



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Modelo de tasa de quemado en equipos residenciales de combustión de leña

POR

Nicolás Ignacio Andrés Aguilera Maldonado

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:
Doctor Oscar Francisco Farías Fuentes
Profesor Co Patrocinante:
Ing. Magíster en ciencias Roberto Enrique Ramirez Menay

Marzo 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Nicolás Ignacio Andrés Aguilera Maldonado

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

Resumen

Este documento se centra en el desarrollo de un modelo matemático de la tasa de quemado para los equipos residenciales de combustión a leña que ayude a perfeccionar sus diseños y mejorar la comprensión que se tiene de los mismos. Para esto se desarrolló una metodología experimental la cual permite la repetibilidad de las experiencias de medición en el laboratorio, esto para analizar la relación que existe entre las variables operacionales y de diseño con la tasa de quemado.

Para formular un modelo es necesario tener una buena base de datos de forma que se puedan observar comportamientos característicos de las diferentes etapas de la combustión. Para esto, los datos son registrados dentro del laboratorio y luego se procesan para trabajar de forma adimensional las curvas de masa vs tiempo. A partir de las curvas obtenidas experimentalmente se realizaron subdivisiones separando por etapa de combustión, luego a cada división se le realizó una regresión lineal con la que se obtuvo la tasa de quemado adimensional para cada etapa. Con los datos ya procesados, estos se analizaron en busca de comportamientos característicos para cada configuración, se formula el modelo en el software EES el cual se encarga de aproximar una tasa de quemado para cada etapa. El modelo obtenido se logra aproximar al resultado con un error porcentual promedio del 26.9% para la tasa de quemado y un error porcentual promedio de 19.7% para la aproximación de la masa.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	ii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Glosario	vi
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Metodología.....	5
CAPÍTULO 2: Estado del Arte y marco teórico	6
2.1 Tasa de quemado	6
2.2 Etapas de la combustión	7
2.2.1 Características de las etapas de combustión	7
2.3 Factores que influyen en la tasa de quemado	9
2.3.1 Tiraje	9
2.3.2 Humedad de las astillas.....	10
2.3.3 Concentración de oxígeno.....	11
2.3.4 Temperatura a la que se expone la leña	12
CAPÍTULO 3: Análisis experimental	13
3.1 Descripción del banco de ensayos	13
3.1.1 Descripción de equipos.	13
3.1.2 Instrumentación.....	14
3.1.3 Protocolos y procedimiento.	16
3.1.4 Condiciones experimentales y parámetros de ensayo.....	17
3.2 Procesamiento de datos.	18
3.2.1 Criterios de selección de ensayos para ser validados.....	18
3.2.2 Criterios para definir las diferentes etapas de la combustión.	20
CAPÍTULO 4: Modelación tasa de quemado y validación.....	21
4.1 Modelo para la tasa de quemado	21
4.1.1 Formulación del modelo	21
4.1.2 Resultados de la regresión para el modelo.....	23
4.1.3 Implementación del modelo en EES.....	24

4.2 Tasas de quemado con dimensiones a partir de modelo adimensional	25
4.3 Validación del modelo.....	26
4.3.1 Influencia del tipo de cañón de evacuación de gases.....	26
4.3.2 Influencia del tiraje en el modelo.....	26
4.3.3 Estimación del error	27
CAPÍTULO 5: Conclusiones	28
Referencias	29
Anexo	32
A.1 Código software EES.....	32

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Aporte % de contaminantes, estimados según tipo de fuente emisora para Concepción Metropolitano (Fuente: [8]).....	3
Tabla 3.1: Resumen de condiciones y parametros de los ensayos.	17
Tabla 4.1: Resultados de regresión para diferentes condiciones de ensayo.....	23

Lista de Figuras

Figura 1.1: Consumo de energía por combustible del sector residencial del país (Fuente: [5])	1
Figura 1.2: Porcentaje de penetración del uso de la leña respecto del total de viviendas por región (Fuente: [4]).....	2
Figura 1.3: Pobreza energética a nivel regional (Fuente: [6]).....	2
Figura 2.1: Tasa de quemado a diferentes flujos de calor (Fuente [15]).....	6
Figura 2.2: Etapas de la combustión (Fuente: [17])	7
Figura 2.3: Etapas de la combustión para varios ensayos (Fuente: [18]).....	8
Figura 2.4: Etapas de la combustión y sus límites (Fuente: [19])	8
Figura 2.5: Etapas de la combustión y sus límites (Fuente: [20])	9
Figura 2.6: Tasa de quemado para mínimo tiraje (A) y máximo tiraje (B) (Fuente: [21])	9
Figura 2.7: Tasa de quemado para astillas con diferentes niveles de humedad (Fuente: [22]).....	10
Figura 2.8: Tiempos de consumo del 37% de cada muestra (Fuente: [22]).....	10
Figura 2.9: Influencia del oxígeno y flujo de calor en la combustión (Fuente: [15])	11
Figura 2.10: Tasas de quemado para diferentes concentraciones de oxígeno (Fuente: [23])	11
Figura 2.11: Mediciones de masa para diferentes temperaturas (Fuente: [14])	12
Figura 3.1: Cocina con termo cañón comercial (Fuente: [11])	13
Figura 3.2: Esquema termo cañón.....	14
Figura 3.3: Balanza de plataforma.....	14
Figura 3.4: Indicador Digital de Peso Programable LP-7516.....	15
Figura 3.5: Testo 350 y sonda.....	15
Figura 3.6: Ensayo con problemas.....	19
Figura 3.7: Ensayos bien realizados.....	19
Figura 3.8: Tasa de quemado y emisiones de CO.....	20
Figura 4.1: Ensayo característico de combustión en cocina.....	21
Figura 4.2: Ensayo con masa y tiempo adimensional de prototipo con TA.....	21
Figura 4.3: Esquema de la conversión adimensional.....	22
Figura 4.4: Modelo en software EES.....	24
Figura 4.5: Tasa de quemado real y tasa de quemado modelada.....	25
Figura 4.6: Curvas adimensionales de tasa de quemado (tiraje abierto).....	26
Figura 4.7: Tasas de quemado adimensional para el cañón simple (izquierda) y prototipo(derecha).	26
Figura 4.8: Análisis del error tasa de quemado.....	27
Figura 4.9: Análisis del error para la masa.....	27

Glosario

TA	:	Tiraje Abierto
TC	:	Tiraje Cerrado
TM	:	Tiraje Medio
TQ	:	Tasa de quemado
M	:	Masa
M*	:	Masa adimensional
ppm	:	Partes por millón
t	:	Tiempo
t*	:	Tiempo adimensional
t ₁ *	:	Tiempo fin etapa de encendido
t ₂ *	:	Tiempo fin etapa de combustión principal

Sub-indices

T	:	Total
enc	:	Encendido
lla	:	Llama
ago	:	agotamiento

Nomenclatura

CO	:	Monóxido de carbono
CO corr	:	Monóxido de carbono corregido
COVs	:	Compuestos orgánicos volátiles
MP10	:	Material particulado con diámetro menor o igual que 10 micrómetros
MP2.5	:	Material particulado con diámetro menor o igual que 2.5 micrómetros
NO _x	:	Óxidos de nitrógeno
SO _x	:	Óxidos de azufre

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

En muchas regiones del mundo aún se utiliza la combustión de sólidos como la leña para calefacción y cocina, siendo el sistema energético residencial más popular alcanzando un 40% de uso de la población a nivel mundial [1]. Un ejemplo, según un estudio en Estados Unidos aumentó entre un 50% y 150% el uso de leña para calefacción entre los años 2005 y 2012 [2]. Esto plantea desafíos en temas de deforestación, eficiencia energética y emisiones de gases contaminantes.

En Chile la combustión de leña, específicamente la leña húmeda, es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica por emisiones de material particulado, siendo la principal fuente de material particulado MP2.5 en las ciudades del sur de Chile, esto debido al uso excesivo de leña para calefacción de hogares[3].

Chile se encuentra en una situación ambiental preocupante debido al alto uso de leña en el país, teniendo una penetración en los hogares a nivel nacional de un 33,2% [4]. En la Figura 1.1 se representa el consumo de diferentes fuentes de energía para el año 2018 considerando el sector residencial del país, donde un 39,6% representa el uso de la leña [5]. Por otra parte, se sabe que el uso de la leña varía dependiendo de la zona del país en la que se encuentre, siendo las zonas más del centro y sur las que utilizan la leña en mayor medida, lo cual se puede apreciar en la Figura 1.2 [4] y Figura 1.3 [6].

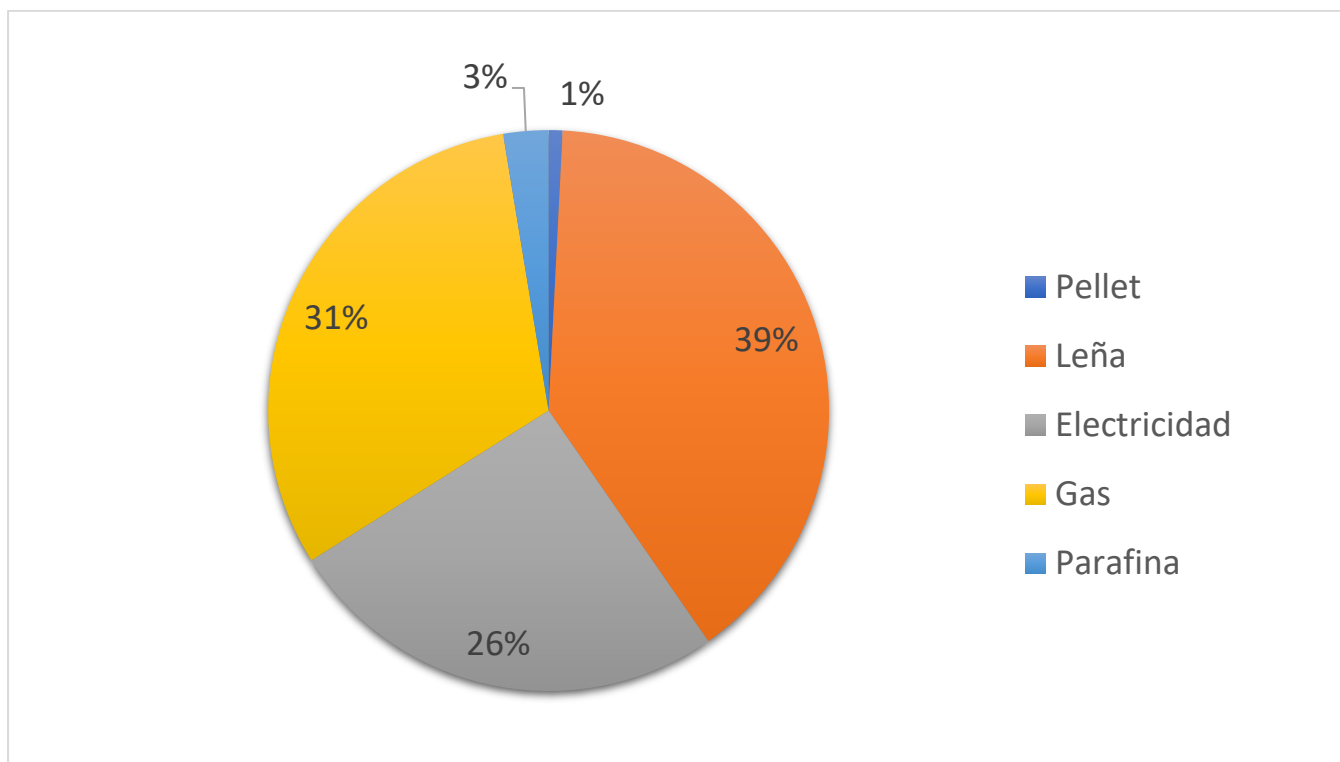


Figura 1.1: Consumo de energía por combustible del sector residencial del país (Fuente: [5])

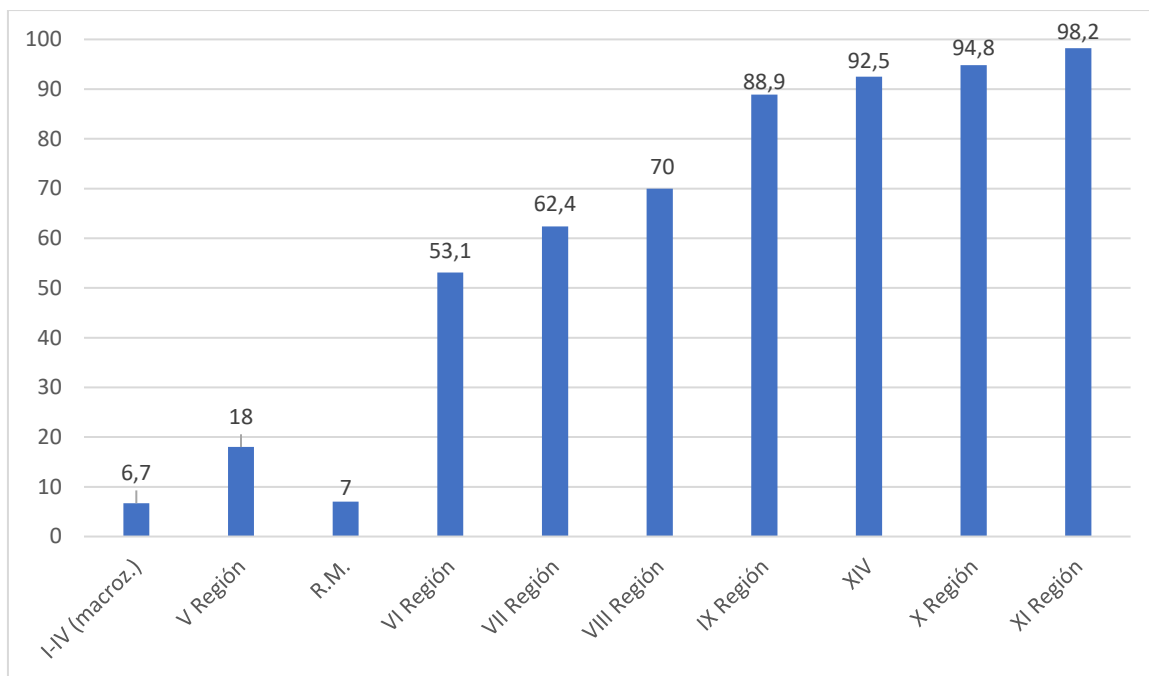


Figura 1.2: Porcentaje de penetración del uso de la leña respecto del total de viviendas por región (Fuente: [4])

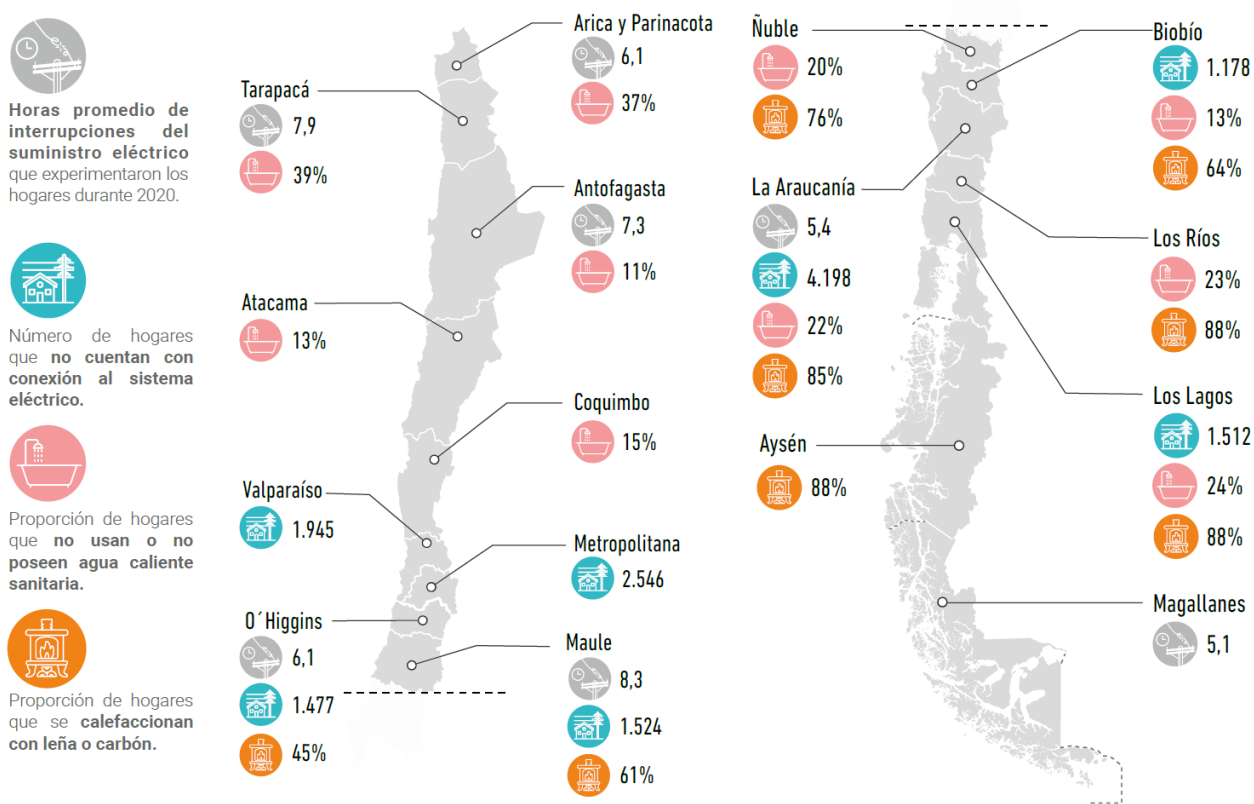


Figura 1.3: Pobreza energética a nivel regional (Fuente: [6])

Como se ha visto el uso de la leña en Chile es alto, lo que generó que ciertas ciudades de la zona Centro-Sur se encuentren con niveles de contaminación que sobrepasan los límites que define la norma de calidad ambiental, la principal causa de esta problemática es el uso de la leña húmeda para calefacción, contribuyendo con el 85% del total de emisiones de material particulado fino a nivel nacional [7], esto afecta significativamente la salud de la población y deteriora su calidad de vida. Es el caso del gran Concepción que como se puede ver en la Tabla 1.1 más del 40% del total de emisiones de material particulado del Concepción metropolitano son producto de la quema de leña [8], es por esto que en 2006 esta zona fue declarada zona latente por material particulado MP 10 [9] y en 2015 fue declarada como zona saturada por material particulado fino respirable MP 2.5 [10]

Tabla 1.1: Aporte % de contaminantes, estimados según tipo de fuente emisora para Concepción Metropolitano (Fuente: [8])

Fuentes	Porcentaje contaminante					
	MP10	MP2.5	SO _x	NO _x	CO	COV _s
Puntuales	43,8	45,8	75,5	29,7	51,3	6,3
Combustión residencial de leña	41,3	47,5	0,2	4,0	32,6	93,5
Móviles	4,3	4,8	7,6	65,1	11,2	0
Otras áreas	10,6	1,9	16,7	1,1	5	0,2

Una posible solución que toma fuerza dentro de la Universidad de Concepción, es la fabricación y validación de un prototipo de termo cañón que, a diferencia de los modelos comerciales existentes, posee un mayor número de pasos para los gases de combustión dentro del mismo termo cañón, lo que reduce significativamente la temperatura de salida de los gases y con esto se espera una reducción del material particulado emitido. Para esto se han desarrollado diferentes estudios dentro de la universidad como el de Cristóbal Vorphal el cual se enfocó en el diseño y modelado de un intercambiador de calor a condensación para recuperar calor residual de estufas a leña [11], y el estudio de Sebastián Gallardo el cual trata sobre la optimización de un equipo recuperador de calor de uso domiciliario [12].

Uno de los desafíos que se presenta en el ámbito de la validación, es que se requiere de un modelo computacional capaz de simular la operación del equipo, para esto se crea un grupo de trabajo donde se desarrollan diferentes partes del modelo, en este documento el enfoque está en estudiar y conocer las diferentes tasas de quemado de los equipos con las diferentes condiciones de operación existentes.

Para abordar este desafío se desarrolla una investigación que se enfoca en la creación de un modelo adimensional de la tasa de quemado de equipos residenciales de combustión a leña. Este modelo tiene como fin mejorar la comprensión de los procesos en los equipos y servir como herramienta para proponer posibles mejoras buscando optimizar el funcionamiento, reducir el consumo de leña y minimizar las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente.

A través de una combinación de pruebas experimentales y análisis teóricos, esta investigación busca contribuir a un uso más sostenible de la leña como fuente de energía en los hogares de Chile.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Caracterizar la tasa quemado cocinas a leña, a partir de un modelo adimensional que relacione dicho parámetro con variables operacionales de los equipos

Objetivos específicos

1. Desarrollar una metodología experimental para el análisis de la tasa de quemado en equipos de combustión de leña en función de las variables operacionales y de diseño
2. Formular un modelo adimensional que sea capaz de representar las tasas de quemado en diferentes condiciones de operación
3. Proponer un método de regulación de la tasa de quemado que mejore la eficiencia y reduzca emisiones
4. Validar el modelo mediante la comparación con datos experimentales y verificar su aplicabilidad en diferentes condiciones de operación

1.3 Hipótesis

La investigación se realiza con la hipótesis de que se obtendrá un modelo a partir de datos empíricos, que permita entregar una aproximación de la tasa de quemado con un error inferior al 5%, para posteriormente utilizar este modelo como una herramienta a fin de generar condiciones de borde para modelos computacionales más complejos.

1.4 Metodología

Para abordar esta investigación en primera instancia es necesario realizar una investigación bibliográfica de publicaciones e informes a fin de comprender cuales son las variables que pueden afectar la tasa de quemado en equipos residenciales de combustión a leña. De forma simultánea se deben llevar a cabo pruebas en el banco de ensayo mediante un protocolo establecido, registrando diferentes variables como son la masa del equipo, la composición de los gases de combustión y variadas temperaturas como la ambiental y la de la salida de los gases de combustión entre otras.

El banco de ensayos se compone de una cocina a leña montada sobre una balanza electrónica que registra la masa en un computador cada 10 segundos, además posee termo cuplas en diferentes posiciones, así como un analizador de gases modelo Testo 350.

Para los ensayos se establece un protocolo donde es necesario realizar una carga de encendido, luego una carga de pre-ensayo para luego dar paso a 3 ensayos que se realizan de forma consecutiva. Antes de cada carga de leña que se utilice se realiza un control de humedad y se registra la masa exacta de las astillas. Para la toma de datos se tiene un protocolo donde se conoce la carga de leña en kg, se registra la masa del equipo inicial y durante la combustión de la leña se mantiene un registro detallado de la variación de la masa.

Los datos obtenidos se analizan y procesan para obtener curvas adimensionales de tasas de quemado representativas de diferentes condiciones de operación del equipo, estas condiciones son: tiraje completamente abierto, tiraje en posición media y tiraje completamente cerrado. Estas curvas luego son interpoladas a fin de obtener una ecuación característica de una tasa de quemado.

Validar el modelo es un paso fundamental y para eso es necesario contrastar la predicción obtenida mediante el modelo con un ensayo realizado bajo condiciones controladas en el laboratorio.

CAPÍTULO 2: Estado del Arte y marco teórico

2.1 Tasa de quemado

En los equipos residenciales de combustión a leña se define la tasa de quemado como el consumo de masa de leña en el tiempo [13], sin embargo, esta se ve afectada por diferentes factores como son la humedad de las astillas, la concentración de oxígeno, la temperatura a la que se ve expuesta inicialmente, el tiraje, la forma y composición de cada astilla entre otros factores, como por ejemplo la especie de árbol e incluso la posición en la que se ubiquen las astillas puede influir en la tasa de quemado, complejizando de cierta manera su análisis [14]. Un ejemplo de lo variable que puede ser los resultados de la tasa de quemado se presenta a continuación en la Figura 2.1: donde se puede apreciar diferentes tasas de quemado para flujos específicos de calor, siendo un ejemplo claro de como la madera al estar sometida a una condición de calor constante presenta diferentes tasas de quemado [15].

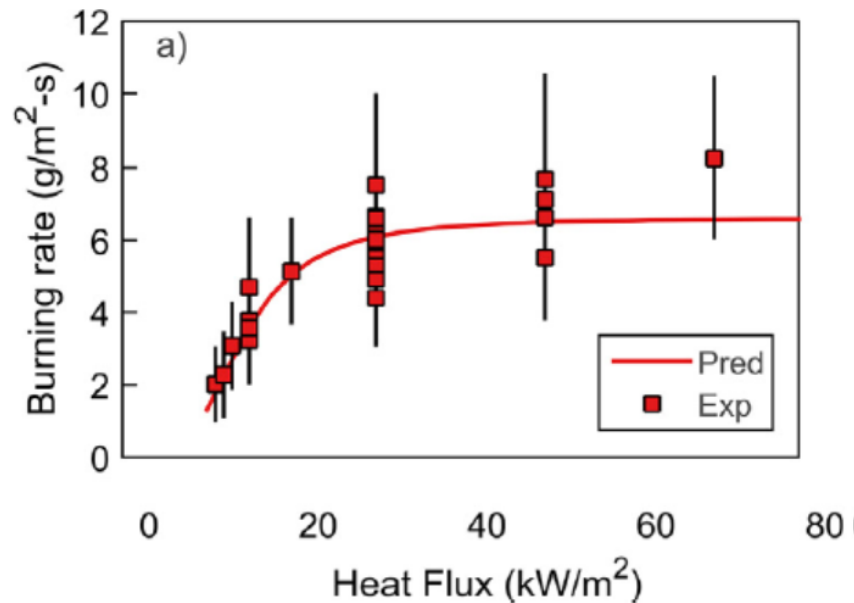


Figura 2.1: Tasa de quemado a diferentes flujos de calor (Fuente [15])

2.2 Etapas de la combustión

Usualmente la combustión de una astilla de leña se puede clasificar en 3 etapas principales: la primera corresponde a la etapa de ignición o encendido, luego la etapa de combustión principal donde existe una llama visible y por último la etapa de agotamiento o burnout [16][17][18], en la Figura 2.2 podemos apreciar las 3 etapas de la combustión y la tasa de quemado, donde la línea negra representa la leña y las demás líneas leña con diferentes aditivos aditivos.

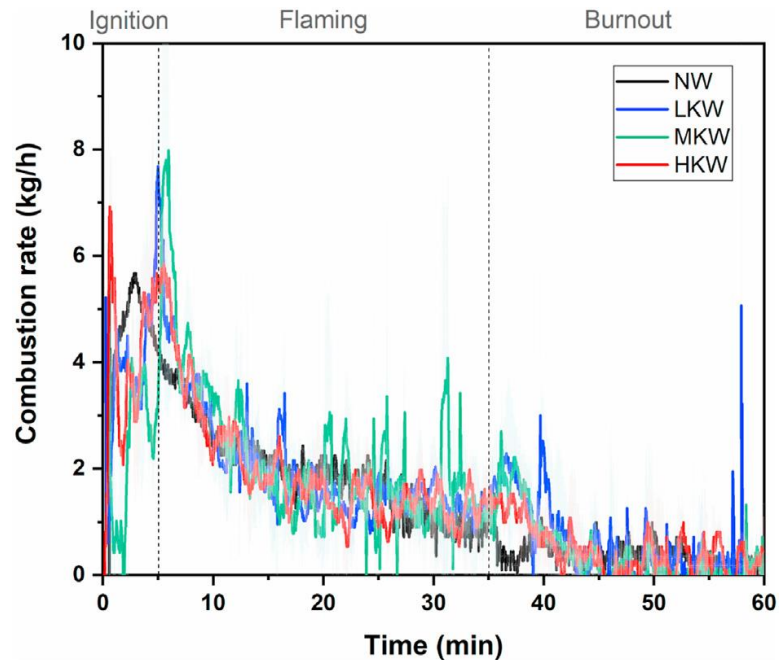


Figura 2.2: Etapas de la combustión (Fuente: [17])

2.2.1 Características de las etapas de combustión

La etapa de ignición o encendido comienza justo después de cargar la leña, esta se caracteriza por la alta tasa de quemado, un rápido incremento en la temperatura de la cámara de combustión y una alta emisión de productos de combustión incompleta como CO [17], además, es la etapa con menor tiempo de duración.

Seguidamente comienza la etapa de combustión principal donde existe una llama visible, como características de esta etapa tenemos, la tasa de quemado mayor que en las otras etapas por un estimado de un 37% [15], una combustión más completa y una menor emanación de humos visibles.

Finalmente, la última etapa dentro de la combustión es la etapa de burnout, donde se reduce significativamente la tasa de quemado y se ve un incremento en la emisiones de CO [16].

En la literatura se encontraron ejemplos de las características antes mencionadas representadas en gráficos donde además se muestran las etapas de la combustión, la Figura 2.3 muestra las etapas de la combustión para varios ensayos realizados en una cocina a leña [18], de manera similar la Figura 2.4 [19] y la Figura 2.5 [20] muestran las etapas de la combustión, la concentración de gases y donde se producen los cambios de cada etapa.

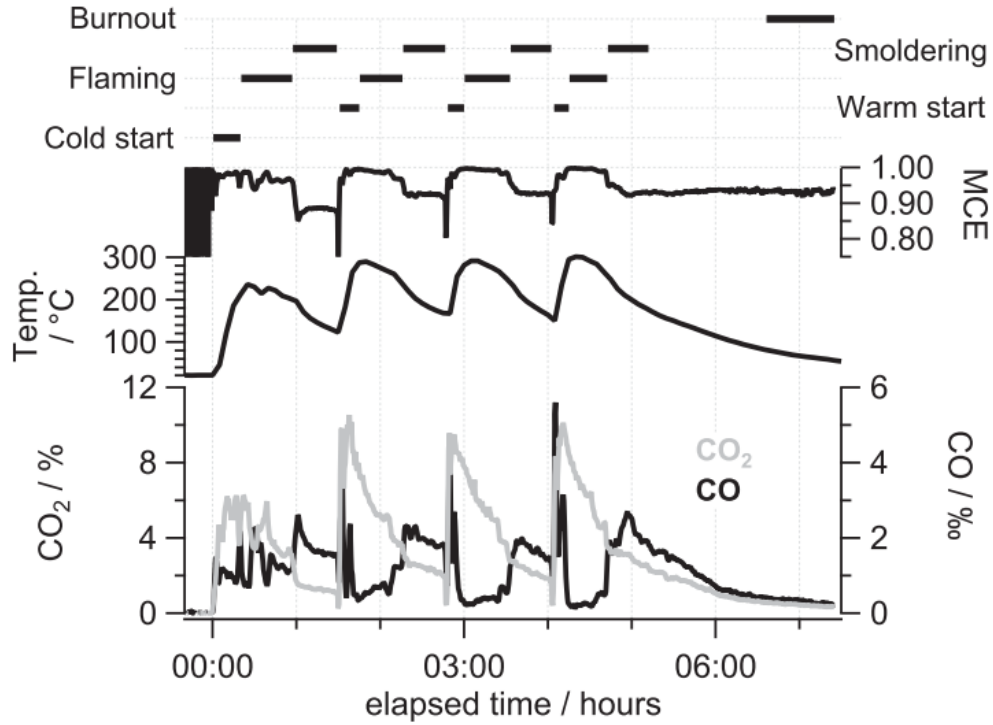


Figura 2.3: Etapas de la combustión para varios ensayos (Fuente: [18])

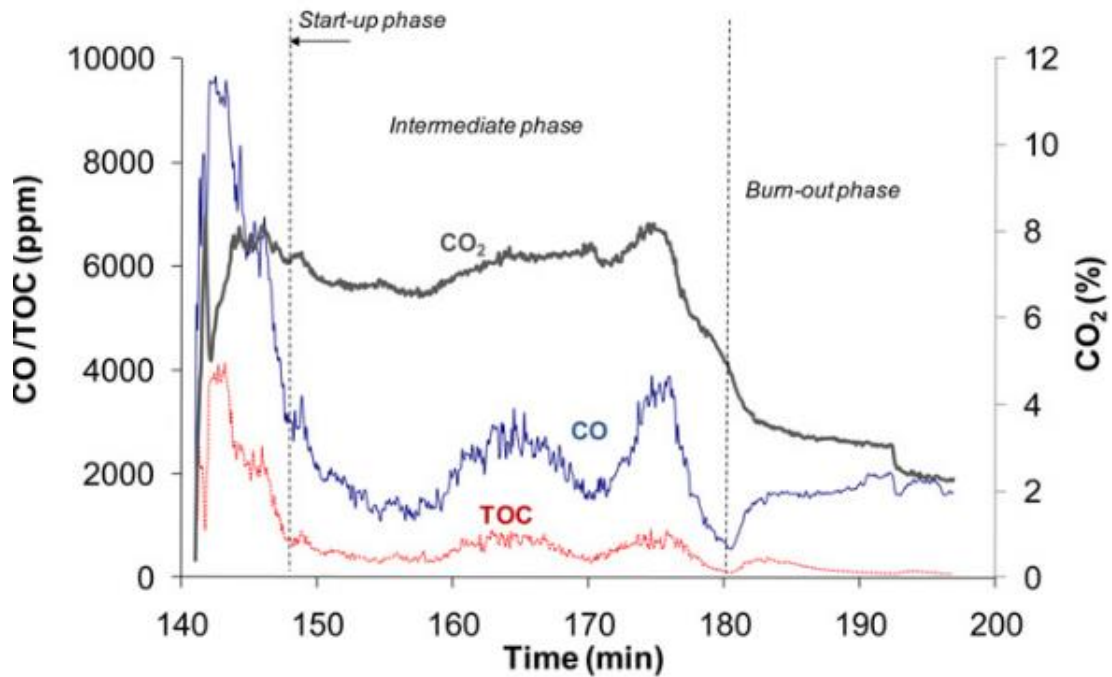


Figura 2.4: Etapas de la combustión y sus límites (Fuente: [19])

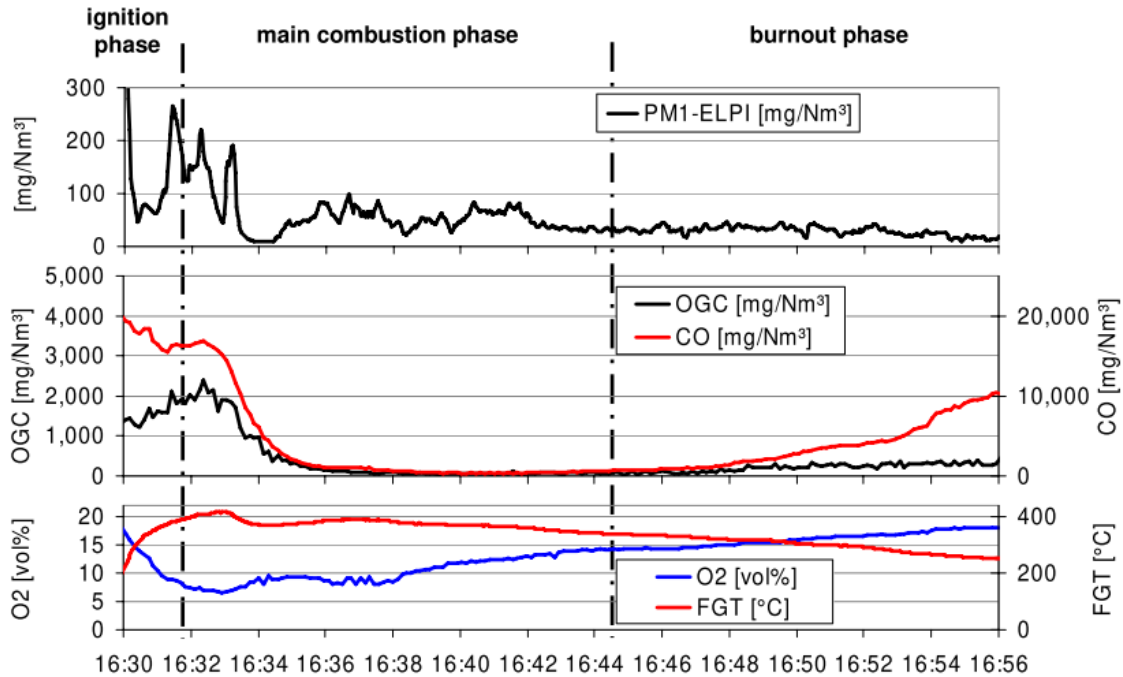


Figura 2.5: Etapas de la combustión y sus límites (Fuente: [20])

2.3 Factores que influyen en la tasa de quemado

2.3.1 Tiraje

Un factor que influye en la tasa de quemado es el tiraje, un estudio realizado en una estufa a leña donde se compara el tiraje máximo con el mínimo del equipo, siendo los valores de interés la línea con marcadores cuadrados (las otras líneas muestran la influencia de diferentes configuraciones de materiales porosos dentro de la cámara de combustión), Figura 2.6 [21]. Donde se puede apreciar que para las condiciones de mínimo tiraje (A), la masa se mantiene por más tiempo y es claro que el consumo de masa es más lento respecto a lo abrupto del máximo tiraje (B), donde se puede apreciar que la combustión es más rápida, lo que genera que todos los tiempos de las etapas de combustión sean menores.

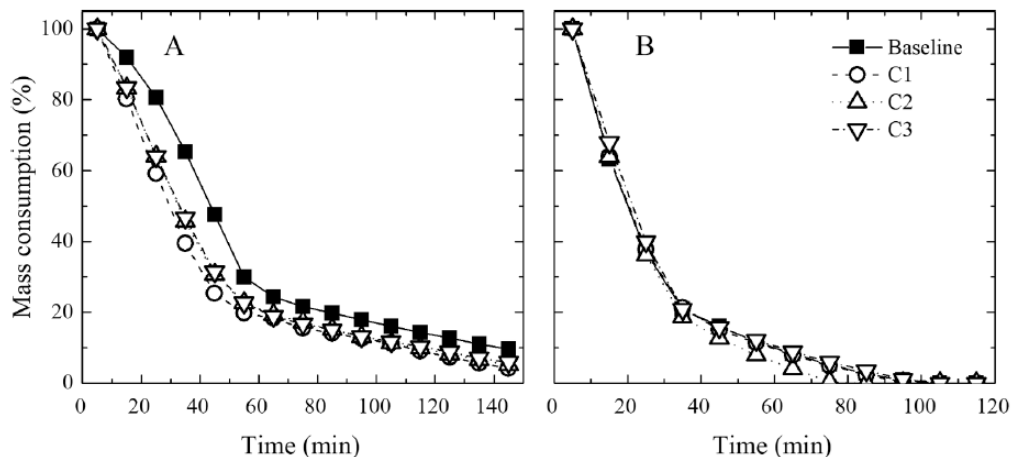


Figura 2.6: Tasa de quemado para mínimo tiraje (A) y máximo tiraje (B) (Fuente: [21])

2.3.2 Humedad de las astillas

Otro factor estudiado que afecta la tasa de quemado es la humedad de la astilla, siendo este un tema complejo de medir debido a que la humedad cambia en diferentes zonas de la misma astilla. La relación entre la humedad de la leña y su tiempo de combustión muestran lo que se esperaría, que al estar más seca se quema más rápido, pero la relación es mucho más compleja que solo eso. En un estudio realizaron pruebas con 2 especies y diferentes niveles de humedad donde consideraron: leña recién cortada con niveles de humedad mayor al 40% (FC), leña que fue almacenada y curada con niveles de humedad de entre un 25% a 35% (S), y por último leña secada en un horno con niveles de humedad esperados de menos del 20% (KD). Los resultados de las diferentes tasas de quemado del estudio se muestran en Figura 2.7 [22].

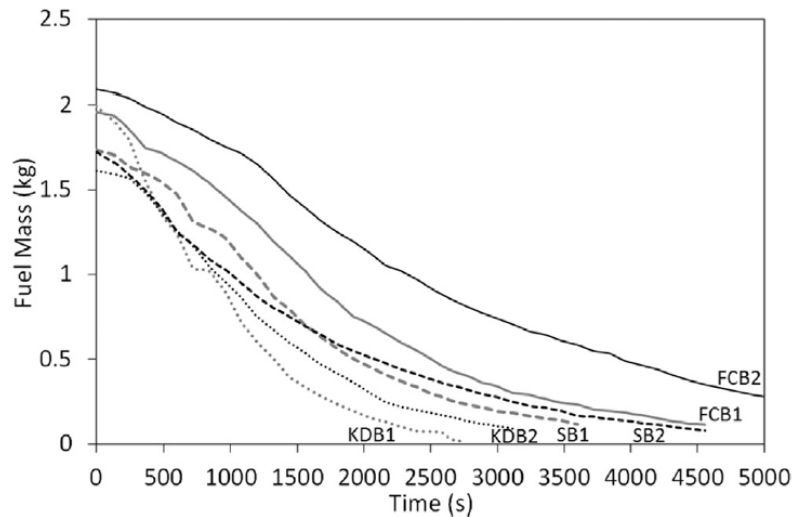


Figura 2.7: Tasa de quemado para astillas con diferentes niveles de humedad (Fuente: [22])

Dentro del mismo estudio compararon el tiempo para el cual se consume el 37% de la masa total de diferentes astillas con diferentes humedades Figura 2.8 [22], donde se puede apreciar que para los niveles bajos de humedad el tiempo es mucho menor.

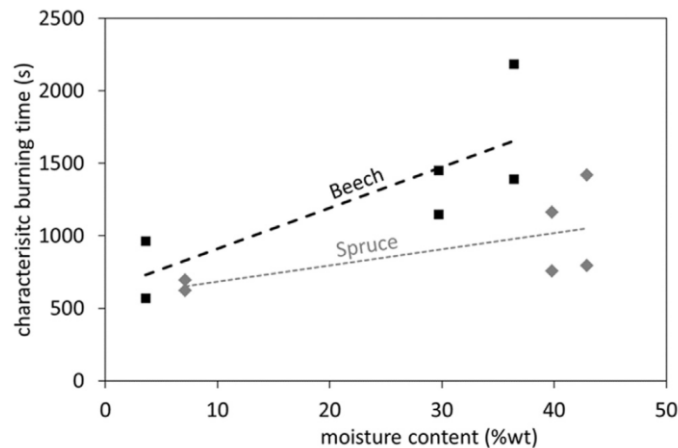


Figura 2.8: Tiempos de consumo del 37% de cada muestra (Fuente: [22])

2.3.3 Concentración de oxígeno

Continuando con factores que afectan la tasa de quemado se conoce que hay una relación con la concentración de oxígeno, pero existe cierta incertidumbre en el comportamiento de la ignición y el quemado frente a la concentración de oxígeno y flujo de calor, los cuales afectan significativamente la tasa de carbonización, el tiempo de ignición y la forma de combustión [15]. En el estudio se prueba que tableros de madera entran en pirolisis con concentraciones de oxígeno menor al 4%, combustión lenta entre el 4% y 15% y llameando sobre el 15%, todo esto a un flujo de calor de 30 kW/m² [15], además encontraron un triple punto de combustión donde una pequeña variación de un parámetro puede cambiar el tipo de combustión como se muestra en la Figura 2.9

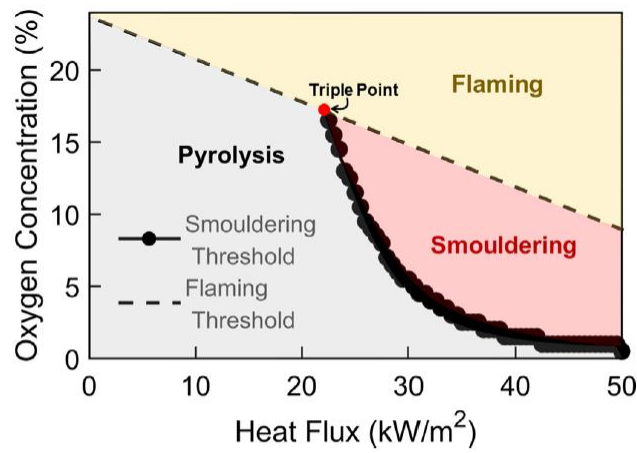


Figura 2.9: Influencia del oxígeno y flujo de calor en la combustión (Fuente: [15])

Un estudio realizado sobre el impacto de la concentración de oxígeno en la combustión de biomasa muestra que la tasa de quemado es afectada por la concentración de oxígeno de forma que, a menor concentración de oxígeno menor será la tasa de quemado y mayor será el tiempo de combustión, esto lo podemos apreciar mejor en la Figura 2.10 [23].

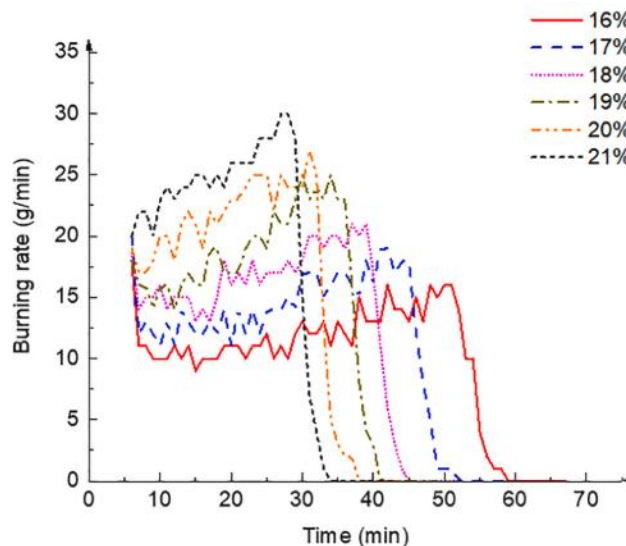


Figura 2.10: Tasas de quemado para diferentes concentraciones de oxígeno (Fuente: [23])

2.3.4 Temperatura a la que se expone la leña

Como se ha visto hasta ahora son varios los factores que afectan la tasa de combustión, pero no se puede dejar de lado otro factor de interés que es la temperatura a la cual se ve expuesta la leña, la cual afecta tanto los tiempos de las diferentes etapas como su tasa de quemado, esto lo podemos ver en la Figura 2.11 [14]. Donde es claro que a mayores temperaturas menor es el tiempo de la combustión y por lo tanto mayor es la tasa de quemado.

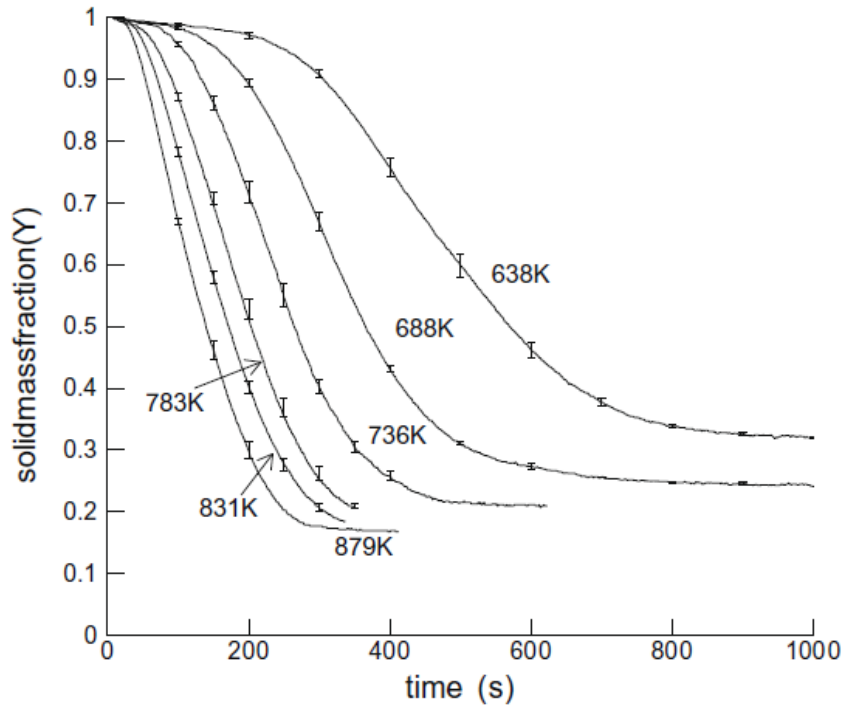


Figura 2.11: Mediciones de masa para diferentes temperaturas (Fuente: [14])

CAPÍTULO 3: Análisis experimental

3.1 Descripción del banco de ensayos

3.1.1 Descripción de equipos.

El banco de ensayos se encuentra ubicado en las instalaciones del laboratorio de termofluidos del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Concepción, este consta de una cocina a leña a la cual se le modificó el cañón convencional por termo cañones, uno comercial y uno prototipo, en la Figura 3.1 se presenta una imagen referencial de la cocina con el termo cañón comercial montado. Este tiene la capacidad de calentar agua aprovechando los gases de combustión provenientes de la cocina, se muestra un esquema de instalación en la Figura 3.2.



Figura 3.1: Cocina con termo cañón comercial (Fuente: [11])

El termo cañón al cual se refiere como prototipo, fue estudiado y desarrollado por la Universidad de Concepción, este cuenta con un novedoso sistema de tuberías el cual con la ayuda de un dámper permiten dirigir el flujo de los humos de combustión a través de dos posibles caminos, uno el camino directo diseñado para un mayor tiraje y una menor permanencia de humos en el sistema utilizado en la etapa de encendido de la cocina, y un segundo camino que aumenta la permanencia de los humos en el sistema haciendo que el humo pase por un recorrido de 3 pasos, primero de forma ascendente, luego descendente y finalmente ascendente de nuevo para salir del sistema.

El cañón simple se define como el cañón que viene de fabrica con cualquier equipo comercial y no tiene la posibilidad de calentar agua, ni recircular el flujo de combustión.

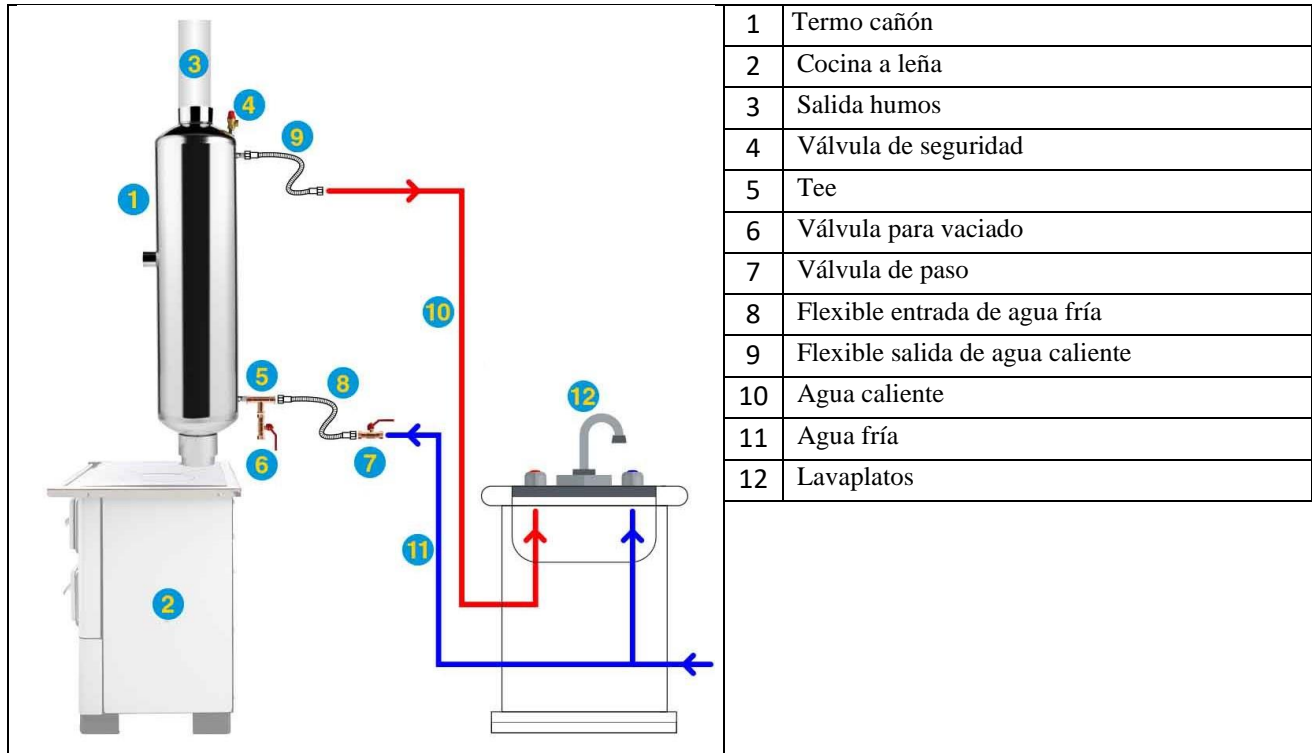


Figura 3.2: Esquema termo cañón.

3.1.2 Instrumentación.

Para realizar una medición precisa de la tasa de quemado es fundamental llevar el control preciso del peso del sistema, esto se lleva a cabo mediante el empleo de una balanza tipo plataforma ubicada debajo de la cocina. Esta balanza permite cuantificar la variación en el peso del sistema causada por el proceso de combustión de la leña. Para este propósito, se ha seleccionado una balanza de plataforma similar a la mostrada en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Balanza de plataforma.

La balanza de plataforma está conectada a un indicador de peso programable LP-7516, Figura 3.4. Este dispositivo no solo digitaliza las mediciones de la balanza, sino que también ofrece una interfaz programable que facilita la visualización y registro preciso de los datos. La capacidad de programación

y registro del indicador de peso, resulta crucial para adaptarse a los requisitos específicos de la investigación, permitiendo una efectiva adquisición de datos.



Figura 3.4: Indicador Digital de Peso Programable LP-7516.

Esta instrumentación garantiza la obtención de datos fiables y en tiempo real, contribuyendo significativamente a la calidad y precisión de las mediciones durante el proceso experimental. La combinación de la balanza de plataforma y el indicador de peso programable no solo simplifica la recolección de datos, sino que también respalda y da robustez del proyecto.

Para ser capaz de separar y diferenciar las diferentes etapas de la combustión es necesario el análisis de los gases de combustión, para esto se emplea el testo 350 en conjunto con una sonda especial para la medición de gases de combustión Figura 3.5, los datos medidos por el testo 350 son registrados digitalmente mediante el uso de software de la misma marca, instalado en un computador el cual está conectado al testo 350.



Figura 3.5: Testo 350 y sonda.

3.1.3 Protocolos y procedimiento.

En el marco de la metodología experimental, se establecen protocolos y procedimientos para la realización de ensayos. Estos ensayos se realizan para los tres tipos de cañón antes mencionados (Cañón simple, Termo cañón comercial y Termo cañón prototipo) realizando variaciones en sus condiciones de operación, tales como, diferentes tirajes principales ya sea tiraje abierto, medio o cerrado, además se puede variar la apertura del tiraje secundario o rejilla, así como la circulación del agua en los termo cañones. Para cada jornada de medición se realizaron ensayos manteniendo la misma condición de operación.

En primera instancia, se prepara la leña en forma de astillas, las cuales son sometidas a una medición de humedad en diferentes puntos, estas mediciones se promedian y se registran meticulosamente, además de forma simultánea se mide y registra la masa exacta de las astillas.

El inicio de una jornada de experimentación implica el encendido de la cocina a leña, permitiendo que esta alcance una temperatura adecuada. A continuación, se realiza una carga adicional de leña para lo que denominamos “pre-ensayo”. Esta carga tiene una masa similar a la que se utilizara en los ensayos principales. Cuando esta carga ha generado una cama de brasas del orden del 10%-20% de la masa inicial, se procede a una nueva carga para dar inicio al primer ensayo. Al alcanzar una masa donde se reestablece la cama de brasas inicial, se lleva a cabo una nueva carga de astillas para dar inicio al segundo ensayo, replicando las condiciones del primero tanto como sea posible. Este proceso se repite para el tercer ensayo, registrando la masa de manera consistente. Finalmente, cuando se vuelve a la cama de brasas inicial, se considera el ensayo concluido.

Durante los ensayos, se registra la masa total de la cocina utilizando una balanza conectada a un computador. Además, se analizan los gases de la combustión utilizando el testo 350. Este registro continuo permite capturar la variación en la masa debido a la combustión y la variación en la composición de los gases de combustión, proporcionando los elementos necesarios para obtener la tasa de quemado y sus diferentes etapas como resultado. Este enfoque sistemático garantiza la recopilación precisa de datos y obtención de resultados para el análisis subsiguiente.

3.1.4 Condiciones experimentales y parámetros de ensayo.

Los ensayos fueron realizados procurando mantener condiciones experimentales similares, con el objetivo de que los ensayos sean comparables unos a otros. Las condiciones de los diferentes ensayos se muestran resumidas en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Resumen de condiciones y parámetros de los ensayos.

Cocina			Combustible		Ambiente		
Tipo de cañón	Tiraje	Número del ensayo	Masa [kg]	Humedad [%]	Temp. [°C]	Presión [hPa]	Humedad [%]
Cañón simple	Abierto	1	2.18	15,8	16.8	1015	65
		2	2.17	16,5	17.2	1014	63.5
		3	2.22	17.3	17.4	1014	62
	Medio	1	2.22	12.9	14.9	1018	63.5
		2	2.08	13.9	15.6	1017	63.5
		3	2.08	13.7	15.8	1012	64
	Cerrado	1	2.26	14.4	15	1001	75
		2	2.15	15.1	15.9	1001	74
		3	2.25	14.8	16.7	1001	72
Termo cañón comercial	Abierto	1	2.20	13.5	16.4	1017	71
		2	2.39	13.2	16.6	1016	71
		3	2.25	13.1	16.7	1016	70.5
	Medio	1	2.22	10.7	15.8	1020	64
		2	2.32	12.1	16.2	1020	65
		3	2.39	12.1	16.4	1020	65.5
	Cerrado	1	2.37	13.5	17.9	1019	64
		2	2.38	12.6	18.0	1019	64
		3	2.47	13.2	18.3	1018	63.5
Termo cañón prototipo	Abierto	1	2.37	10.7	17.8	1020	62
		2	2.35	14.4	17.9	1020	62.5
		3	2.23	11.6	18.1	1020	61.5
	Medio	1	2.40	12.8	17.2	1008	70
		2	2.37	11.8	17.7	1008	70
		3	2.43	11.4	17.9	1007	70.5
	Cerrado	1	2.16	11.3	19	1017	48.5
		2	2.14	11.4	19.6	1016	48
		3	2.24	11.1	20	1016	49.5

3.2 Procesamiento de datos.

Una vez realizados los ensayos se recuperan los datos recopilados por el computador, se realiza un preprocesamiento para eliminar posibles irregularidades y valores atípicos. Con los datos depurados, se procede a analizar lo obtenido en los ensayos principales.

Para cada ensayo, se generan gráficos de masa en kilogramos vs tiempo en segundos, permitiendo una visualización clara de la evolución del proceso de combustión. Luego, se realiza una normalización de los datos para trabajar de forma adimensional o en porcentaje. La masa de la leña registrada se divide por la masa total de la carga, donde se define una masa adimensional $M^* = M/M_{total}$. De manera análoga, el tiempo registrado se divide por el tiempo total, estableciendo un tiempo adimensional $t^* = t/t_{total}$.

Estos datos adimensionales, M^* y t^* , se representan gráficamente y se estudia su comportamiento contrastando con los niveles de los gases de combustión, específicamente el nivel del monóxido de carbono, el cual como se mencionó anteriormente, se utiliza como marcador para poder definir las diferentes etapas de la combustión. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de regresión para ajustar curvas que se adecuen a los puntos del gráfico M^* vs t^* , donde se definen los puntos de cambio de etapa por los tiempos característicos t_1^* y t_2^* , donde t_1^* se encuentra donde se produce una disminución importante de monóxido de carbono y t_2^* se encuentra donde el monóxido de carbono comienza a aumentar nuevamente. El objetivo de este análisis es generar modelos que se aproximen a la operación real de la cocina, facilitando la comprensión de la combustión y proporcionando herramientas para futuras predicciones y optimizaciones. Este análisis debe ser llevado a cabo con una rigurosa interpretación de los resultados experimentales para poder contribuir al desarrollo de modelos que logren capturar la dinámica del proceso en estudio.

3.2.1 Criterios de selección de ensayos para ser validados.

Para encontrar los ensayos que describen de mejor manera el comportamiento de la cocina se seleccionaron ensayos válidos para ser estudiados, utilizando criterios de selección basados en la forma de las curvas de la tasa de quemado, descartando ensayos con comportamientos atípicos o que hayan sufrido algún tipo de intervención ya sea humana o falla técnica. A continuación, se describe un proceso de selección de un ensayo válido para un día de ensayos específico, para el resto de días de ensayo y selección de ensayos válidos se sigue un proceso similar.

En primer lugar, se realiza una inspección de los datos muestreados de la masa, donde en primera instancia se grafican los valores adimensionales y por inspección visual se detectan anomalías un ejemplo de esto se observa en Figura 3.6 siendo un ejemplo de un ensayo con problemas y Figura 3.7 un ejemplo de ensayos que se comportan de manera similar.

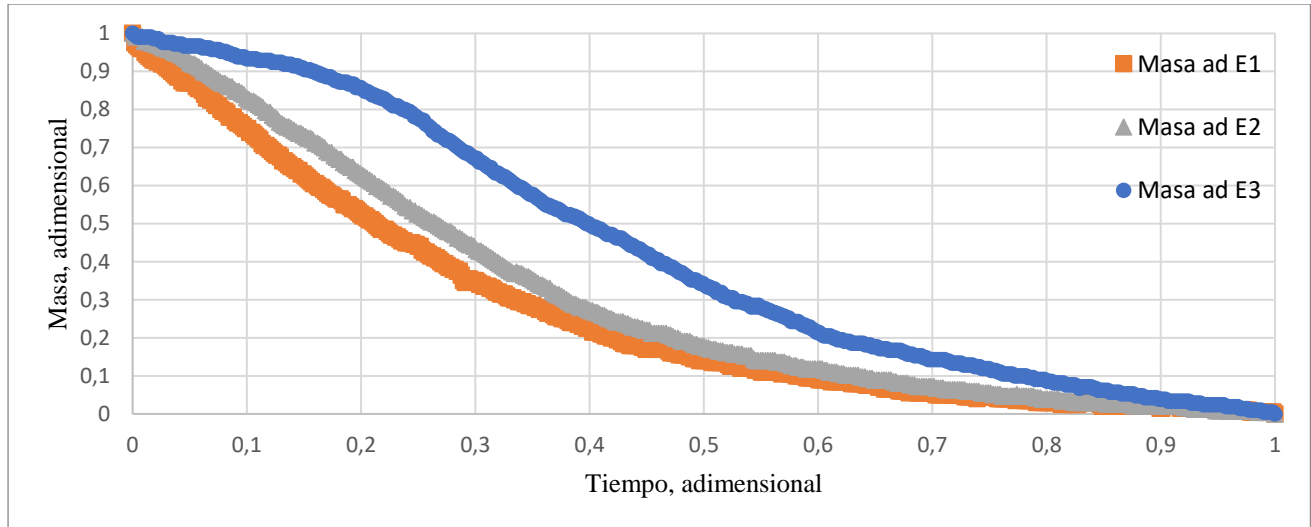


Figura 3.6: Ensayo con problemas.

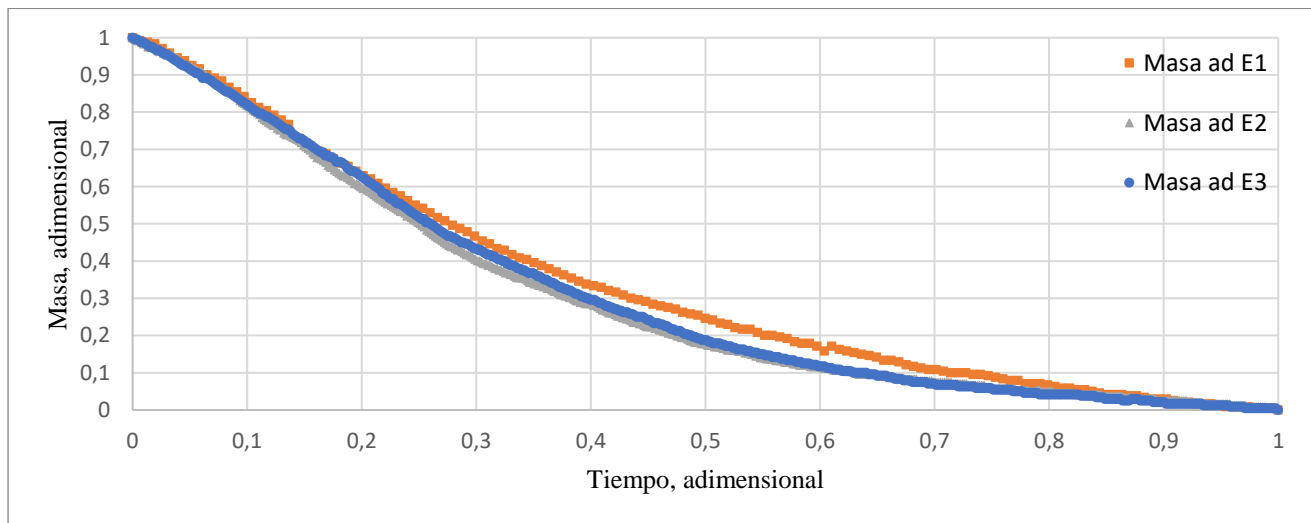


Figura 3.7: Ensayos bien realizados

3.2.2 Criterios para definir las diferentes etapas de la combustión.

Con el objetivo de generar un modelo capaz de describir de manera adecuada la combustión en sus diferentes etapas, es de utilidad conocer los tiempos en los que se dan, para esto se desarrollan criterios con los cuales poder definir en que punto de la combustión existe un cambio de etapa y como reconocerlo. Para esto se utiliza el monóxido de carbono como marcador para los cambios de etapa se manera similar a como se realiza en los estudios [18][17][20]. Como se mencionó antes, la primera etapa definida como etapa de ignición o encendido, se tiene una alta tasa de quemado acompañada de una alta generación de monóxido de carbono debido a la combustión incompleta de la leña, luego en la etapa de combustión principal o de llama visible la generación de monóxido de carbono disminuye significativamente, finalmente para la etapa de burnout el monóxido de carbono aumenta nuevamente y la tasa de quemado es la más baja de la combustión. En la Figura 3.8 podemos ver un ejemplo de un ensayo donde los puntos amarillos representan el monóxido de carbono y la línea azul la masa adimensional.

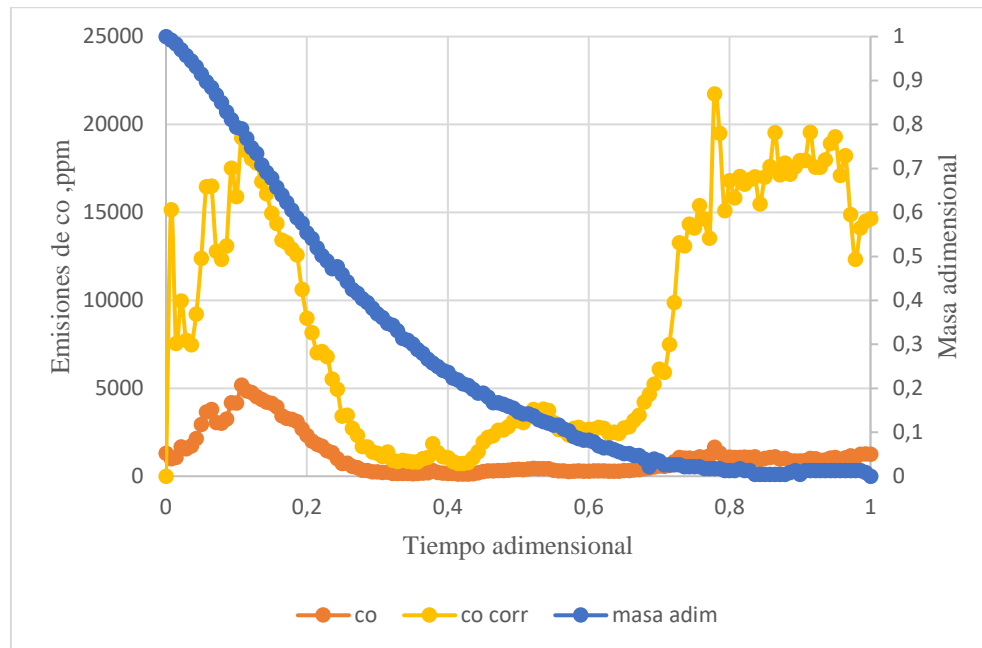


Figura 3.8: Tasa de quemado y emisiones de CO.

CAPÍTULO 4: Modelación tasa de quemado y validación

4.1 Modelo para la tasa de quemado

4.1.1 Formulación del modelo

Para formular el modelo de la tasa de quemado, se realizaron una serie de ensayos bajo condiciones controladas con el objetivo de obtener resultados comparables y significativos. Estos ensayos se realizaron de acuerdo a un protocolo establecido para garantizar la consistencia de los datos recopilados. Una vez que se tienen los datos de los ensayos se procede a realizar un análisis adimensional de los datos, tal como se describe en la sección 3.2 de este documento. La Figura 4.1 muestra un gráfico donde se puede apreciar la tasa de quemado en kg y luego la Figura 4.2 muestra el mismo ensayo, pero con la masa y el tiempo adimensionales.

Posteriormente, se seleccionaron los ensayos más representativos de cada configuración experimental y se procedió a separar la tasa de quemado en sus 3 etapas utilizando el monóxido de carbono como marcador. Esta división por etapas facilito un análisis más detallado de la variación de la tasa de quemado a lo largo del proceso de combustión.

Para cada etapa de la combustión se realizó una regresión lineal. Esta regresión lineal proporciono una aproximación adimensional de la tasa de quemado para cada etapa, permitiendo la formulación de un modelo matemático que describe la relación entre la tasa de quemado y los efectos producidos por un diferente cañón y un diferente tiraje.

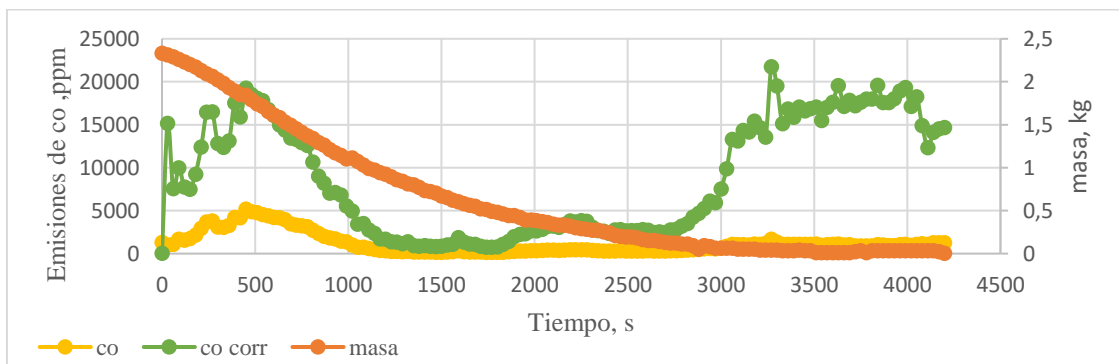


Figura 4.1: Ensayo característico de combustión en cocina.

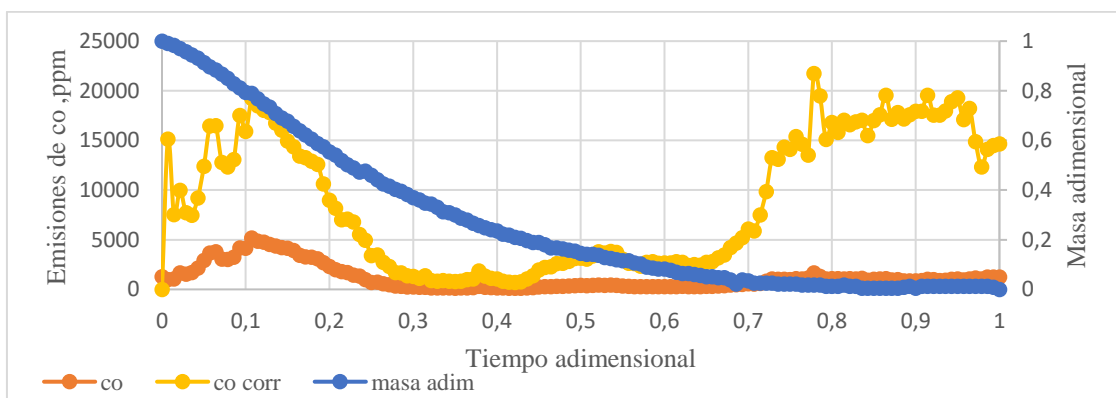


Figura 4.2: Ensayo con masa y tiempo adimensional de prototipo con TA.

Un esquema de cómo se realizó la conversión de dimensional a adimensional se presenta en la Figura 4.3.

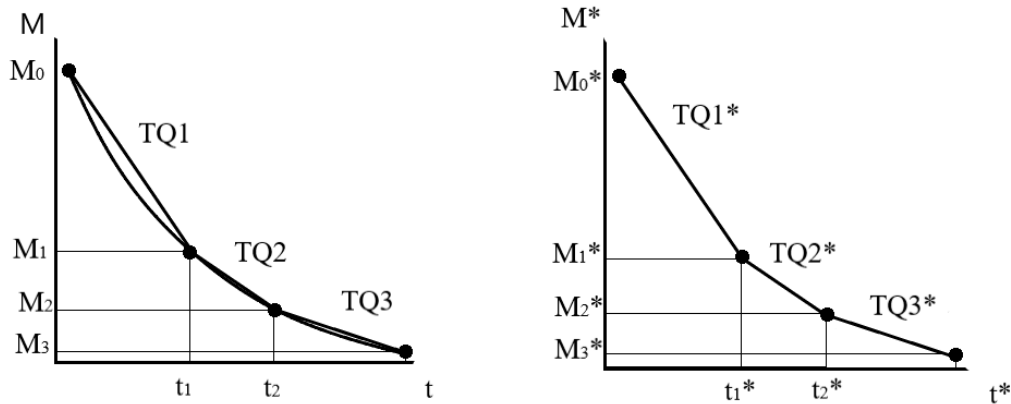


Figura 4.3: Esquema de la conversión adimensional.

Donde se cumple que $M^* = \frac{M}{M_T}$ y $t^* = \frac{t}{t_T}$, además se tiene que la pendiente, que es la tasa de quemado, se puede relacionar por medio de la siguiente ecuación, $TQ_1 = (M_1 - M_0)/(t_1 - t_0)$, donde podemos reemplazar por los valores adimensionales quedando como segué.

$$TQ_1 = (M_1^* * M_T - M_0^* * M_T)/(t_1^* * t_T - t_0^* * t_T)$$

Factorizando por M_T y t_T nos queda: $TQ_1 = \frac{(M_1^* - M_0^*)}{(t_1^* - t_0^*)} * \frac{M_T}{t_T}$

Siendo $\frac{(M_1^* - M_0^*)}{(t_1^* - t_0^*)}$ 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.

4.1.2 Resultados de la regresión para el modelo.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos a partir de las regresiones lineales de los datos adimensionales

Tabla 4.1: Resultados de regresión para diferentes condiciones de ensayo.

	Ensayo N°	Etapas de la combustión, tasa de quemado adimensional y R2						Tiempo t ₁ * cambio de etapa	Tiempo t ₂ * cambio de etapa	Tiempo total [s]	Masa total [kg]	
		encendido	R ²	Llama visible	R ²	burnout	R ²					
cañón simple	Tiraje abierto	1	3,26	0,9982	1,23	0,9683	0,12	0,912	0,12	0,56	4290	2,21
		2	2,16	0,9863	1,43	0,9912	0,32	0,9173	0,17	0,5	4290	2,11
		3	2,44	0,9943	1,45	0,9836	0,29	0,8732	0,11	0,5	4290	2,3
	Tiraje medio	1	2,44	0,9978	1,46	0,9811	0,29	0,9632	0,11	0,5	4830	2,38
		2	2,54	0,995	1,31	0,9863	0,46	0,9782	0,1	0,46	3540	2,08
		3	3	0,9869	1,26	0,955	0,45	0,9842	0,05	0,5	4230	2,1
	tiraje cerrado	1	1,5	0,9993	1,1	0,9922	0,46	0,9812	0,19	0,75	2790	2,05
		2	1,64	0,9972	1,72	0,9947	0,53	0,9057	0,11	0,36	6360	2
		3	1,66	0,9933	1,3	0,9786	0,22	0,9705	0,13	0,66	4500	2,33
Termo cañón comercial	Tiraje abierto	1	2,29	0,9785	1,43	0,9865	0,32	0,9151	0,21	0,67	5550	2
		2	1,86	0,9968	1,58	0,985	0,34	0,9465	0,14	0,5	4800	2,36
		3	0,65	0,9847	1,63	0,9936	0,51	0,9899	0,18	0,46	4890	2,1
	Tiraje medio	1	1,94	0,9973	0,94	0,9831	0,46	0,9886	0,3	0,75	2820	2,11
		2	2,24	0,9975	1,39	0,9732	0,38	0,986	0,22	0,53	4140	2,37
		3	2,28	0,9982	1,4	0,9775	0,36	0,9665	0,21	0,5	4410	2,38
	tiraje cerrado	1	1,89	0,9972	0,82	0,9801	0,35	0,9855	0,23	0,4	4620	2,4
		2	2,09	0,9963	1,28	0,9806	0,29	0,9716	0,19	0,49	5220	2,42
		3	1,9	0,9992	1,4	0,9883	0,34	0,9423	0,2	0,6	5220	2,4
Termo cañón prototipo	Tiraje abierto	1	1,66	0,9834	1,03	0,9935	0,65	0,9717	0,22	0,52	3030	2,65
		2	2,6	0,9907	1,16	0,9719	0,32	0,9048	0,16	0,5	4020	2,15
		3	2,33	0,9977	0,92	0,9566	0,05	0,3741	0,24	0,71	4200	2,33
	Tiraje medio	1	1,06	0,9937	1,13	0,997	0,9	0,9984	0,2	0,48	3270	1,67
		2	2,28	0,9987	1,39	0,9783	0,33	0,9777	0,17	0,5	6510	3,06
		3	2,36	0,9987	1,42	0,9847	0,46	0,9778	0,1	0,44	5880	2,54
	tiraje cerrado	1	1,39	0,998	1,01	0,9768	0,55	0,993	0,37	0,66	4230	2
		2	1,29	0,9982	0,95	0,9985	0,48	0,9921	0,53	0,75	3960	2,31
		3	1,85	0,9963	0,92	0,9823	0,28	0,9833	0,35	0,63	5130	2,59

4.1.3 Implementación del modelo en EES

El modelo se realizó en el software EES y utiliza como variables de entrada el tipo de cañón, el tiraje y la masa total de la carga de leña y es capaz de generar la curva de tasa de quemado adimensional con los tiempos característicos de cada etapa, así como la tasa de quemado de cada etapa para estimar la tasa de quemado real, en la Figura 4.4 se presenta una foto de como se ve el modelo en EES.

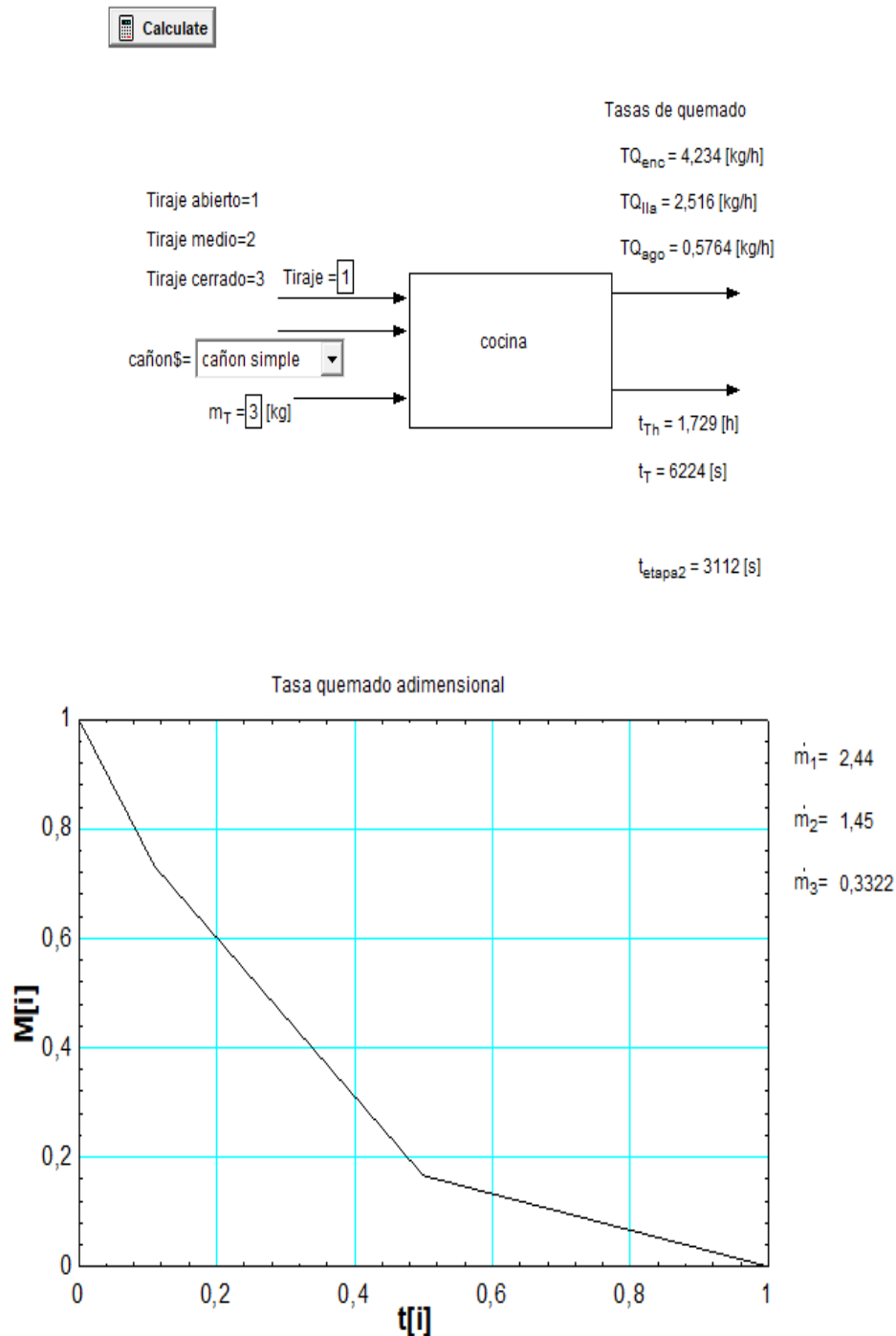


Figura 4.4: Modelo en software EES.

4.2 Tasas de quemado con dimensiones a partir de modelo adimensional

Para obtener las tasas de quemado con dimensiones a partir del modelo adimensional, es necesario conocer la masa total que será utilizada y el tiempo total que se demore en su combustión. El modelo tiene como entrada la masa total o inicial de la leña. Para el caso del tiempo total de combustión se utiliza una estimación en base a los tiempos registrados experimentalmente y la masa inicial, esta estimación suele ser un poco inexacta debido a la variedad de tiempos de combustión registrados donde no se detecta una relación clara entre tiempo de combustión y masa total.

Para obtener las tasas de quemado adimensionales se define el tipo de cañón, el tiraje y la masa total, con esto el modelo es capaz de entregar una aproximación de cómo será la tasa de quemado de forma adimensional. Para obtener las tasas de quemado con dimensiones es necesario utilizar el factor de conversión $\frac{M_T}{t_T}$ para obtener las tasas de quemado reales a partir de las adimensionales. Una comparación de la tasa de quemado medida y la tasa de quemado modelada se puede ver en la Figura 4.5.

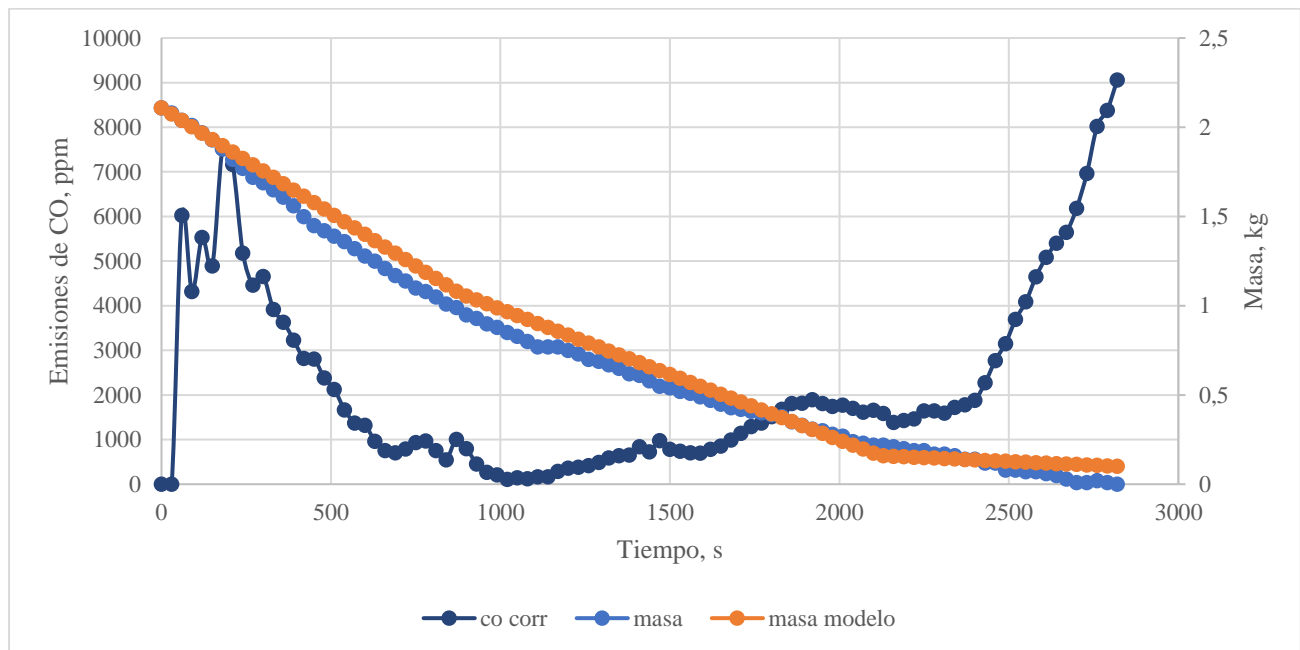


Figura 4.5: Tasa de quemado real y tasa de quemado modelada.

4.3 Validación del modelo

4.3.1 Influencia del tipo de cañón de evacuación de gases.

La validación del modelo es un paso crucial para determinar la utilidad y precisión de las aproximaciones que entrega. En este contexto, se llevó a cabo un análisis de los modelos generados para los diferentes tipos de cañones bajo la misma condición de tiraje abierto con el fin de evaluar su desempeño y precisión. En la Figura 4.6 se presentan las curvas adimensionales para cada cañón con tiraje abierto, se logra apreciar que el comportamiento de la etapa de burnout es bastante similar lo que podría indicar que esta etapa no depende del tipo de cañón, además podemos observar que el comportamiento de las primeras 2 etapas para el cañón simple y el termo cañón se comportan de manera muy similar, esto puede ser producto de la geometría interna de los cañones que es similar.

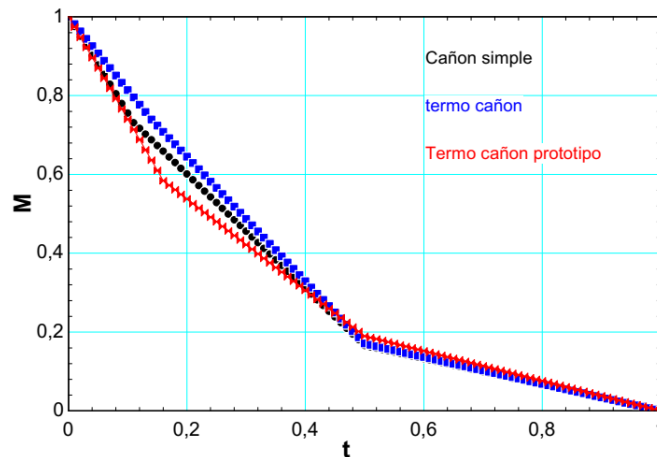


Figura 4.6: Curvas adimensionales de tasa de quemado (tiraje abierto).

4.3.2 Influencia del tiraje en el modelo.

Al analizar los resultados obtenidos de los ensayos de la Tabla 4.1 se encontró que el comportamiento para la condición de tiraje cerrado es muy variable lo que dificulta definir un comportamiento característico para esta condición. Esto se puede apreciar en la Figura 4.7 donde la línea roja corresponde a la condición de tiraje cerrado, la cual tiene un comportamiento muy variable lo que dificulta la formulación de un modelo preciso para esta condición.

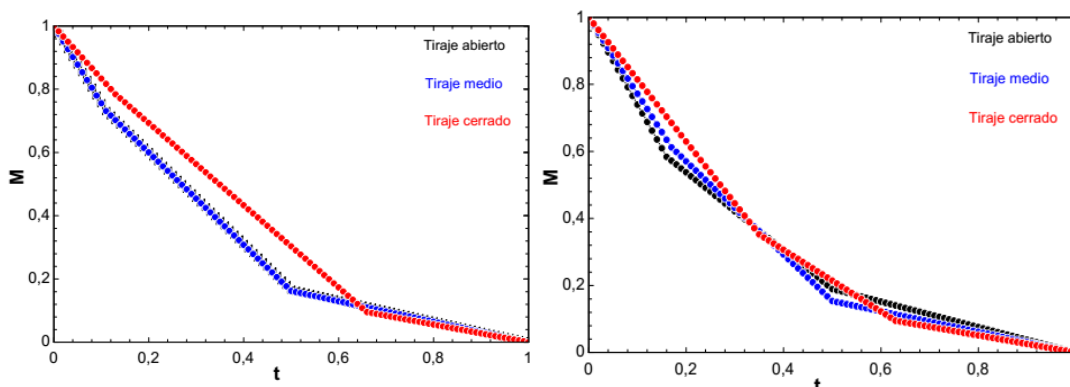


Figura 4.7: Tasas de quemado adimensional para el cañón simple (izquierda) y prototipo (derecha).

4.3.3 Estimación del error

Para estimar el error, en primera instancia se calculó la tasa de quemado real de un ensayo característico, luego se generó un modelo para las mismas condiciones de tiraje y cañón, obteniendo las tasas de quemado aproximadas, una comparación de ambas tasas de quemado la podemos apreciar en la Figura 4.8. De forma similar, se grafica la masa del ensayo y la masa entregada por el modelo, esto lo podemos apreciar en la Figura 4.9.

posteriormente se calcula la diferencia entre el valor entregado por el modelo y el valor real para cada punto, con lo cual se estimó el error mediante la siguiente ecuación donde X es el valor real y \bar{X} su valor aproximado por el modelo.

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_n - \bar{X}_n|}{X_n}$$

Para el caso de la tasa de quemado, se obtuvo un valor de error porcentual promedio de $E=26.5\%$. Para la aproximación de la masa se tiene un error porcentual promedio $E=19.7\%$

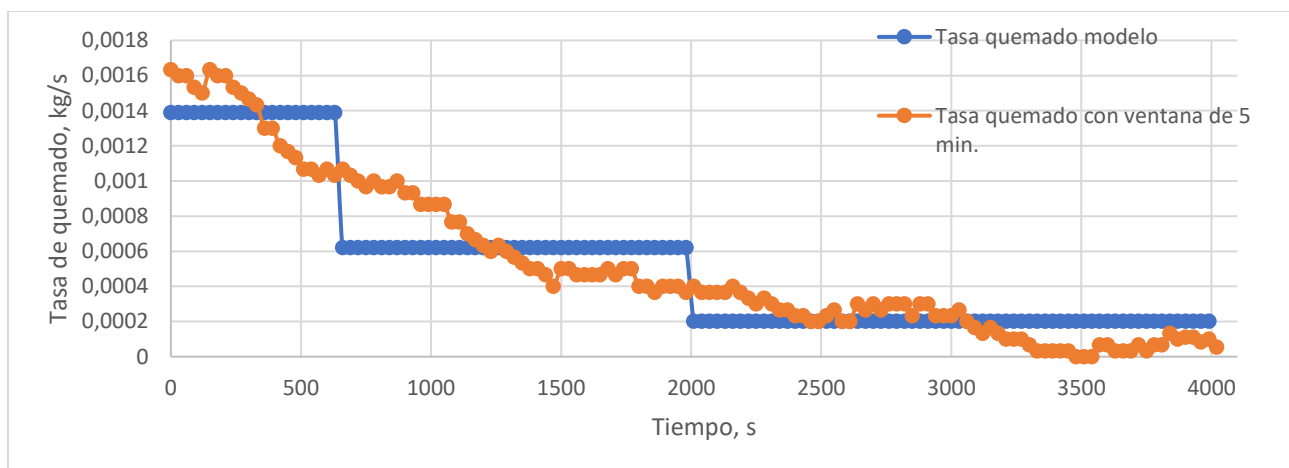


Figura 4.8: Análisis del error tasa de quemado.

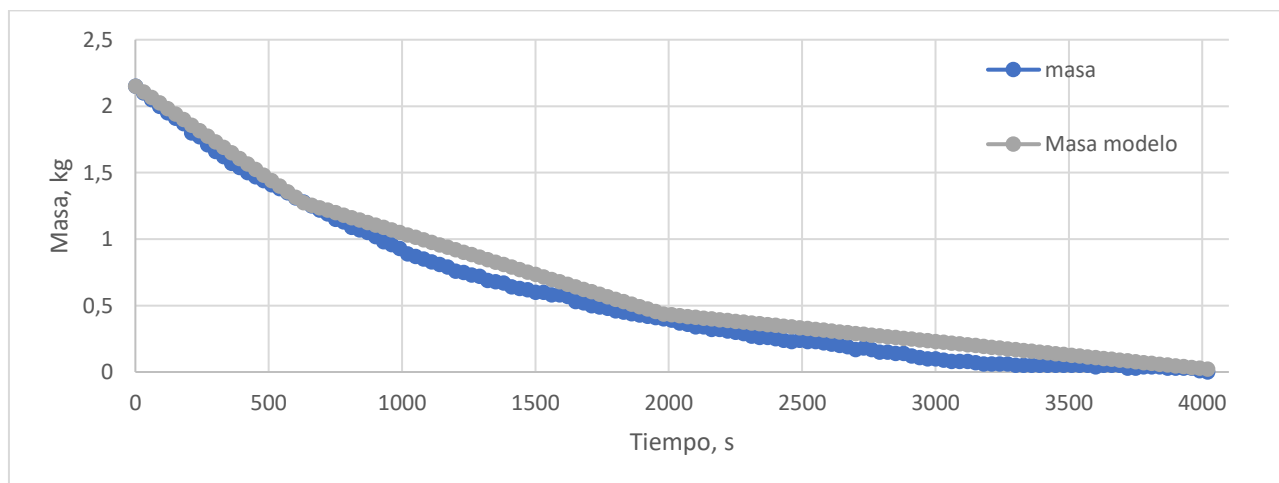


Figura 4.9: Análisis del error para la masa.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

El modelo es capaz de representar la tasa de quemado en diferentes condiciones de operación, sin embargo, el modelo tiene limitantes, para la condición de tiraje cerrado la cocina tuvo un comportamiento errático por lo cual no se pudo determinar un comportamiento característico de tiraje cerrado.

la aproximación de la tasa de quemado tiene un error porcentual promedio del 26.9%, sin embargo, la aproximación del comportamiento de la masa en el tiempo tiene un error porcentual promedio de 19.7%. Por lo que se considera que es una buena aproximación para describir el comportamiento de la masa a lo largo de la combustión.

Para la reducción de emisiones se propone que la recarga con leña sea en un momento en el cual la temperatura del hogar de la cocina no sea demasiado baja, en otras palabras, que aun exista una buena cantidad de brasas, esto con el fin de mejorar la combustión en la primera etapa, buscando mejorar la eficiencia y reducir las emisiones.

Para trabajos futuros queda desarrollada una metodología experimental para el análisis de la tasa de quemado que abarca desde la medición y recolección de datos hasta el posterior procesamiento de los mismos.

Referencias

- [1] R. L. Carvalho, O. M. Jensen, y L. A. C. Tarelho, “Mapping the performance of wood-burning stoves by installations worldwide”, *Energy Build.*, vol. 127, pp. 658–679, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.010.
- [2] M. Koraiem y D. Assanis, “Wood stove combustion modeling and simulation: Technical review and recommendations”, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 127, n° August, p. 105423, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105423.
- [3] M. de M. A.-G. de Chile, “Guía de calidad del aire y educación ambiental”, *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 1, pp. 1–104, 2018.
- [4] Ministerio de Energía de Chile y C. C. de la Construcción, “MEDICIÓN DEL CONSUMO NACIONAL DE LEÑA Y OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DERIVADOS DE LA MADERA”, 2015.
- [5] C. Yáñez O, A. Fissore Sch, y A. Leiva G, “Informe Final Uso de la Energía Hogares Chile 2018”, 2019. [En línea]. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf.
- [6] C. Amigo, F. Hidalgo, y J. Andrade, “Una mirada multidimensional a la pobreza energética en Chile”, *Red Pobr. Energ.*, vol. reporte N, 2022.
- [7] Ministerio de Energía de Chile, “Estrategia de Transición Energética Residencial”, *Def. y pérdida*, 2020, doi: 10.31819/9783964565945-toc.
- [8] SICAM Ingeniería LTDA., “Actualización del inventario de emisiones atmosféricas de Concepción Metropolitano”, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.cpcbiobio.cl/wp-content/uploads/2016/04/Resumen-Ejecutivo.pdf>.
- [9] Ministerio del Medio Ambiente, T. Norma, E. N. Materia, y D. E. G. Municipal, “Decreto 41”, *Biblioteca del Congreso Nacional*. pp. 2–4, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=1079432&f=2015-07-14&p=>.
- [10] Ministerio del Medio Ambiente, “Decreto 15”, *Bibl. del Congr. Nac.*, pp. 2–4, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.leychile.cl/N?i=1079432&f=2015-07-14&p=>.
- [11] C. I. Vorpal, “Diseño y modelado de un intercambiador de calor a condensación de recuperación de calor residual de una estufa a leña para agua caliente sanitaria”, 2023.
- [12] S. Gallardo, “Optimización de un Equipo Recuperador de Calor para uso Domiciliario”, 2022.

- [13] 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”, vol. 2247, 2017, doi: 10.1080/10962247.2017.1295114.
- [14] W. C. Park, A. Atreya, y H. R. Baum, “Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis”, *Combust. Flame*, vol. 157, n° 3, pp. 481–494, 2010, doi: 10.1016/j.combustflame.2009.10.006.
- [15] F. Richter, F. X. Jervis, X. Huang, y G. Rein, “Effect of oxygen on the burning rate of wood”, *Combust. Flame*, vol. 234, p. 111591, 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111591.
- [16] A. Anca-Couce *et al.*, “Single large wood log conversion in a stove: Experiments and modelling”, *Renew. Energy*, vol. 143, n° 2019, pp. 890–897, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.065.
- [17] Y. Du, W. Lin, y P. Glarborg, “Particulate emissions from a modern wood stove – Influence of KCl”, *Renew. Energy*, vol. 170, pp. 1215–1227, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.048.
- [18] F. Fachinger, F. Drewnick, R. Gieré, y S. Borrmann, “How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions”, *Atmos. Environ.*, vol. 158, pp. 216–226, 2017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.027.
- [19] L. S. Båfver, B. Leckner, C. Tullin, y M. Berntsen, “Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n° 8, pp. 3648–3655, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.05.027.
- [20] M. Field, T. L. Seamster, M. Lopez, R. J. Thomas, y W. W. Leroy, “PRIMARY MEASURES FOR LOW-EMISSION RESIDENTIAL WOOD COMBUSTION – COMPARISON OF OLD WITH OPTIMISED MODERN SYSTEMS”, n° May, pp. 1–6, 2001.
- [21] F. Guerrero, A. Arriagada, F. Muñoz, P. Silva, N. Ripoll, y M. Toledo, “Particulate matter emissions reduction from residential wood stove using inert porous material inside its combustion chamber”, *Fuel*, vol. 289, n° December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119756.
- [22] A. Price-Allison *et al.*, “Emissions performance of high moisture wood fuels burned in a residential stove”, *Fuel*, vol. 239, n° August 2018, pp. 1038–1045, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.11.090.
- [23] M. Deng, Y. Nie, Y. Yuan, R. Ma, M. Shan, y X. Yang, “The impact of oxygen content in the primary air supply on fuel burning rate and pollutant emissions in

a forced-draft biomass stove”, *Fuel*, vol. 321, n° x, p. 124129, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124129.

Anexo

A.1 Código software EES

```
procedure Masa (t[1..101];Tiraje;cañon$;m_T:M;p_enc;p_lla;p_ago;t_1;t_2;t_T)
```

```
$Arrays on
```

```
p_enc=Lookup(cañon$;Tiraje;'E1')
```

```
p_lla=Lookup(cañon$;Tiraje;'E2')
```

```
"p_ago=Lookup('pp';i;'E3')"
```

```
if cañon$='cañon simple' then
```

```
t_1=Lookup('tiempo CS';Tiraje;'t*')
```

```
t_2=Lookup('tiempo CS';Tiraje;'t**')
```

```
else
```

```
if cañon$='termo cañon' then
```

```
t_1=Lookup('tiempo TC';Tiraje;'t*')
```

```
t_2=Lookup('tiempo TC';Tiraje;'t**')
```

```
else
```

```
if cañon$='cañon prototipo' then
```

```
t_1=Lookup('tiempo PR';Tiraje;'t*')
```

```
t_2=Lookup('tiempo PR';Tiraje;'t**')
```

```
endif
```

```
endif
```

```
endif
```

```
M_0=1
```

```
M_1=-p_enc*t_1+1
```

```
M_2=M_1-p_lla*(t_2-t_1)
```

```
M_3=0
```

```

p_ago=(M_2-0)/(1-t_2)
e=1
repeat
if t[e]<t_1 then
    M[e]=M_0-p_enc*t[e]
else
    if (t[e]>=t_1) and (t[e]<=t_2) then

        M[e]=M_1-p_lla*t[e]+p_lla*t_1
    else
        M[e]=M_2-p_ago*t[e]+p_ago*t_2
    endif
endif
e=e+1
until (e=101)
M[101]=0
M=M[e]
t_T=interpolate('masa vs tiempo','tiempo','masa';masa=m_T)
end
{ Tiraje=1
cañon=1 }
N=101
duplicate e=1;N
t[e]=e*0,01-0,01
end
call Masa (t[1..101];Tiraje;cañon$;m_T:M;p_enc;p_lla;p_ago;t_1;t_2;t_T)
F_c=m_T/t_T
TQ_enc=p_enc*F_c*3600

```


$$TQ_{lla} = p_{lla} * F_c * 3600$$

$$TQ_{ago} = p_{ago} * F_c * 3600$$

$$t_{Th} = t_T / 3600$$

$$t_{etapa1} = t_1 * t_T$$

$$t_{etapa2} = t_2 * t_T$$