

Modelación de la tasa de quemado en equipos residenciales de combustión a leña

Roberto Ramirez¹, Oscar Farias²

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, email: robertramirez@udec.cl
2. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, email: ofarias@udec.cl

Resumen

La evaluación y modelado de equipos residenciales de combustión a leña se dificulta debido a la variación temporal de la tasa de quemado. Esta variable además incide en la eficiencia y las emisiones de material particulado. La tasa se ve afectada además por factores tales como la humedad del combustible, el tiraje, la temperatura inicial del sistema, entre otros. La combustión de una astilla de leña puede dividirse en tres etapas principales: ignición, combustión principal y burnout.

Se plantea un modelo matemático adimensional para determinar la tasa de quemado promedio de cada etapa del proceso de combustión, utilizando dos cocinas a leña de fabricación nacional y eucaliptus como combustible. Se utilizan los resultados experimentales de la variación temporal de la masa de leña para ajustar el modelo e identificar el efecto de las variables operacionales y de diseño. Se identifican los límites de cada etapa mediante indicadores como la concentración de CO y la temperatura de los productos de combustión. A partir de una regresión lineal, se obtuvo la tasa de quemado para cada etapa. Los primeros resultados muestran una aproximación sobre el 95% para las primeras etapas para la estimación de la masa de quemado entre el modelo y los resultados empíricos. Se aprecia que la primera etapa es más sensible a la estabilización térmica de la cámara de combustión y al diseño de la cocina y componentes, mientras que la etapa de burnout presenta un comportamiento más regular.

Palabras clave: tasa de quemado, combustión de leña, equipos residenciales, eficiencia energética, emisiones

Abstract

The evaluation and modeling of residential wood combustion equipment is challenging due to the temporal variation of the burn rate. This variable also affects efficiency and particulate matter emissions. The burn rate is influenced by factors such as fuel moisture, draft, initial system temperature, among others. The combustion of a wood chip can be divided into three main stages: ignition, main combustion, and burnout.

A dimensionless mathematical model is proposed to determine the average burn rate for each stage of the combustion process, using two domestically manufactured wood stoves and eucalyptus as fuel. Experimental results of the temporal variation of wood mass are used to adjust the model and identify the effect of operational and design variables. The limits of each stage are identified using indicators such as CO concentration and the temperature of combustion products. A linear regression was used to obtain the burn rate for each stage. The initial results show an approximation of about 95% for the first stages for the estimation of the burnt mass between the model and the empirical results. It is observed that the first stage is more sensitive to the thermal stabilization of the combustion chamber and the design of the stove and its components, while the burnout stage exhibits a more regular behavior.

Keywords:

Keywords: burning rate, wood combustion, residential equipment, energy efficiency, emissions

1. Introducción

La combustión de biomasa, en particular la combustión de madera, se destaca por su potencial como fuente de energía renovable y su rol en la disminución de

emisiones de combustibles fósiles. Dentro de la biomasa, la madera y la biomasa lignocelulósica ocupan un lugar preponderante, y su combustión

comprende complejos procesos de pirólisis y combustión [15].

En la etapa de pirólisis, la madera se descompone en hemicelulosa, celulosa y lignina, volátiles y carbón. Los gases volátiles se mezclan con el oxígeno del aire, produciendo luz y calor, a través de la llama, mientras que el residuo sólido de carbón también se oxida liberando calor [10].

Para comprender mejor la cinética y las características de estas reacciones, se utilizan estudios experimentales como la termogravimetría (TGA) y la calorimetría de cono, los cuales proporcionan información sobre la pérdida de masa, las tasas de descomposición y la tasa de liberación de calor de la madera en condiciones controladas [10].

La combustión de la madera se divide en tres etapas principales: ignición, pirólisis y volatilización, y combustión del carbón. La ignición inicia la combustión mediante la descomposición química de la madera y la formación de una capa de carbón en su superficie, influenciada por variables como el contenido de humedad, el flujo de aire, la forma y tamaño de la madera, y la orientación del leño [7] [11][13]. Durante la pirólisis y volatilización, la madera se descompone térmicamente sin oxígeno, produciendo gases volátiles y carbón sólido, con la eficiencia de combustión afectada por el contenido de humedad, el flujo de aire y la temperatura [4] [16]. Finalmente, en la etapa de combustión del carbón, el carbón sólido se oxida lentamente, donde variables como la forma y tamaño del carbón, la temperatura y la concentración de oxígeno desempeñan un papel crucial en la eficiencia de la combustión [9].

Este estudio se enfoca en analizar las etapas de la combustión de la madera en equipos residenciales y las variables que las afectan, con el fin de identificar mejoras en los sistemas de combustión y reducir el impacto ambiental. Además, se abordarán aspectos señalados en la literatura sobre modelos de combustión, así como el impacto de variables relevantes [9] [3] [12] [1].

1.2 Metodología

El estudio se aborda a través de un modelo representativo de la tasa de quemado en equipos residenciales de combustión a leña.

Se utiliza un diseño cuantitativo a partir de resultados experimentales de la evolución temporal de la masa de leña quemada y de las emisiones de CO conjunto empleando herramientas estadísticas y matemáticas. Se analiza en forma adimensional la tasa de quemado de leña para 3 condiciones de regulación de aire. Luego, se incluyen regresiones para caracterizar cada etapa de quemado y se establecen pruebas de hipótesis sobre el

modelo. Los datos primarios se obtienen experimentalmente para la cocina operando en forma normal y con la incorporación de un recuperador de calor.

Capítulo 2: Análisis Experimental

2.1 Descripción del Banco de Ensayos

La experimentación se realizó en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción. El banco de ensayo incluye una cocina a leña instalada sobre una balanza para registrar la tasa de quemado y un recuperador de calor con su circuito de agua sanitaria (Figura 1).

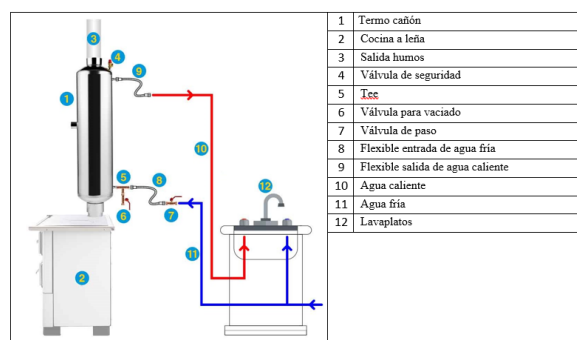


Figura 1: Esquema Cocina con recuperador de calor

El recuperador de calor, desarrollado como prototipo en el proyecto ID21I10402, posee un sistema de tuberías con un dámper que dirige el flujo de los gases por dos rutas: una directa para mayor tiraje, permitiendo un menor tiempo de residencia del flujo gaseoso, y otra que aumenta la permanencia mediante un recorrido en tres etapas (ascendente, descendente y ascendente) [22].

2.1.1 Instrumentación

Para medir la tasa de combustión, se utiliza una balanza tipo plataforma situada debajo de la cocina. La cual está conectada a un indicador de peso programable LP-7516, que digitaliza y registra las mediciones, permitiendo una adquisición de datos precisa.

Para analizar los gases de combustión y distinguir sus etapas, se utiliza el analizador de gases Testo 350. Los datos se registran digitalmente con software de la misma marca, instalado en un ordenador conectado al Testo 350.

Además, se empleará un sistema de recolección de datos con software especializado, interactuando con termocuplas tipo K para medir temperaturas y complementando con de medición presión ambiente y un higrómetro para medir la humedad del combustible.

Los procedimientos de ensayo incluyen la preparación y acondicionamiento de muestras de madera, realización de experimentos en condiciones controladas, y registro sistemático de datos utilizando sistemas de adquisición.

Tabla 1. Características de los instrumentos

Instrumento	Variable	Rango	Sensibilidad
Balanza	kg	0 a 300	0.01
Termocuplas	°C	-200 a 1350	0.1
Testo 350	CO (ppm)	0 a 10000	1
	NO (ppm)	0 a 4000	1
	NO ₂ (ppm)	0 a 500	0.1
	SO ₂ (ppm)	0 a 5000	1
	O ₂ (%) vol)	0 a 25	0.01
Higrómetro	% Hum	5 a 40	0.1

2.1.2 Protocolos y Procedimiento

Se establecen protocolos para los ensayos de dos tipos de cañón (simple y prototipo) variando las condiciones de operación de tiraje principal (abierto, medio o cerrado), así como la circulación del agua en el recuperador de calor. La leña se prepara en astillas, midiendo y registrando su humedad y masa. La experimentación comienza con el encendido de la cocina a leña y la creación de una cama de brasas. Se realizan cargas adicionales de leña para los ensayos, manteniendo las condiciones constantes. Se registra la masa total de la cocina con una balanza conectada a un computador y se analiza la composición de los gases de combustión con el Testo 350. Este registro continuo permite determinar la tasa de quemado y sus diferentes etapas, garantizando la precisión y confiabilidad de los datos para el análisis.

Cada ensayo considera una carga de $2.69 \pm 0.27 \text{ kg}$ de combustible, según la norma chilena 3173.of2009 y lo indicado por el fabricante en cuanto al tamaño de la cámara de combustión.

Un ensayo consta de cinco cargas de leña (corridas), de las cuales sólo en las tres últimas se recolectan datos. Al inicio, se enciende la leña utilizando una carga correspondiente a la mitad de la capacidad de la cocina y se precalienta el hogar de combustión. El objetivo de esta etapa es elevar la temperatura del sistema para las posteriores corridas experimentales. Luego, se realiza una carga adicional de leña para lo que se denomina "pre-ensayo". Esta carga tiene una masa igual a la que

se utilizará en los ensayos principales, con el propósito de estabilizar térmicamente la cocina. Cuando esta carga ha generado una cama de brasas correspondiente al 10%-20% de la masa inicial, se procede con una nueva carga para dar inicio a la primera corrida medida. Al alcanzar una masa que restablece la cama de brasas inicial, se realiza una nueva carga de astillas para iniciar la segunda corrida (ver Figura 2), replicando en la medida de lo posible las condiciones de la primera. Este proceso se repite para la tercera corrida. Finalmente, cuando se vuelve a obtener la cama de brasas inicial, se considera el ensayo concluido.

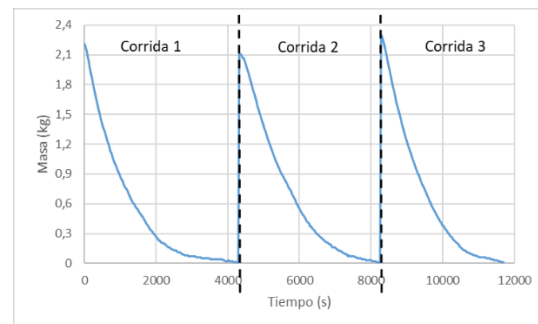


Figura 2. Muestra de corridas medidas en un ensayo

2.2 Análisis y tratamiento de datos experimentales

2.2.1 Modelo adimensional para la tasa de quemado

Para cada ensayo se realiza una normalización de los datos para trabajar de forma adimensional. 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 analizan en conjunto con la información de la emisión de monóxido de carbono. Este último parámetro se utiliza como indicador para definir las etapas del proceso de combustión.

A través de un análisis de regresión, se ajustan curvas a los puntos del gráfico M^* vs t^* , identificando los tiempos característicos t_1^* (disminución brusca de CO) y t_2^* (aumento de CO). El objetivo es generar modelos para abordar la dinámica de la operación de la cocina, facilitando la comprensión de los procesos intermedios de combustión y proporcionando herramientas para futuros modelos predictivos que permitan optimizar el control de los equipos. En el presente estudio, se describe la relación entre la tasa de quemado y los efectos asociadas al tiraje de la cocina y la incorporación de un recuperador de calor en el circuito de evacuación de humos.

El modelo considera una regresión lineal para definir la tasa de quemado para la etapa i (TQi), a través de la pendiente, de acuerdo a la siguiente ecuación:
 $TQ_1 = (M_1 - M_0)/(t_1 - t_0)$, donde podemos reemplazar por los valores adimensionales.

$$TQ_1 = (M_1^* * M_T - M_0^* * M_T)/(t_1^* * t_T - t_0^* * t_T) \quad (1)$$

Factorizando por M_T y t_T nos queda:

$$TQ_1 = \frac{(M_1^* - M_0^*)}{(t_1^* - t_0^*)} * \frac{M_T}{t_T} \quad (2)$$

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.

2.2.1 Curvas Adimensionales

De las experiencias realizadas, se obtienen las curvas dimensionales para cada ensayo realizado, lo que permite observar el comportamiento de las curvas de cada corrida (Figura 3).

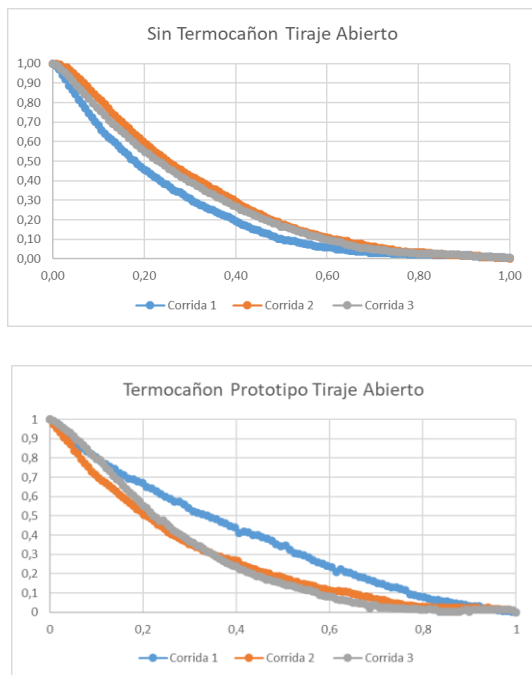


Figura 3. Curvas adimensionales de un ensayo sin recuperador de calor (arriba) y con recuperador (abajo)

En general la curva de la corrida 1 se diferencia de las curvas 2 y 3, lo que sugiere que las condiciones iniciales del equipo tienen un impacto en la combustión [17]. Las corridas 2 y 3 presentan mayor similitud en

las curvas adimensionales, lo que sugiere que, bajo un régimen permanente, el comportamiento de la combustión se vuelve más regular y predecible [18]. Se toma la determinación de considerar la corrida 3 de cada ensayo para la generación de la regresión.

Otro aspecto a considerar el efecto del tiraje en la tasa de quemado, en la Figura 4 se aprecian las diferentes curvas adimensionales obtenidas para la tercera corrida de tres ensayos con diferentes condiciones de tirajes para un mismo cañón (cañón de cocina estándar).

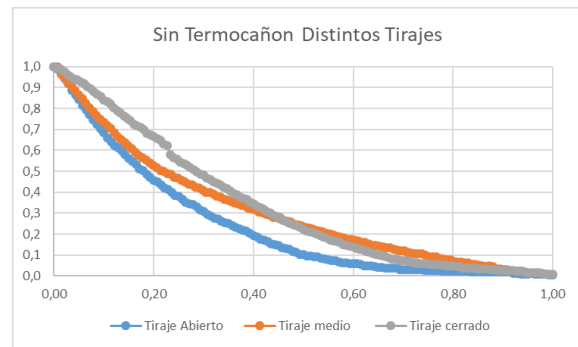


Figura 4. Curvas adimensionales mismo cañón diferentes tirajes

Al analizar el impacto del tiraje en las curvas, se observa que estas se diferencian entre sí, siendo un factor a considerar. Por lo tanto, en el presente trabajo, se considera sólo la condición de tiraje abierto para el modelo, ya que es la condición más representativa respecto al uso real del equipo, presentando siempre la mejor configuración para bajas emisiones y alta eficiencia [17] [21].

2.2.2 División de etapas de combustión

La combustión de una astilla de leña puede dividirse en tres etapas principales: ignición, combustión principal y burnout. El principal indicador de estas etapas es la concentración de CO en los gases de escape, como se muestra en la Figura 5 correspondiente a la tercera corrida del ensayo del prototipo de recuperador de calor con tiraje abierto.

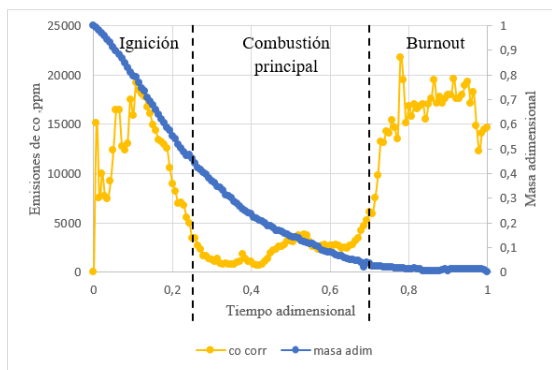


Figura 5. Concentración de CO y masa adimensional

La primera etapa (ignición) se extiende desde el inicio de la combustión hasta que se observa una disminución brusca en la concentración de CO, aproximadamente en el punto 0,25 del tiempo adimensional. Esta etapa corresponde a la formación de una capa superficial carbonizada en en parte exterior de la madera y la ignición incandescente [19]. La segunda etapa, la combustión principal, se caracteriza por una concentración de CO relativamente estable y constante, hasta que se produce un aumento notable en la concentración de CO, alrededor del punto 0,69 del tiempo adimensional. Durante esta etapa, las tasas de avance de las zonas de descomposición y oxidación son aproximadamente constantes [19].

La tercera etapa, burnout, continúa desde este punto hasta el consumo total del combustible. Esta etapa se caracteriza por una baja emisión de CO y una combustión más lenta y sostenida del residuo de carbón [20].

2. Modelo de la tasa de quemado

Para una primera aproximación se decide utilizar una regresión lineal para cada una de las etapas de la combustión como se aprecia en la Figura 6.

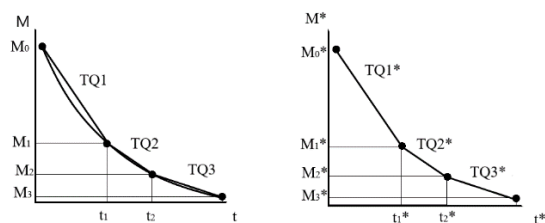


Figura 6. Muestra gráfica de regresión lineal

2.3 Resultados de la Regresión para el Modelo

Los resultados de las regresiones para los datos adimensionales se presentan en la Figura 7, destacando las diferentes etapas de la combustión y sus respectivas tasas de quemado adimensionales y coeficientes de determinación (R^2). También se incluye en la Figura 8 el conjunto de las curvas de las tres etapas y Figura 9 las curvas de residuales de aproximación las tres etapas entre el modelo y la curvas-

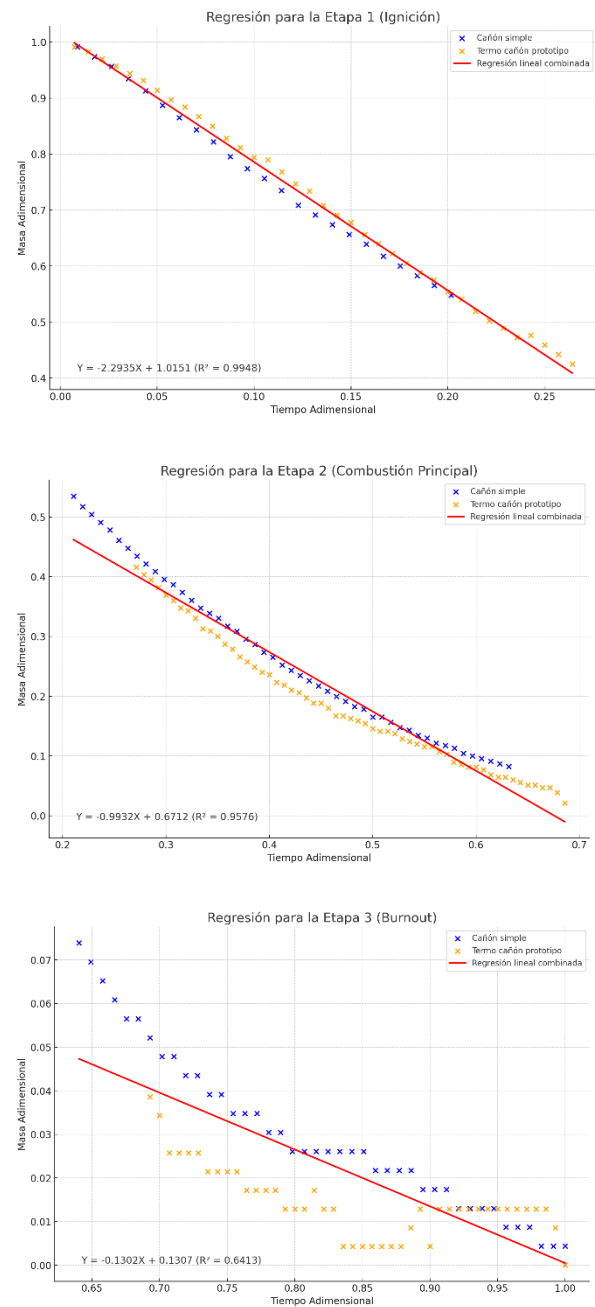


Figura 7. Regresión lineal de cada etapa de combustión

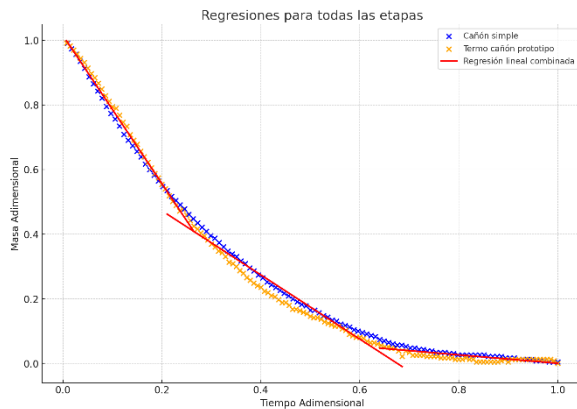


Figura 8. Regresión lineal del proceso completo

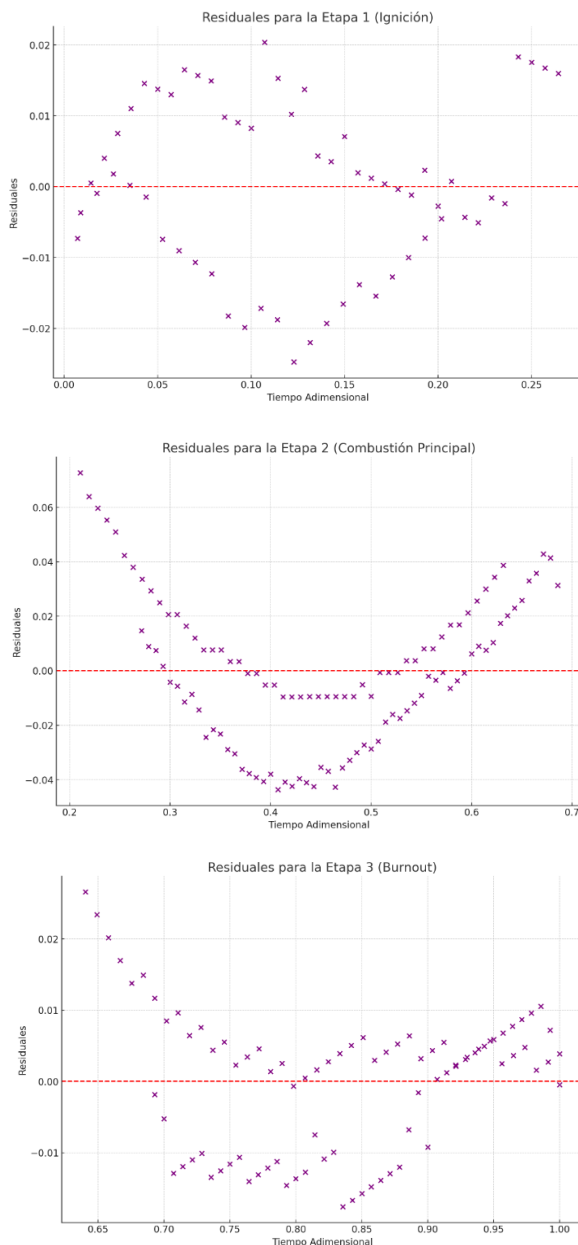


Figura 9. Residuales de cada etapa de combustión

El modelo de regresión lineal obtenido para la etapa 2 es $Y = -2.2982X + 1.0159$, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9944, lo que indica que el 99.44% de la variabilidad en la masa adimensional se explica por el modelo. Además, la gráfica de residuos muestra una distribución aleatoria alrededor de cero sin patrones evidentes, lo que confirma la adecuación del modelo lineal y la ausencia de falta de ajuste.

El modelo de regresión lineal para la Etapa 2 es $Y = -0.9805X + 0.6646$, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9576, lo que indica que el 95.76% de la variabilidad en la masa adimensional se explica por el modelo. Aunque este valor es ligeramente menor que el de la Etapa 1, sigue siendo muy alto y sugiere una buena adecuación del modelo a los datos. La gráfica de residuos muestra una distribución aleatoria alrededor de cero, con una variabilidad ligeramente mayor que en la Etapa 1, pero sin patrones claros, confirmando la adecuación del modelo lineal para esta etapa.

El modelo de regresión lineal para la Etapa 3 es $Y = -0.1240X + 0.1252$ con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.6245 indica que solo alrededor del 62% de la variabilidad en la masa adimensional se explica por el tiempo adimensional durante el burnout. Esto sugiere que existen otros factores que afectan la masa en esta etapa que no están siendo considerados por el modelo. La gráfica de residuos muestra que los residuos son más grandes y presentan una mayor variabilidad en comparación con las etapas anteriores. Además, se observa un patrón más notable en los residuos, lo que sugiere que el modelo de regresión lineal no está capturando adecuadamente todas las variaciones en los datos. Esto sugiere que existen otros factores que afectan la masa en esta etapa que no están siendo considerados por el modelo.

Tabla 2. Coeficientes de regresión para tiraje abierto

Etapas	a_1	a_2	R^2
Ignición	-2.2982	1.0159	0.9944
Combustión Principal	-0.9805	0.6646	0.9576
Burnout	-0.1240	0.1252	0.6245

Con las curvas generadas se estima el error porcentual promedio entre el modelo y los datos observado:

Tabla 3. Error porcentual y absoluto

Etapas	<i>error prom</i> [%]	<i>error abs</i> [-]
Ignición	1.71	0.0123
Combustión Principal	5.04	0.0147
Burnout	23.47	0.0121

3. Conclusiones

El estudio permite caracterizar la combustión de leña en tres etapas a partir de un modelo adimensional simple basado en regresión lineal. Este modelo aplica bajo condiciones de estabilización de la cámara de combustión.

Se observa que la etapa de ignición tiene una duración entre el 20 a 30% del tiempo de quemado con una rápida pérdida de masa evidenciada por la elevada tasa de quemado. La segunda etapa tiene una duración entre el 60 a 75% del tiempo de quemado, con tasa de quemado más estable y lenta durante la combustión principal.

El modelo propuesto presenta una alta correlación para las etapas 1 y 2, con un valor de R^2 superior a 0,95. La distribución aleatoria de los residuos alrededor de cero sin patrones evidentes confirma la adecuación del modelo lineal, sugiriendo un buen ajuste a los datos. La etapa 3 presenta un R^2 de 0.6245, indicando que no la curva escogida no es la mejor representación. Los residuos en esta etapa muestran una mayor variabilidad, con un patrón más notable, lo que sugiere que el modelo de regresión lineal no captura adecuadamente todas las variaciones en los datos.

Como trabajo futuro, se propone mejorar el modelo de la última etapa de combustión y validar el modelo en otros equipos.

4. Referencias

- [1] Abe, H., Abe, Y., Kajitani, S., & Hasegawa, T. (2014). Combustion and gasification rates of chars from wood chips and municipal solid waste (MSW) in CO₂. *Fuel*, 135, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.047>
- [2] Anca-Couce, A. (2019). Single large wood log conversion in a stove: Experiments and modelling. *Renewable Energy*, 143, 890-897. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.05.065>
- [3] Caubel, J. J., Johnson, M. R., & Cocker III, D. R. (2018). Investigation of secondary organic aerosol and ozone formation from diesel exhaust using a mobile environmental chamber. *Atmospheric Environment*, 184, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.004>
- [4] Dietenberger, M. A. (2012). Thermal degradation and fire performance of wood. *Fuel Processing Technology*, 96, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.017>
- [5] Du, Y., Lin, W., & Glarborg, P. (2021). Particulate emission from a modern wood stove: Influence of KCl. *Renewable Energy*, 170, 1215-1227. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.02.048>
- [6] Fachinger, F., Drewnick, F., Giere, R., & Borrmann, S. (2017). How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmospheric Environment*, 152, 216-226. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2017.03.027>
- [7] Galgano, A., Reina, V., Nigro, E., & Manfrida, G. (2018). Experimental investigation of a biomass gasifier stove under real operating conditions. *Energy*, 161, 975-985. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090>
- [8] Jimenez, J., Farias, O., Quiroz, R., & Yañez, J. (2017). Emission factors of particulate matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, and levoglucosan from wood combustion in south-central Chile. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(3), 201-207. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1295114>
- [9] Kortelainen, M., Tiilikainen, S., Kuoppala, E., Oasmaa, A., & Fagernas, L. (2018). Combustion of lignocellulosic biomass: Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC/MS) analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.002>
- [10] Li, Q., Cao, X., Chen, L., & Zhang, X. (2023). Combustion of lignocellulosic biomass and emission of harmful substances. *Biomass and Bioenergy*, 170, 106509. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106509>
- [11] Loboda, A. V., & Reyno, V. P. (2014). Experimental investigation of ignition phenomena of coniferous wood. *Fuel*, 125, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.011>
- [12] Löndahl, J., Swietlicki, E., Lindgren, E., & Loft, S. (2008). Physical and chemical properties of aerosol particles and their effect on human health. *Science of The Total Environment*, 389(2-3), 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.041>
- [13] Mikkola, E., & Wichman, I. S. (1989). Effects of moisture content on ignition and combustion characteristics of wood. *Fuel*, 68(8), 947-958. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.1989.05.015>
- [14] Park, W. C., Atreya, A., & Baum, H. (2010). Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. *Combustion and Flame*, 157(3), 481-494. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2009.10.006>
- [15] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 49, 16-36. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.018>
- [16] Vicente, E. D., Alves, C. A., Monteiro, A., Evtyugina, M., & Calvo, A. I. (2015). Emissions from

residential wood combustion: PM10 and particle-bound PAHs, organic acids and carbonyls. *Atmospheric Environment*, 118, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.030>

[17] Reichert, G., Hartmann, H., Haslinger, W., Oehler, H., Mack, R., Schmidl, C., Schön, C., Schwabl, M., Stressler, H., & Sturmlechner, R. (2017). Effect of draught conditions and ignition technique on combustion performance of firewood roomheaters.

[18] Li, Q., & Yang, X. (2022). Stability of the Steady States in Multidimensional Reaction Diffusion Systems Arising in Combustion Theory. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15218010> Renewable Energy, 105, 547-560. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.12.017>

[19] Galgano, A., Di Blasi, C., & De Vita, R. (2018). Experimental Validation of a Solid-Phase Model for Wood Ignition and Burning. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.8B01621>

[20] Weng, W., Costa, M., Aldén, M., & Li, Z. (2019). Single particle ignition and combustion of pulverized pine wood, wheat straw, rice husk and grape pomace. *Proceedings of the Combustion Institute*. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2018.05.095>

[21] Tissari, J., Hytönen, K., Lyyräinen, J., & Jokiniemi, J. (2007). A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment*, 41, 8330-8344. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2007.06.018>

[22] Gallardo, S., Farías, O., Cornejo, P., Cuevas, C., Valín, M., & Jimenez, J. (2024). Improving the performance of a condensing heat exchanger for biomass combustion at household scale. *Renewable Energy*, 228, 120628. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120628>