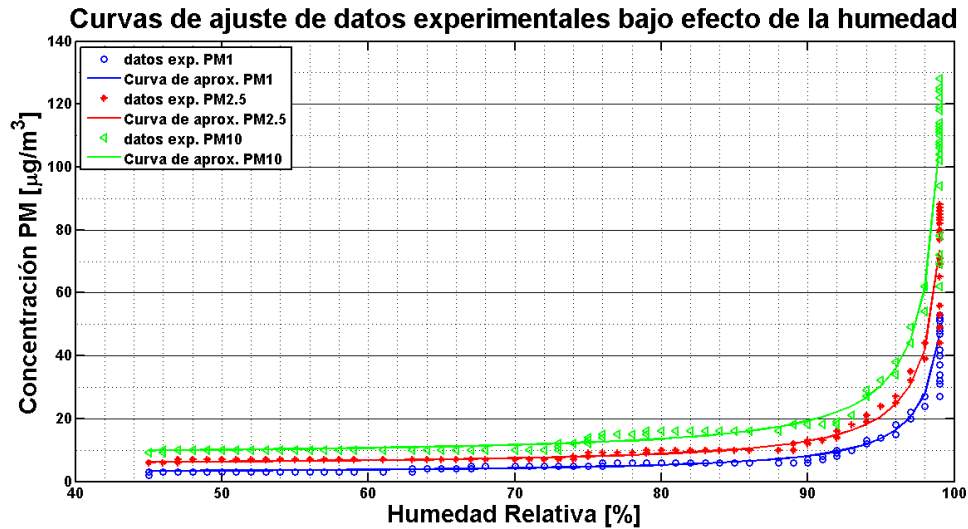


Figura 22: Datos Experimentales bajo condiciones controladas. (Fuente: [11])

La siguiente ecuación modela los datos experimentales para lograr una mayor concordancia con la muestra de datos. Por su parte, la Tabla 4 presenta los valores de cada constante correspondientes al tamaño del material particulado.

$$\text{Concentración de } MP_x \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{A_{pm_x} * HUM}{B_{pm_x} + HUM} + C_{pm_x}$$

Tabla 4: Contantes para la ecuación de modelación de material particulado bajo el efecto de humedad.

MP	A	B	C
MP 1.0	-6.14e-1	-1.00e+2	2.86
MP 2.5	-8.34e-1	-1.00e+2	5.51
MP 10.0	-1.17	-1.00e+2	8.94

La ecuación anterior permite realizar una corrección de la concentración, tomando como referencia el nivel de concentración correspondiente a la menor humedad alcanzada. Para ello, se calcula un factor de corrección  $K_{pm,H}$ , el cual depende del tipo de material particulado y del nivel de humedad presente. En la figura 23 se muestra el factor de corrección en función de la humedad.

$$\text{Factor de corrección } K_{pm,H} [-] = \frac{\text{ConcentraciónBaseMP}}{\text{Concentración de } MP_{x,H}}$$

$$\text{Concentración de } MP_{x,\text{corregida}} \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = K_{pm,H} * \text{ConcentraciónBaseMP}$$

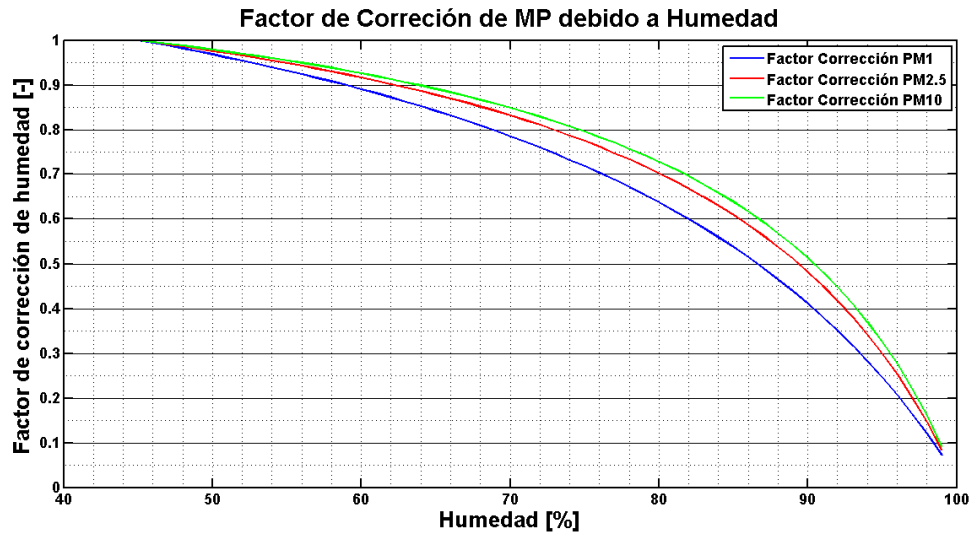


Figura 23: Factor de corrección aplicable a PM1.0, PM2.5, PM10.0, según porcentaje de humedad.

### 2.3.3 Sistema de adquisición de datos.

Aunque el sensor PMS5003 es una herramienta eficaz para la medición de partículas, es necesario contar con un sistema para adquirir y procesar los datos generados por este sensor. En este contexto, el Arduino UNO juega un papel crucial, ya que fue seleccionado por su simplicidad y facilidad de uso. A este dispositivo se le carga un código que se ejecuta de manera cíclica, dividido en dos partes principales. La primera parte es el "void setup", cuya función es configurar los parámetros iniciales del Arduino, ejecutándose solo una vez al encender el dispositivo. La segunda parte es el "void loop", que contiene el código que se ejecuta de manera continua mientras el Arduino está en funcionamiento. Es esencial que esta sección esté correctamente programada para garantizar un funcionamiento adecuado y eficiente del sistema. El código completo puede encontrarse en el Anexo 3.

Por otro lado, una vez que ambos dispositivos están disponibles, es necesario establecer la conexión entre el sensor y el Arduino, lo cual se logra a través de los pines del sensor y el Arduino [24]. La Tabla 5 muestra la función de cada pin del sensor en esta conexión.

Tabla 5: Pines del sensor PMS5003

Pin	Function
1	VCC :Power Supply (5V).
2	GND :Ground.
3	SET :Standby mode (when 0), operating mode (when 1)
4	RXD :Serial receive / TTL level @ 3.3V.
5	TXD :Serial transmit / TTL level @ 3.3V.
6	RESET :Module reset / TTL level @ 3.3V.
7,8	NC: Not connected

Para conectar el sensor al Arduino, se utilizan los pines 1, 2, 4 y 5. Estos se conectarán mediante cables Dupont macho a macho. La funcionalidad de cada pin es la siguiente:

- Pin 1: El sensor recibe una alimentación de 5V directamente desde el Arduino. Es importante tener en cuenta que, dado que el sensor depende del Arduino como fuente de energía, esto puede ser perjudicial si el sensor requiere más corriente de la que el Arduino puede suministrar. En tales casos, podría producirse un corte eléctrico que podría dañar el Arduino. Sin embargo, uno de los beneficios de esta configuración es que simplifica el proceso de montaje.
- Pin 2: Este es el pin de tierra (GND), que regula el voltaje del circuito, asegurando una referencia común para las señales.
- Pin 4: Funciona como el pin de recepción de datos del sensor, conectándose al pin de transmisión (TX) en el Arduino.
- Pin 5: Este pin actúa como un pin de transmisión de datos para el sensor y como un pin de recepción (RX) en el Arduino.

En la figura 24 se muestra la conexión entre estos pines

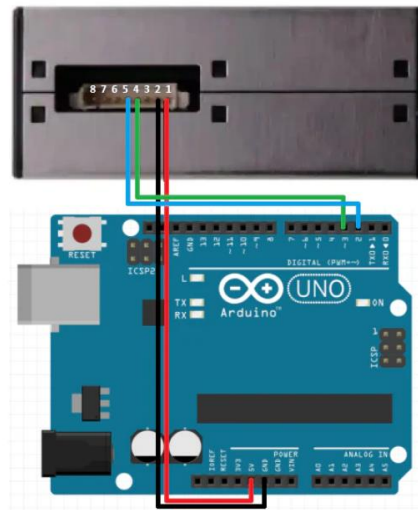


Figura 24: Montaje circuito Arduino - PMS5003.

Una vez que el sensor y el Arduino están correctamente conectados, el siguiente paso es establecer la conexión entre el Arduino y el computador para que este pueda leer los datos de manera adecuada. El Arduino se conecta al computador mediante un cable USB, a través del cual se transfieren los datos. Es fundamental utilizar el programa RealTerm, que permite configurar el formato en que los datos recibidos por el puerto USB serán organizados. En este caso, se configurará RealTerm para exportar los datos en un formato de Microsoft Excel, lo que facilitará la creación de gráficos de manera inmediata y optimizará el tiempo de análisis.

Es importante destacar que este tipo de comunicación serial ocurre únicamente en un sentido, desde el sensor PMS5003 hacia el Arduino, y luego del Arduino hacia el computador, a una frecuencia de 1 Hz. No es necesario transmitir ningún tipo de dato en sentido contrario, ya que todo el procesamiento se realiza a partir de la información recibida del sensor mediante el código cargado en el Arduino.

## 2.4 Descripción ensayos.

Se establecieron protocolos detallados para los ensayos en la cocina y termo cañón, variando las condiciones de tiraje principal (abierto y medio) y regulando la circulación de agua mediante una pequeña bomba para garantizar el flujo adecuado por el cañón. La leña utilizada en la cámara de

combustión se prepara en trozos de tamaño uniforme, registrando previamente la masa y humedad de la astilla. El proceso experimental comienza con un precalentamiento de la cocina, dejando una cama de brasas que representa entre el 10% y el 20% de la masa total de leña utilizada en los ensayos. Este paso es crucial para alcanzar un estado estacionario en la cocina, minimizando las fluctuaciones y asegurando mediciones más precisas. La masa total de la cocina se registra en la balanza descrita en el punto 2.2.1, la cual está conectada a un computador que permite registrar el peso cada 10 segundos.

Cada ensayo se realiza con una carga de leña de  $2.80 \pm 0.41$  kg, conforme a la normativa chilena 3173 [23], lo que influye también al tamaño de la cámara de combustión. Un día de ensayo se compone de varias corridas, comenzando con un encendido de la cocina utilizando el 50% de la masa de leña que se ingresaría en un ensayo estándar. Posteriormente, se llevan a cabo entre dos y tres "pre-ensayos" con el fin de elevar las temperaturas de la cocina para alcanzar condiciones óptimas de operación, minimizando las fluctuaciones en las variables independientes y logrando el mayor nivel de estabilidad posible. Finalmente, se inician los ensayos principales, que se espera sean los más representativos y consistentes entre sí.

En cuanto a la toma de datos sobre el material particulado, como se dijo anteriormente, se emplea un sistema isocinético para la recolección del material, cambiando el filtro de fibra de vidrio entre cada ensayo. El filtro se impregna con el material particulado extraído durante el ensayo y se pesa utilizando una balanza de precisión antes y después de cada prueba.

Respecto al agua que fluye por el cañón, se ha decidido realizar un cambio de agua después de cada ensayo, debido a que las temperaturas pueden llegar a alcanzar los  $100^{\circ}\text{C}$ . La evaporación del agua y los movimientos dentro del cañón podrían afectar la precisión de las mediciones del peso u otras variables.

Para el análisis y tratamiento de los datos experimentales, se optó por realizar un análisis adimensional, lo cual permite generalizar los resultados obtenidos en diferentes escalas y facilita la comprensión de las relaciones entre las variables involucradas. Este enfoque también permitirá modelar la tasa de quemado de manera adimensional, tal como se explicó en el punto 1.2.2.

Finalmente, las Tabla 6 muestra el resumen todos los ensayos realizados en la cocina Alcázar M-70, con termo cañón mencionado anteriormente.

Tabla 6: Configuraciones y resultados.

Cocina			Combustible							Ambiente			
Fecha	Tiraje	Número de ensayo	Masa [kg]	Tasa de quemado [kg/h]	Material particulado [mg/m <sup>3</sup> ]	Temp. Cámara comb. [°C]	Temp. Humos ent. Tcañon [°C]	Temp. Humos sal. Tcañon [°C]	%O <sub>2</sub>	CO ppm	Temp. ambiente	Presión [hPa]	
12/11/2024	Abierto	TA-1	2.81	3.2	47	630	378	95			21.7	1014	
		TA-2	2.79	2.9	53	668	371	102	12	2461	22.4	1014	
		TA-3	2.80	2.9	41	605	348	78	15	2645	21.6	1014	
		TA-4	2.78	3.3	85	633	382	95	13	864	21.1	1014	
		TA-5	2.78	2.7	57	606	358	83	15	176	23	1014	
15/11/2024	Medio	TM-1	2.83	2.2	35	554	322	55	16	530	23.3	1013	
		TM-2	2.85	2.9	96	559	327	56			25	1013	
		TM-3	2.77	2.2	21	458	183	57				21.3	1013
		TM-4	2.81	2.1	28	501	307	56	23	513	21.3	1013	
		TM-5	2.81	2.4	29	558	334	66	16	527	21.3	1013	
		TM-6	2.83	1.8	32	541	312	60	18	707	21.4	1013	
		TM-7	2.82	2.5	51	560	350	57				23.9	1014
18/11/2024	Abierto	TA-6	2.75	1.8	35	524	346	73	16	2567	25.4	1014	
		TA-7	2.77	2.8	25	544	368	85	18	1423	23.8	1014	
		TA-8	2.87	2.7	39	622	361	73	16	4701	22.6	1014	
		TA-9	2.81	2.5	113	589	328	72				23.4	1014

Como se puede apreciar en la tabla 6 presenta un resumen de los resultados obtenidos, tomando en consideración la tasa de quemado de puede notar las siguientes tendencias

- Tiraje Abierto: Para el tiraje abierto, la tasa de quemado fue significativamente más alta, alcanzando valores de hasta 3.3 kg/h, lo que indica una combustión más rápida pero menos controlada. Este comportamiento se atribuye a la mayor entrada de aire característica de esta configuración, que favorece una combustión más intensa, también genera una menor eficiencia en el proceso, debido a la pérdida de calor y al arrastre de madera no completamente quemada.
- Tiraje Medio: En comparación, la tasa de quemado en esta configuración fue más constante, con valores que oscilaron entre 1.8 kg/h y 2.9 kg/h. Esta estabilidad sugiere una combustión más eficiente y prolongada, lo que indica un mejor aprovechamiento del calor generado por el combustible

Otro punto importante para destacar es la relación directa entre la temperatura de la cámara de combustión y el tiraje. En el caso del tiraje abierto, se observó que la temperatura promedio de la cámara de combustión fue hasta un 31.4% mayor en comparación con el tiraje medio. Este incremento en la temperatura favorece una combustión más rápida, lo que acelera el proceso de quemado del combustible, pero una menor eficiencia en la retención del calor generado.

### **Análisis de resultados.**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante los ensayos realizados en la cocina a leña bajo diferentes configuraciones de tiraje (medio y abierto). El propósito es evaluar la relación entre la tasa de quemado, las emisiones de material particulado (MP), y las concentraciones de monóxido de carbono (CO), además de validar el desempeño del método óptico de medición utilizando el sensor PMS5003 en comparación con el método isocinético.

El análisis busca no solo validar la fiabilidad de los datos obtenidos, sino también identificar patrones clave y establecer correlaciones significativas que permitan optimizar el diseño y uso de cocinas a leña. Los resultados presentados proporcionan una base sólida para las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

Es importante destacar que, de los 16 ensayos realizados, 7 con tiraje medio y 9 con tiraje abierto, no todos pudieron ser considerados válidos debido a diversos inconvenientes que afectaron las variables

durante su ejecución. Por lo tanto, a partir de este punto, se trabajará exclusivamente con los ensayos que se llevaron a cabo en estado estacionario, sin interrupciones ni alteraciones.

### 3.1 Modelo Tasa de quemado.

#### 3.1.1 Formulación del modelo.

Para la modelación de la tasa de quemado, se sigue el mismo enfoque utilizado en los estudios mencionados en el Capítulo 1 [12] [27], donde se empleó un tratamiento adimensional de los datos. Este método permite generalizar los resultados, facilitando el desarrollo de un modelo matemático representativo del comportamiento observado.

Uno de los factores clave para diferenciar las etapas de la tasa de quemado es el análisis de las emisiones de monóxido de carbono (CO) durante la combustión. En la Figura 25y 26 se presentan ensayos característicos para las configuraciones de tiraje medio y tiraje abierto, respectivamente, donde se evidencia cómo varían las emisiones de CO a lo largo de las tres etapas de la combustión: ignición, combustión principal y burnout [28]. Este análisis permite identificar las transiciones entre las diferentes etapas, lo que facilita la creación de un modelo específico para cada una de ellas, considerando que la pendiente varía entre dichas etapas.

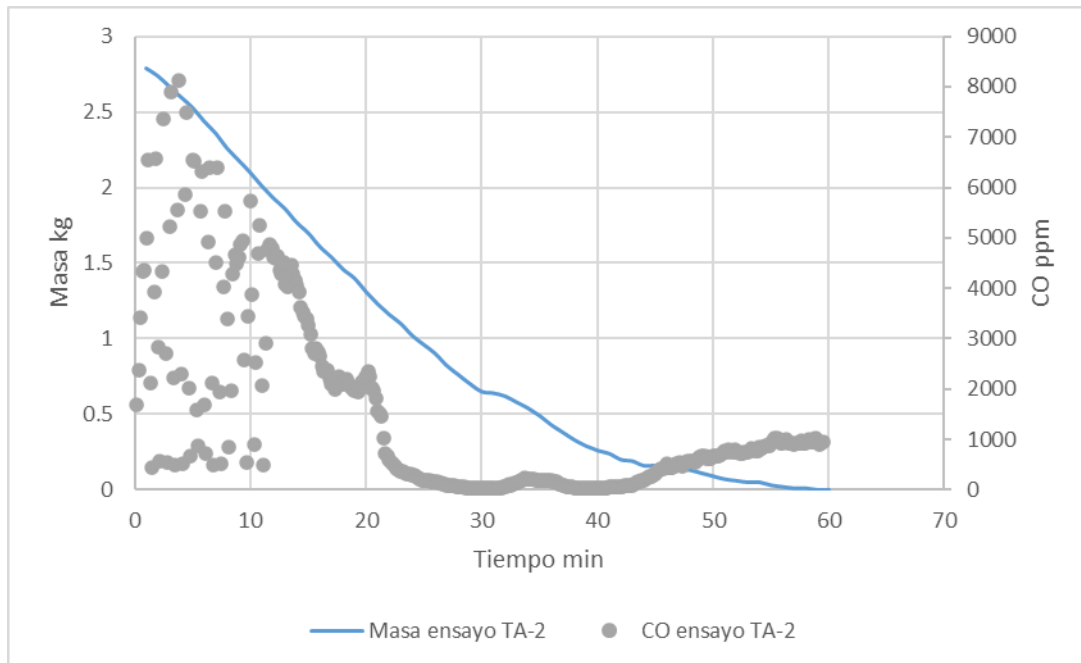


Figura 25: Comparación masa y emisiones de CO en el tiempo para ensayo de tiraje abierto

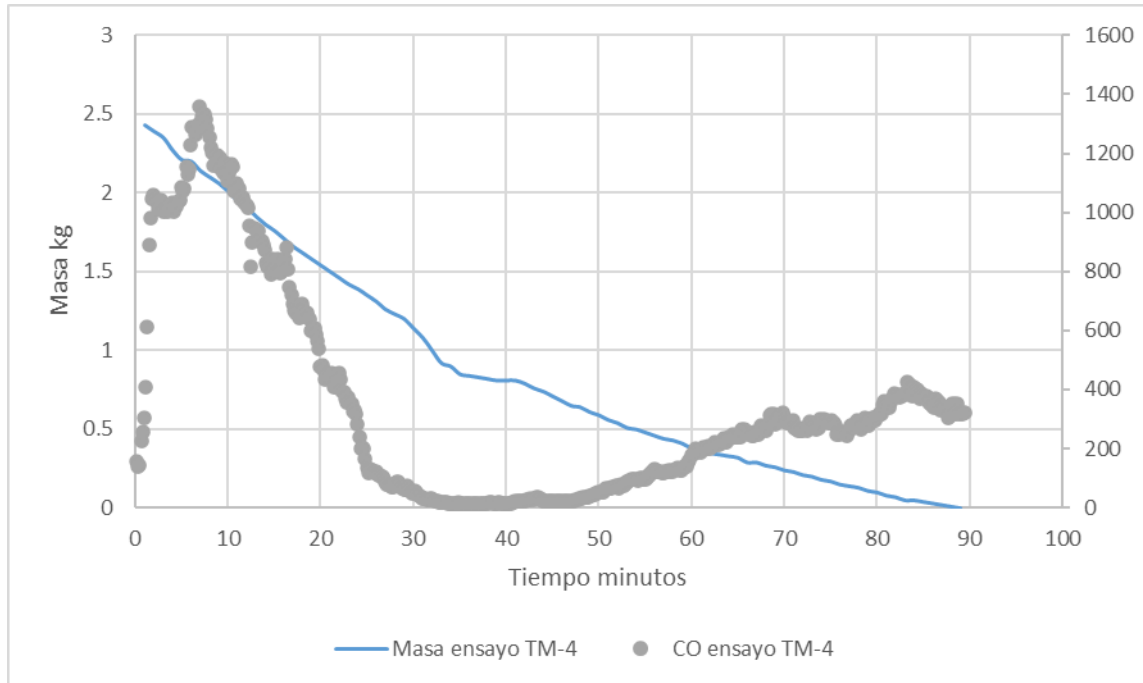


Figura 26: Comportamiento masa y emisiones de CO para ensayo de tiraje medio

Dado que este comportamiento se repite de manera consistente en los demás ensayos, se establece que, para tiraje abierto, el cambio de fase ocurre alrededor de los minutos 20 y 40. En contraste, para el tiraje medio, las transiciones se producen entre los minutos 25-30 y 50-60.

Para facilitar una mejor comprensión, se retoma la fórmula presentada en el punto 1.2.2, la cual permite calcular la tasa de quemado para cada etapa de la combustión. Esta fórmula proporciona una herramienta fundamental para analizar y describir el comportamiento de la tasa de combustión en función del tiempo, dividiendo el proceso en sus respectivas etapas. A continuación, se presenta la ecuación correspondiente:

$$TQ_n = \frac{(M_n^* - M_{n-1}^*)}{(t_n^* - t_{n-1}^*)} * \frac{M_T}{t_T}$$

Siendo  $\frac{(M_n^* - M_{n-1}^*)}{(t_n^* - t_{n-1}^*)}$  la tasa de quemado adimensional y  $\frac{M_T}{t_T}$  se define como un factor de conversión para pasar de la tasa de quemado adimensional a la tasa de quemado dimensional. Siendo  $TQ_1$ ,  $TQ_2$ ,  $TQ_3$  la tasa de quemado para la etapa 1 (ignición), etapa 2 (combustión principal) y etapa 3 (burnout) respectivamente.

### 3.1.2 Resultados del modelo

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos a partir de la comparación de la regresión lineal con cada una de las curvas de experimentación. Uno de los criterios que se utilizó para ver si los ensayos son representativos fue que el  $R^2 \geq 0.75$  y Varianza muestral  $\leq 0.25$  utilizado en el IVMP [28]

Tabla 7: Resultados de la regresión lineal para cada curva de ensayo

Cocina		TQ1		TQ2		TQ3	
Tiraje	Ensayo	R <sup>2</sup>	Varianza	R <sup>2</sup>	Varianza	R <sup>2</sup>	Varianza
Tiraje Abierto	E1	0.9793	0.003	0.9114	0.0005	0.4396	0.001
	E2	0.9757	0.003	0.7754	0.001	0.5046	0.001
	E5	0.9812	0.001	0.9112	0.001	0.7757	0.001
	E1	0.9601	0.005	0.763	0.0005	0.63309	0.003
	E2	0.9973	0.000	0.9298	0.002	0.8289	0.002
	E4	0.9483	0.002	0.947	0.002	0.8885	0.001
Tiraje medio	E5	0.4805	0.043	0.56	0.025	0.2429	0.002
	E4	0.9667	0.001	0.9556	0.001	0.7822	0.001
	E3 18/11	0.9829	0.002	0.9556	0.002	0.9056	0.001

En la Tabla 7, el modelo propuesto muestra una alta correlación para las etapas 1 y 2 generalmente, mientras que para la etapa 3, el modelo representa un variable, lo cual es aceptable en algunos ensayos más que en otros. Estos resultados son consistentes con lo señalado en la literatura [13] [28], reforzando la validez del enfoque adoptado. Además, las varianzas calculadas en los experimentos confirman que las dispersiones son bajas en las etapas iniciales, lo que refleja una estabilidad significativa en los datos experimentales y un buen ajuste del modelo.

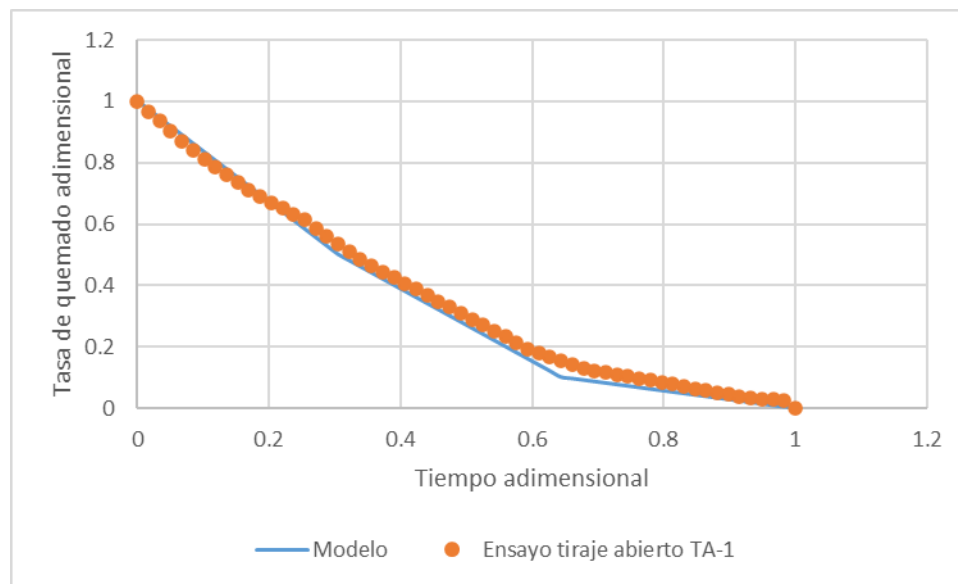


Figura 27: Comparación del modelo de la tasa de quemado con el ensayo TA-1 en tiraje abierto.

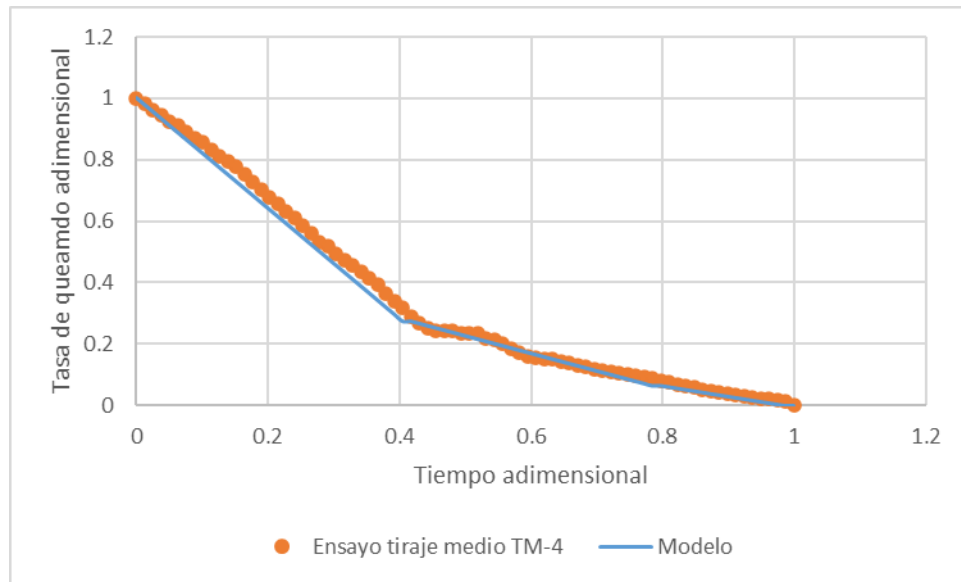


Figura 28. Comparación del modelo de la tasa de quemado con el ensayo TM-4 en tiraje medio

Al modelar la tasa de quemado utilizando la regresión lineal descrita anteriormente para cada etapa de la combustión y configuración de tiraje, se obtuvo un modelo adimensional basado en la ecuación  $y = ax + b$ . En la Tabla 8 se presentan los parámetros “a” (pendiente) y “b” (intersección con el eje y) correspondientes a cada etapa, lo que permite describir el comportamiento de la tasa de quemado de manera generalizada y comparable.

Tabla 8: Coeficientes del modelo de regresión lineal para cada etapa de combustión.

Etapa de combustión	Tiraje abierto		Tiraje medio	
	Coef a	Coef b	Coef a	Coef b
Ignición	-1.64	1.00	-1.76	1.00
Combustión principal	-1.18	0.88	-0.57	0.51
Burnout	-0.29	0.29	-0.34	0.34

### 3.1.3 Influencia del tiraje en el modelo

Para realizar esta comparación, se modelaron las condiciones de tiraje abierto y tiraje medio para la misma masa. Los resultados muestran que la tasa de quemado en el tiraje abierto es significativamente mayor que en el tiraje medio.

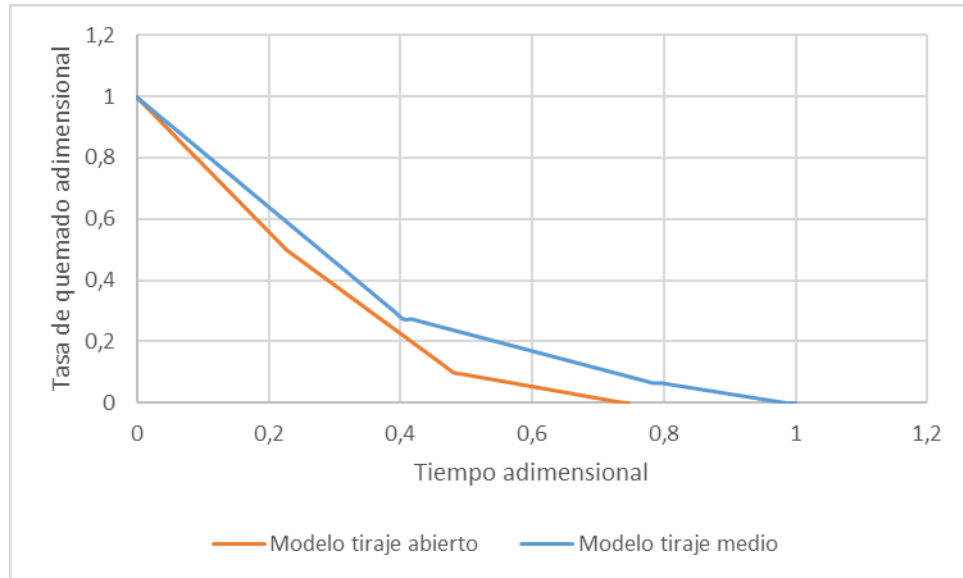


Figura 29: Comparación modelos para cada tiraje.

Considerando lo anterior, se concluye que, para la combustión de una misma masa bajo condiciones de tiraje medio en la cocina Alcázar M-70, el proceso de combustión tiene una mayor duración. Esto se evidencia al considerar que, en comparación, el tiraje abierto reduce el tiempo de combustión al 75% del tiempo que toma el tiraje medio.

### 3.1.4 Estimación del error.

Para la estimación de error se realizará el procedimiento como lo descrito en “Apuntes del curso de mediciones” [29], para cada punto, se calcula el error estándar ( $\varepsilon$ ) considerando las mediciones experimentales disponibles y se calcula como:

$$\varepsilon_j = \frac{S_j}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- $S_j$ : Desviación estándar de las mediciones experimentales.
- $n$ : Número de mediciones experimentales.

Al utilizar la fórmula en la tabla 9 se aprecia el error estándar promedio de la tasa de quemado para cada configuración:

Tabla 9: porcentaje de error para cada etapa de quemado con su respectivo tiraje.

Cocina	% error		
	TQ1	TQ2	TQ3
Abierto	7.59%	19.30%	26.70%
Meido	6.96%	8.30%	27.34%

### 3.2 Análisis de temperaturas.

Como se observa en la Tabla 6, se presentan las temperaturas registradas en la cámara de combustión, así como en la entrada y salida del termo cañón. Los datos muestran que las temperaturas en el tiraje abierto tienden a ser superiores a las del tiraje medio, alcanzando en la cámara de combustión un 31.4% más que en el tiraje medio. Esta diferencia se mantiene en la entrada como en la salida del recuperador de calor del termo cañón, lo que refuerza la tendencia de mayores temperaturas asociadas al tiraje abierto. En las Figuras 30 y 31 se ilustra de forma visual esta diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del recuperador de calor, evidenciando el impacto de cada configuración de tiraje en la transferencia térmica y el desempeño general del sistema.

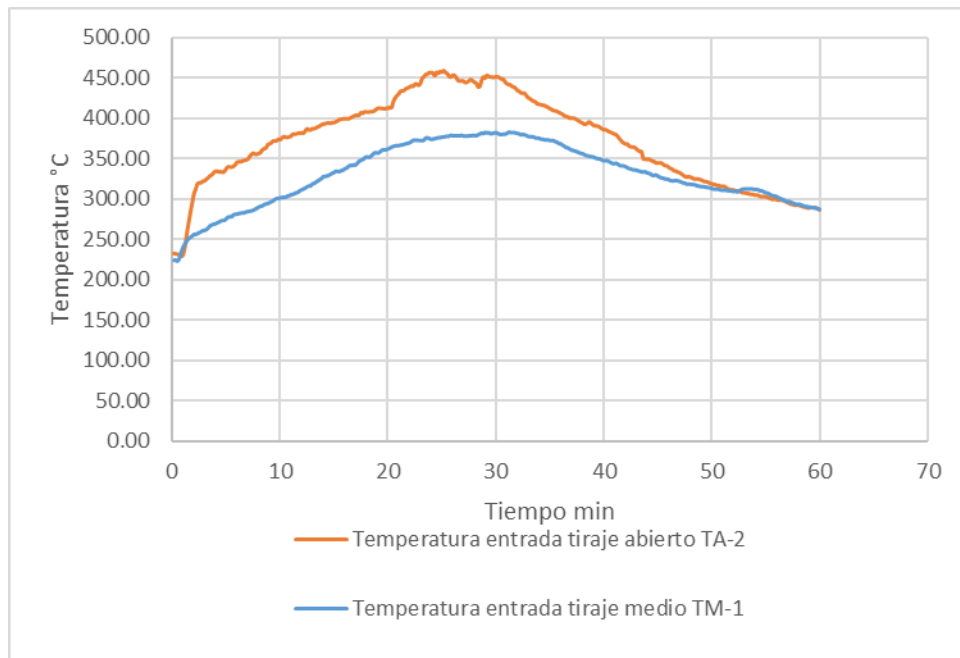


Figura 30: Comparación de las temperaturas en la entrada del recuperador de calor.

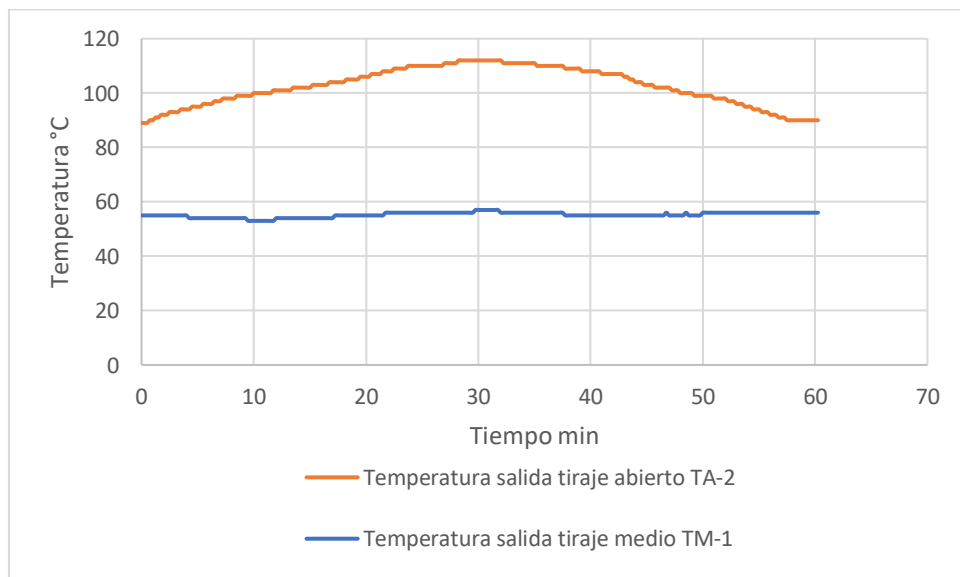


Figura 31: Comparación de las temperaturas en la salida del recuperador de calor.

Como se observa en las figuras anteriores, las temperaturas alcanzadas en el tiraje abierto son más elevadas, como se mencionó previamente. Es importante destacar que estas dos experiencias se realizaron a la misma hora en días diferentes, lo que asegura condiciones comparables para el análisis.

En el tiraje medio, se observa que la temperatura de salida es relativamente baja, lo que favorece la formación de condensado. En la Figura 32 se presenta el condensado recolectado durante un día de ensayos realizados bajo condiciones de tiraje medio. Cabe destacar que el pH del condensado varía entre 3.7 y 4.2, lo que indica una acidez significativa.



Figura 32: Condensado recolectado en un día de ensayos de tiraje medio.

### **3.3 Análisis de emisiones.**

#### **3.3.1 Comparación método isocinético y óptico.**

Como fue mencionado anteriormente, las emisiones de material particulado fueron medidas utilizando el sensor óptico PMS5003 y medidor isocinético con el método 5G, siendo los resultados analizados para ambas configuraciones de tiraje.

Para validar el desempeño del sensor óptico, se compararon los resultados obtenidos con este dispositivo con los datos medidos por el método isocinético. Los resultados mostraron una alta correlación entre ambos métodos, con una relación cercana a 1, lo que indica que el sensor óptico proporciona mediciones confiables de material particulado.

Tabla 10: Mediciones de material particulado (MP) mediante métodos isocinético y óptico.

Tiraje	Ensayo	MP isocinético mg/m <sup>3</sup>	MP Medidor optico mg/m <sup>3</sup>	Relación Optico/isocinetico
Tiraje Medio	TM-1	35	41	1.19
	TM-2	96	111	1.16
	TM-3	21	29	1.39
	TM-4	28	36	1.31
	TM-5	29	30	1.01
	TM-6	51	59	1.16
	TM-7	32	42	1.32
Tiraje abierto	TA-1	47	45	0.96
	TA-2	53	46	0.86
	TA-3	41	46	1.12
	TA-4	85	79	0.93
	TA-5	57	56	0.98
	TA-6	35	34	1.00
	TA-7	25	24	0.98
	TA-8	39	38	0.98
	TA-9	113	113	1.00

Como se muestra en la Tabla 7, existe una variabilidad en las concentraciones medidas entre los métodos utilizados. En el caso de tiraje medio, el método óptico tiende a reportar valores ligeramente superiores en comparación con el método isocinético. Por otro lado, en tiraje abierto, el método óptico muestra valores ligeramente inferiores respecto al isocinético.

No obstante, como se observa en la Figura 25, la relación entre ambos métodos se mantiene cercana a 1, lo que sugiere que el método óptico es consistente y responde de manera adecuada a los datos obtenidos por el método isocinético. Este comportamiento lineal se evidencia en un coeficiente de determinación aproximadamente  $R^2 = 0.97$ , lo que refleja una alta correlación y confianza en el desempeño del método óptico como herramienta complementaria para la medición de material particulado.

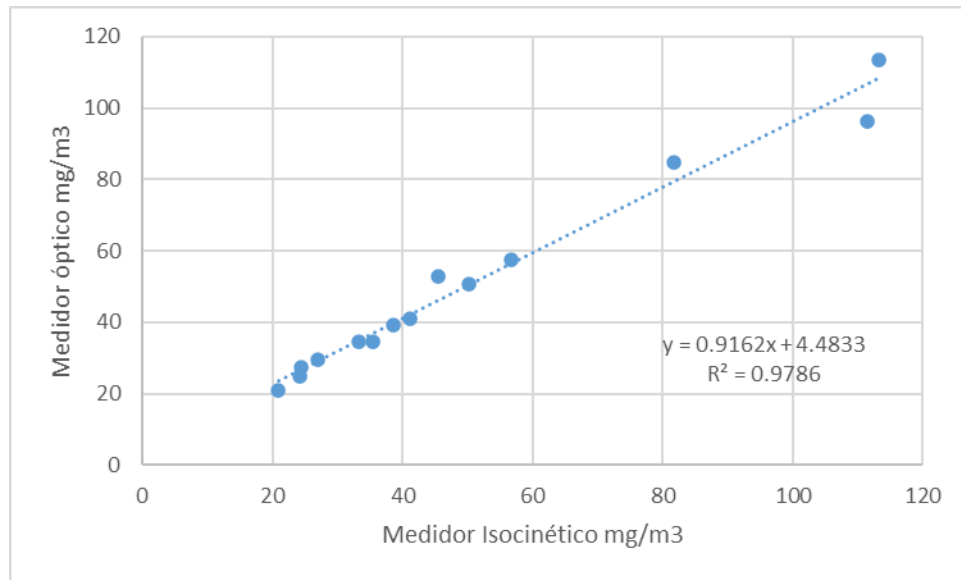


Figura 33: Comparación de resultados del método óptico con el isocinético.

### 3.3.2 Comparación de emisiones.

Como se observa en las Figuras 33 y 34, se presenta una comparación entre las dos configuraciones de tiraje evaluadas. Los ensayos corresponden a pruebas representativas realizadas bajo cada una de las condiciones, reflejando comportamientos que se reproducen consistentemente en el resto de los ensayos. El objetivo de esta evaluación es analizar los efectos de cada configuración en el desempeño del sistema.

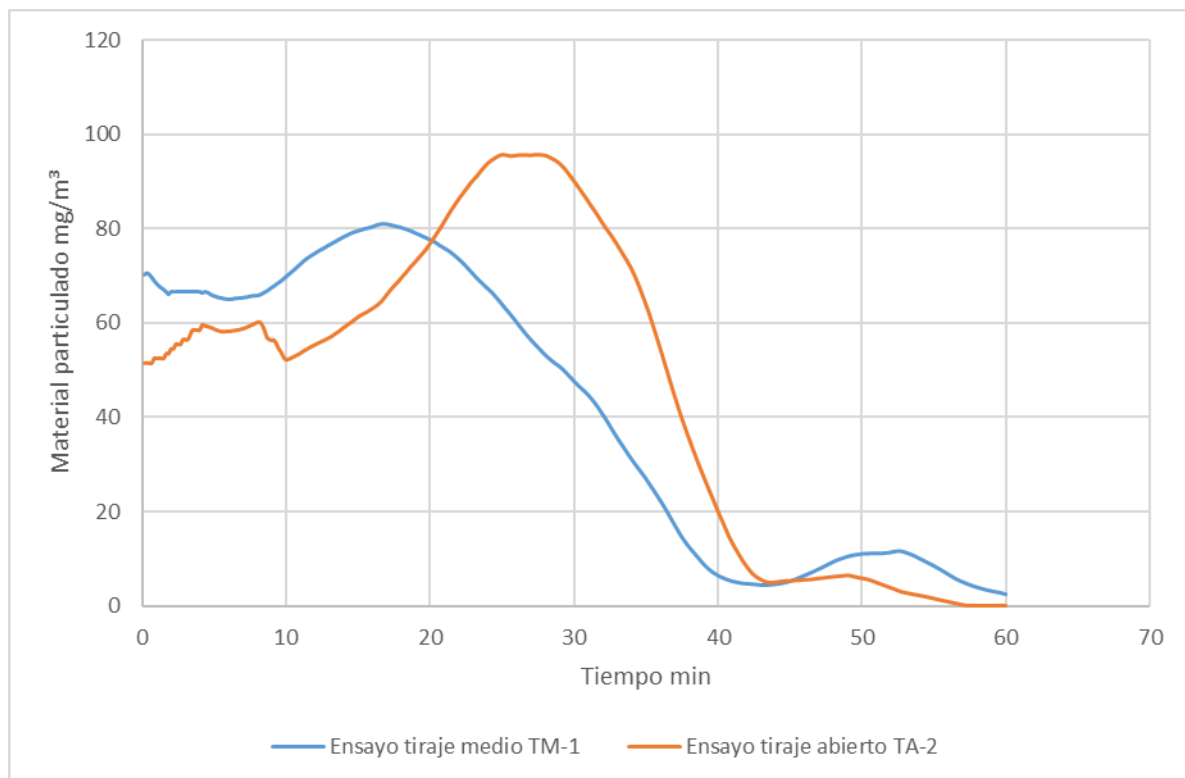


Figura 34: Comparación de emisión de material particulado en tiraje medio y abierto

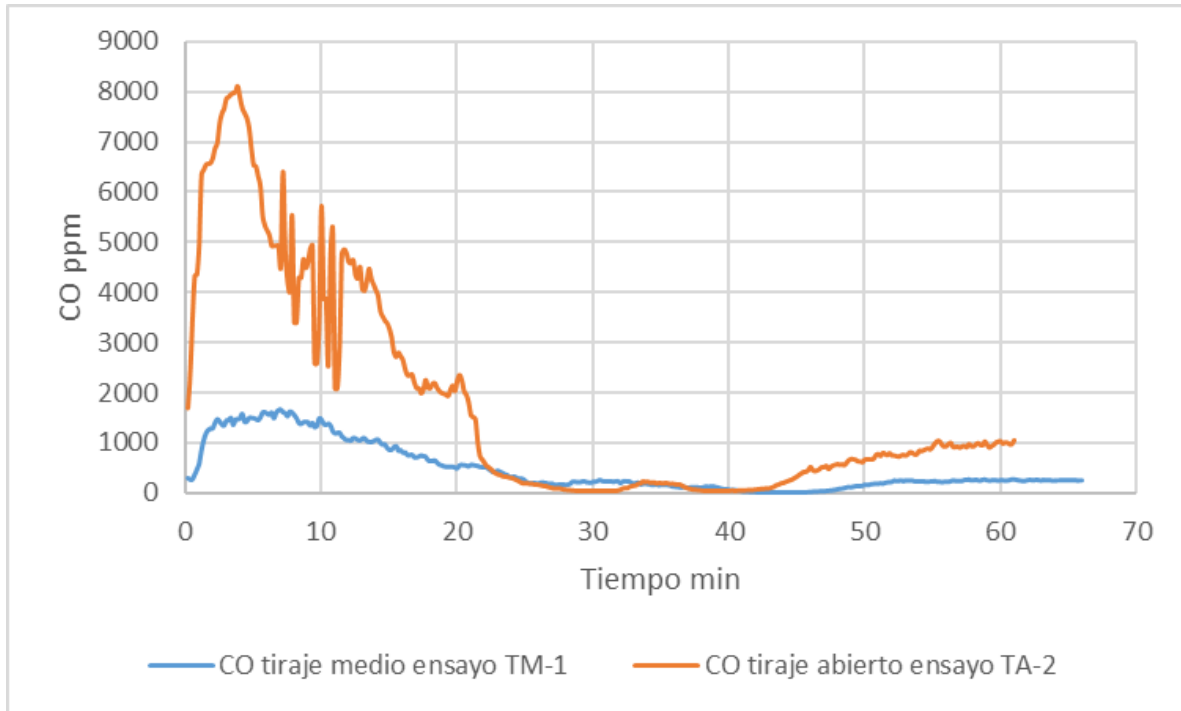


Figura 35: Emisiones de CO para tiraje medio y abierto

Los gráficos analizados evidencian que la condición de emisión de material particulado es más crítica en el tiraje abierto, mostrando concentraciones más altas en comparación con el tiraje medio. Este comportamiento puede explicarse por el mayor flujo de aire que caracteriza al tiraje abierto, lo que incrementa el arrastre de partículas desde la fuente de combustión hacia el flujo de salida. Este fenómeno es particularmente relevante en las etapas iniciales del proceso, donde se registra el pico más alto de emisiones.

Asimismo, las emisiones de monóxido de carbono (CO) para esta cocina también son más críticas en el tiraje abierto, como lo reflejan los picos de concentración mucho mayores en comparación con el tiraje medio. Esto sugiere que el tiraje abierto, a pesar de su mayor flujo de aire, no proporciona las condiciones óptimas para una combustión completa en las etapas iniciales, lo que resulta en una producción elevada de CO. En contraste, el tiraje medio presenta menores concentraciones de CO, lo que indica una combustión más eficiente y controlada para este caso.

La mejor combustión observada en el tiraje medio está directamente relacionada con un flujo de aire más moderado, que optimiza la mezcla de oxígeno y combustible dentro del sistema. Esto no solo reduce las emisiones de CO, sino que también disminuye el arrastre de partículas, lo que contribuye a menores emisiones de material particulado.

Debido a que el análisis del material particulado durante el tiempo de la combustión en un equipo residencial no ha sido un enfoque común en investigaciones previas, la literatura disponible para realizar comparaciones directas es limitada. Sin embargo, se puede apreciar el comportamiento de las figuras que coinciden con el estudio [26], el cual indica que tanto el CO como el material particulado se producen principalmente en la fase temprana de la combustión. No obstante, una diferencia clave

radica en que, en dicho estudio, el máximo de material particulado se genera antes que en los ensayos realizados en este trabajo. Esta variación puede atribuirse a los distintos factores involucrados en cada estudio, como el método de carga de la madera, lo que influye en la dinámica de la combustión y la liberación de partículas.

## Conclusión

La implementación del sensor óptico permitió obtener información temporal detallada sobre el material particulado, algo que previamente no era posible mediante los métodos convencionales. Esta nueva capacidad permitió contrastar los datos del sensor óptico con los resultados obtenidos mediante el método isocinético. Los resultados fueron favorables, ya que se evidenció una buena correlación entre ambos métodos, lo que valida el uso del sensor óptico como una herramienta confiable para el monitoreo continuo del material particulado en el sistema evaluado.

Se identificó que la emisión máxima de material particulado ocurre entre los minutos 25 y 30 en el tiraje abierto, y entre los minutos 15 y 20 en el tiraje medio, siendo mayor en el tiraje abierto. Por otro lado, las emisiones máximas de CO se registran al inicio de la combustión, también con valores más altos en el tiraje abierto. Con base en estos resultados, se concluye que la mejor forma de operar la cocina Alcázar M-70 es en tiraje medio, ya que minimiza las emisiones de material particulado y CO.

En términos de temperatura, se observa que el tiraje abierto mantiene valores más altos a lo largo de todo el circuito de los humos, alcanzando un 31.4% más que en el tiraje medio. Por otro lado, la temperatura de los gases de salida en el tiraje medio ronda los 50 °C, lo que favorece la condensación de los gases, debido a la cercanía de la temperatura de rocío.

El modelo de tasa de quemado muestra una buena correlación entre los valores del modelo y los datos de los ensayos, obteniendo coeficientes de determinación  $R^2$  aceptables en las distintas etapas de la combustión. En particular, el caso más favorable se observa durante la etapa de ignición, donde se logra un error del 6.96%. Estos resultados validan el modelo propuesto y permiten cumplir con la hipótesis establecida.

Finalmente, se logró resolver el problema inicial, que consistía principalmente en observar el comportamiento del material particulado y verificar la viabilidad del dispositivo óptico. Además, se pudo desarrollar un modelo de tasa de quemado aceptable principalmente para la primera etapa de combustión.

## Referencias

- [1] Balance Nacional de Energía, «Energía Abierta,» 2022. [En línea]. Available: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>.
- [2] J. Rico, «Energías Renovables,» 30 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/la-mitad-de-la-madera-en-rollo-20181130>.
- [3] N. Huneus, «Contaminación por MP2,5 causa alrededor de 3.000 hospitalizaciones y cerca de 4.500 muertes al año,» 2020.
- [4] Ministerio del Medio Ambiente, «Informe RETC,» Región del Libertador Bernardo O´higgins, 2023.
- [5] R. Reyes, «Sistema de monitoreo del consumo de leña y otros biocombustibles sólidos,» Santiago, 2020.
- [6] CLEP, Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia, «Evaluación filtros de material particulado en cocinas a leña, una posible solución para mejorar la calidad del aire en Coyhaique,» Coyhaique, 2020.
- [7] B. H. P. Garcia y D. F. Gómez Lancheros, «Estudio para la reducción de emisiones de material particulado PM 10 y PM 2.5 en Ráquira Boyacá, asociado al sector alfarero y su incidencia en la salud de los habitantes,» Tunja, 2021.
- [8] Retrocatt, «PX ceroemisión,» 2024. [En línea]. Available: <https://purexhaust.com/productos-y-servicios/retrocatt/>.
- [9] R. Puentes, «Análisis comparativo de recuperadores de calor instalados en cocina a leña en términos de costos y emisiones.,» Concepción, 2024.
- [10] L. I. G. Gutiérrez, «Desarrollo de un sistema de medición de contaminación atmosférica basado en drone.,» 2016.
- [11] F. Ritcher, F. X.Jervis, X. Huang y G. Rein, «Effect of Oxygen on the Burning Rate of wood,» 2021.
- [12] N. Aguilera, «Modelo de tasa de quemado en equipos residenciales de combustión a leña,» 2024.

- [13] H. C. Kung, «A mathematical model of wood pyrolysis.,» 1972.
- [14] V. Novozhilov , B. Moghtaderi, D. Fletcher y J. Kent, «Computational fluid dynamics modelling of wood combustion.,» 1996.
- [15] M. Kanury, «Rate of burning of wood (a simple thermal model),» 2007.
- [16] F. Albini y E. Reinhardt, «Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels,» 1995.
- [17] J. Celis, J. Morales , C. Zaror y O. Carvacho, «Air pollution in a middle-size city: the case of Chillán (Chile)».
- [18] J. Jimenez, O. Farias, R. Quiroz y J. Yañez, «Emission factors of particulate matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, and levoglucosan from wood combustion in south-central Chile,» p. 8, 2017.
- [19] A. Calvo, L. Tarelho, C. Alves, M. Duarte y T. Nunes, «Characterization of operating conditions of two residential wood,» 2014.
- [20] J. Tissari , K. Hytonen, O. Sippula y J. Jokiniemi, «The effects of operating conditions on emissions from,» 2007.
- [21] M. Deng, S. Zhang, M. Shan, J. Li, J. Baumgartner, E. Carter y X. Yang, «The impact of cookstove operation on PM2.5 and CO emissions: A comparison of laboratory and field measurements\*,» 2018.
- [22] Departamento Técnico de Productos - Ministerio de Energía, «Protocolo de analisis y/o ensayos de seguridad de producto de leña y otros dendroenergéticos.,» Santiago, 2023.
- [23] Instituto de salud publica, «Determinación de las emisiones de particulas de calefactores a leña medidas desde un tunel de dilución.,» 2012.
- [24] MP ZERO, «MPZERO,» 2022. [En línea]. Available: [www.mpzero.cl](http://www.mpzero.cl).
- [25] Tren isocinético de método 5G, «Clean Air,» 2024. [En línea]. Available: [www.cleanair.com](http://www.cleanair.com).
- [26] Estación meteorológica Extech WTH600-KIT, «Promotec,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.promotec.cl/producto/estacion-meteorologica-extech-wth600-kit/>.
- [27] R. Ramirez y O. Farías, Modelación de la tasa de quemado en equipos residenciales de combustión a leña., Concepción, 2024.
- [28] Efficiency valuation organization, «Protocolo internacional de medida y verificación,» 2010.

- [29] Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de Concepción, «Apuntes del curso de Mediciones».
- [30] Unidad de Dendroenergía, Ministerio de Agricultura, «Antecedentes del sector de biomasa forestal para fines energéticos.,» Santiago, 2024.
- [31] L. P. E. B. Paul Gutmann, «Análisis químico de la madera de Eucalipto crecido en Chile.,» Santiago, 1971.
- [32] L. Craig, Introducción a Arduino, 2014.
- [33] H. Rinta, K. Dahal, J. Louhisalmi, H. Koponen, O. Sippula, K. Krepec y J. Tissari, The Effect of Wood Species on Fine Particle and Gaseous, 2024.
- [34] Arduino UNO, «ARDUINO.CL,» MCI electronics, 2024. [En línea]. Available: <https://arduino.cl/arduino-uno/>.
- [35] Plantower Technology, «Plantower,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.plantower.com/en/>.

# ANEXOS

## Anexo 1: Carta Gantt

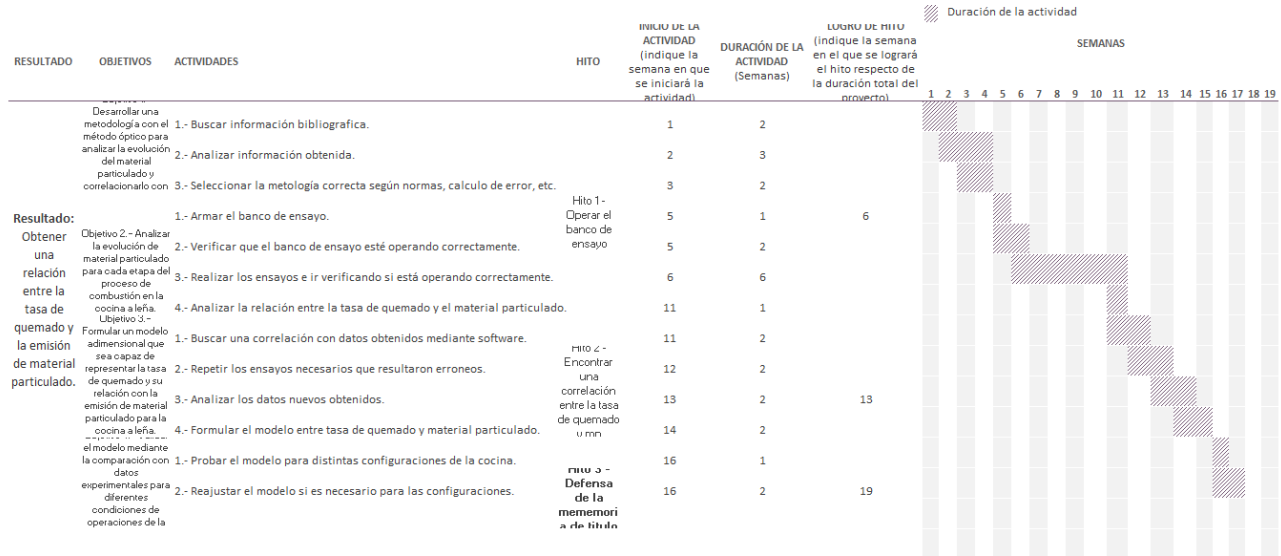


Figura 1: Carta Gantt del proyecto

## Anexo 2: Especificaciones técnicas del sensor PMS5003:

Tabla 11: Anexo 2 - Especificaciones técnicas sensor PMS5003

Parameter	Index	Unit
Particle Range of measurement	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	Micrometer (µm)
Particle Counting Efficiency	50%@0.3µm 98%@≥0.5µm	
Particle Effective Range (PM2.5 standard)	0~500	µg/m³
Particle Maximum Range (PM2.5 standard) *	≥1000	µg/m³
Particle Resolution	1	µg/m³
Particle Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)*	±10%@100~500µg/m3 ±10µg/m3@0~100µg/m3	
Particle Standard Volume	0.1	Litre (L)
Single Response Time	<1	Second (s)
Total Response Time	<10	Second (s)
DC Power Supply	Typ: 5.0 Min:4.5 Max:5.5	Volt (V)
Active Current	≤100	Milliamperere (mA)
Standby Current	≤10	Milliamperere (mA)
Interface Level	L<0.8 @3.3 H>2.7@3.3	Volt (V)
Working Temperature Range	-10~+60	°C
Working Humidity Range	0~99	
Storage Temperature Range	-40~+80	°C
MTTF	≥3	Year
Physical Size	50mm×38mm×21mm	mm

## Anexo 3: Programa Arduino

```

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pmsSerial.begin(9600);}
//Aquí se define un tipo de datos struct para almacenar los datos que se leerán del sensor PMS5003 y se declara una variable de ese
tipo//
struct pms5003data {
  uint16_t framelen;
  uint16_t pm10_estandar, pm25_estandar, pm100_estandar;
  uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;
  uint16_t particulas_03um, particulas_05um, particulas_10um, particulas_25um, particulas_50um, particulas_100um;
  uint16_t unused;
  uint16_t checksum;};
struct pms5003data data;
boolean readPMSdata(Stream *s) {
  if (!s->available()) { //Comprueba si hay datos disponibles para leer
    return false; }
  // busca el byte de inicio especial 0x42, que indica el inicio de un paquete de datos desde el PMS5003.
  if (s->peek() != 0x42) {
    s->read();
    return false; }
  // Leer el paquete de 32 bytes
  if (s->available() < 32) {
    return false; }
  uint8_t buffer[32];
  uint16_t sum = 0;
  s->readBytes(buffer, 32);
  //se calcula la suma de comprobación
  for (uint8_t i = 0; i < 30; i++) {
    sum += buffer[i]; }
  //Cambia formato de bytes altos primero (Big-endian).
  uint16_t buffer_u16[15];
  for (uint8_t i = 0; i < 15; i++) {
    buffer_u16[i] = buffer[2 + i * 2 + 1];
    buffer_u16[i] += (buffer[2 + i * 2] << 8); }
  // se copian los datos en una estructura de datos
  memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);

```

//se verifica que coincida con la suma de comprobación enviada en el paquete de datos para asegurarse de que los datos se han transmitido correctamente.

```
if (sum != data.checksum) {
    Serial.println("Checksum failure");
    return false; }
```

// se devuelve true para indicar que la lectura de los datos fue exitosa.

```
return true;}
```

```
void loop() {
```

```
if (readPMSdata(&pmsSerial)) {
    Serial.println("Unidades de Concentración (estándar)");
    Serial.println("PM 1.0: " + String(data.pm10_estandar));
    Serial.println("PM 2.5: " + String(data.pm25_estandar));
    Serial.println("PM 10: " + String(data.pm100_estandar));
```

```
Serial.println("Unidades de Concentración (ambiental)");
Serial.println("PM 1.0: " + String(data.pm10_env));
Serial.println("PM 2.5: " + String(data.pm25_env));
Serial.println("PM 10: " + String(data.pm100_env));
```

```
Serial.println("Particulas > 0.3um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_03um)); //conteos de partículas para diferentes tamaños
Serial.println("Particulas > 0.5um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_05um));
Serial.println("Particulas > 1.0um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_10um));
Serial.println("Particulas > 2.5um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_25um));
Serial.println("Particulas > 5.0um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_50um));
Serial.println("Particulas > 10.0 um / 0.1L aire:" + String(data.particulas_100um));
```

```
if (data.pm25_estandar < 12) {
```

```
    Serial.println("PM 2.5 Calidad Buena"); }
```

```
if (data.pm25_estandar >= 12 && data.pm25_estandar < 35) {
```

```
    Serial.println("PM 2.5 Calidad Moderada"); }
```

```
if (data.pm25_estandar >= 35 && data.pm25_estandar < 55) {
```

```
    Serial.println("PM 2.5 Calidad Mala"); }
```

```
if (data.pm25_estandar >= 55 && data.pm25_estandar < 150) {
```

```
    Serial.println("PM 2.5 Calidad Muy mala"); }
```

```
if (data.pm100_estandar < 55) {
```

```
    Serial.println("PM 10.0 Calidad Buena"); }
```

```
if (data.pm100_estandar >= 55 && data.pm100_estandar < 155) {
```

```
    Serial.println("PM 10.0 Calidad Moderada"); }
```

```
if (data.pm100_estandar >= 155 && data.pm100_estandar < 255) {  
  Serial.println("PM 10.0 Calidad Mala"); }  
if (data.pm100_estandar >= 255 && data.pm100_estandar < 355) {  
  Serial.println("PM 10.0 Calidad Muy mala"); } }
```