

Análisis numérico CFD del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa: eficiencia global, rendimiento térmico y emisiones de CO₂e

Paulo C. Medina Mendoza ^{1,*}, Alberto Beltrán Morales ², Wenceslao C. Bonilla Blancas ¹ y Martín Salazar Pereyra ¹

¹ División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial (DIMMI), Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables (MEEER), Tecnológico Nacional de México (TecNM)/TES de Ecatepec (TESE), Av. Tecnológico S/N, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos, C.P. 55210, Estado de México, México

² Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: paulomedina@tese.edu.mx

Energías Renovables (Biomasa)

Recibido: 27 de mayo de 2025

Aceptado: 21 de julio de 2025

Publicado: 6 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.459>

Resumen: En este trabajo se evalúa el rendimiento de una estufa eficiente de biomasa (IBS) tipo plancha modelo Tuya utilizando 6 reacciones químicas en el proceso de combustión para comparar los resultados numéricos con mediciones experimentales. Se implementa un análisis numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el software ANSYS Fluent para simular los principales fenómenos de transporte de la estufa de biomasa. La CFD es una herramienta que se ha utilizado para modelar y simular diferentes sistemas térmicos de combustión de biomasa tales como las IBS con la finalidad de optimizar la eficiencia térmica y reducir las emisiones contaminantes. La estufa de biomasa se evaluó mediante una prueba con tres repeticiones (Pruebas 1, 2 y 3) de 40 min cada una, 10 minutos de estabilización y 30 minutos de funcionamiento de la estufa. En las simulaciones numéricas fueron configurados dos escenarios: TY_6R_L2 y TY_6R_L3 utilizando un coeficiente de exceso de aire (λ) igual a 2 y 3, respectivamente, en las 3 pruebas de rendimiento. En la comparación de mediciones experimentales y resultados numéricos, se reporta que las diferencias entre eficiencia de combustión experimental (ECE) y numérica (NCE) fueron del 1-5%, esto se considera como uno de los hallazgos clave de este estudio debido a la relevancia de la eficiencia de combustión en el rendimiento de la estufa. El caso numérico TY_6R_L3 reporta una mejor distribución de la temperatura en la superficie del comal lo cual se puede explicar debido a que el exceso de aire primario y secundario ($\lambda = 3$) optimizan el flujo de calor a lo largo del cuerpo de la estufa. En el caso de las emisiones de CO₂e se obtuvieron diferencias del 35 y 19% para los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, comparados con el valor experimental de 0.68 ± 0.13 kgCO₂e/kg. La relevancia de esta comparación radica en que el modelo numérico de 6 reacciones predice de manera aceptable la contribución al cambio climático de una estufa eficiente de biomasa. En general, los resultados de la comparación de los casos numéricos muestran que λ tiene un efecto significativo en la mejora tanto de la transferencia de calor como del proceso de combustión de la IBS Tuya.

Palabras clave: estufa Tuya; CFD; eficiencia; emisiones; combustión

Introducción

En 2020, el suministro energético global de biomasa en el sector residencial fue de 57.5 EJ, del cual el 86% provino de fuentes de biomasa sólida incluyendo leña, astillas, pellets de madera y otras fuentes tradicionales de biomasa (GLOBAL BIOENERGY STATISTICS, 2023). En México, aproximadamente 31 millones de personas utilizan leña (116.6 PJ) (Pérez *et al.*, 2022) para satisfacer necesidades energéticas básicas como cocción de alimentos, calefacción y calentar agua (Serrano-Medrano *et al.*, 2018). Las tecnologías utilizadas en el sector rural-residencial son mayoritariamente dispositivos tradicionales de 3 piedras (fogones) los cuales tienen impactos importantes en salud y en la emisión significativa de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés). Las estufas eficientes de biomasa (IBS, por sus siglas en inglés) son sistemas térmicos que optimizan el proceso de combustión y la transferencia de calor en comparación con los fogones tradicionales (Medina, 2017).

Diversas investigaciones han comparado las IBS con los fogones de tres piedras o en forma de U y se han encontrado reducciones sustanciales de emisiones de GHG (Johnson *et al.*, 2008; Ruiz-García *et al.*, 2021), de emisiones interiores (Armendáriz-Arnez *et al.*, 2010; Patange *et al.*, 2015; Grieshop *et al.*, 2011) y de consumo de combustible (Berrueta *et al.*, 2008). Una de las posibles explicaciones de tales diferencias en el rendimiento de IBS en comparación con los fogones tradicionales es la presencia de una cámara de combustión (propia de los sistemas térmicos) donde se presentan las siguientes condiciones las cuales optimizan la eficiencia energética y de combustión (Medina, 2017): 1) temperatura suficientemente alta para alcanzar las 4 etapas de la combustión de biomasa, 2) relación aire/combustible

adecuada, 3) tiempo de residencia suficiente para la formación y reacción de los gases de combustión y 4) flujo de aire adecuado para la quemar los gases combustibles. En la siguiente sección se explican cada una de estas variables.

La combustión es una interacción compleja de procesos físicos y químicos en la cual se presenta una reacción de un combustible con el oxígeno del aire para liberar calor y que suministra aproximadamente el 80% de la energía mundial (Sadaka & Johnson, 2011). El proceso de combustión de biomasa es fundamental para evaluar el desempeño y durante la etapa de diseño de una IBS (Koppejan & Van Loo, 2012). Existen variables fundamentales en el fenómeno de combustión las cuales pueden optimizar el proceso de quema de biomasa en estufas eficientes. En este sentido, la combustión de biomasa consta de 4 etapas fundamentales: secado, pirólisis, gasificación y oxidación completa (combustión) (Koppejan & Van Loo, 2012). La temperatura adiabática de flama puede alcanzar valores teóricos e ideales de 2273 K para la leña la cual depende de variables tales como: poder calorífico, contenido de humedad, relación aire/combustible y el diseño de la tecnología (Sadaka & Johnson, 2011). El tiempo de residencia necesario para una combustión completa está influenciado directamente por la temperatura de combustión (Koppejan & Van Loo, 2012). El coeficiente de exceso de aire (λ) es uno de los factores más importantes en la eficiencia global de los sistemas de combustión de biomasa (Kumar & Paul, 2019). El λ es necesario para incrementar la temperatura de la llama y optimizar la combustión (De Jong & Van Ommen, 2014). Finalmente, el aire primario es necesario para la gasificación del combustible sólido, mientras que el aire secundario es necesario para asegurar una combustión eficiente con bajos niveles de emisiones contaminantes (Zdravec *et al.*, 2020).

Por otra parte, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta que se ha utilizado para modelar y simular diferentes sistemas térmicos de combustión de biomasa (Lee *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023). Estudios recientes han implementado un análisis numérico CFD para compararlo con mediciones experimentales de diferentes modelos de IBS. Recientemente, el análisis numérico del proceso de combustión en IBS se ha realizado utilizando modelos de 1 reacción (Núñez *et al.*, 2020; Medina *et al.*, 2021; Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024) y 2 reacciones químicas (Medina *et al.*, 2024). En este trabajo se evalúa el rendimiento de una estufa de biomasa tipo plancha utilizando un modelo de combustión de 6 reacciones para comparar los resultados numéricos con mediciones experimentales de 3 pruebas de rendimiento para la IBS modelo Tuya. Además de las especies químicas, se analizan la transferencia de calor y el flujo de fluidos para simular los fenómenos de transporte de la estufa. La principal innovación de este estudio radica en la implementación numérica de un modelo de reacciones el cual simula tanto la fase gaseosa como de la fase sólida del proceso de combustión además del uso de variables fundamentales tales como λ , aire primario y secundario, la temperatura de entrada como función de λ , entre otras. En relación con estudios CFD similares, en los cuales el fenómeno de combustión se explica mediante modelos relativamente simples, este trabajo representa una mejora importante en el análisis numérico de una estufa de biomasa.

Materiales y Métodos

Mediciones experimentales

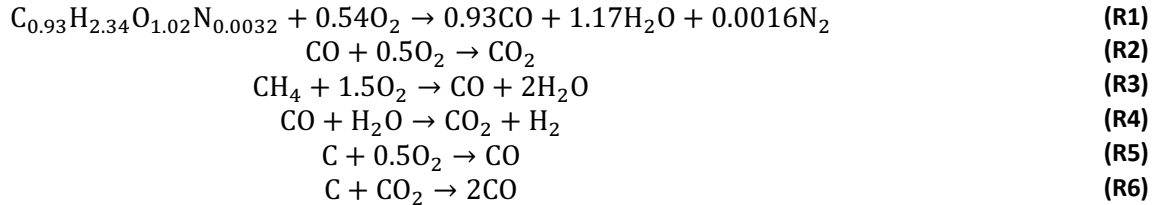
La estufa de biomasa evaluada es el modelo Tuya (antes llamada Onil) la cual está construida de material cerámico y con un comal (plancha) metálico de 34 x 70.5 cm con discos removibles si los usuarios prefieren cocinar a fuego directo. La estufa Tuya se evaluó mediante una prueba con tres repeticiones (Pruebas 1, 2 y 3) de 40 min cada una, 10 minutos de estabilización y 30 minutos de funcionamiento de la estufa. El objetivo de las pruebas fue alcanzar un comportamiento estable para analizar diferentes parámetros (energéticos y de emisiones) en los 30 minutos de operación. Adicionalmente, se calcularon la eficiencia de combustión experimental (ECE), así como la eficiencia térmica experimental (ETE) mediante las Ecuaciones 1 y 2. La ECE considera únicamente los flujos molares de dióxido (CO_2) y monóxido de carbono (CO) para el cálculo de la eficiencia de combustión (Jetter *et al.*, 2012; Johnson *et al.*, 2010). Por otra parte, en la ETE se considera un cociente entre el calor útil (calor del comal metálico) y la potencia de entrada (Medina *et al.*, 2021).

$$ECE (\%) = \frac{\dot{n}_{\text{CO}_2}}{\dot{n}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{CO}}} \quad (1)$$

$$ETE (W) = \frac{Q_{comal}}{potencia\ de\ entrada} \quad (2)$$

Modelo de combustión

El modelo de reacciones químicas utilizado para simular el proceso de combustión de la estufa de biomasa Tuya consta de 6 reacciones (Medina *et al.*, 2025) de las cuales las reacciones 1-4 describen la fase gaseosa mientras que las reacciones 5-6 muestran la fase sólida (gasificación del carbón residual).



Parámetros de entrada

La Tabla 1 muestra los parámetros de entrada utilizados en las simulaciones numérica de la estufa de biomasa Tuya en dos escenarios: TY_6R_L2 y TY_6R_L3 utilizando un coeficiente de exceso de aire $\lambda = 2$ y $\lambda = 3$, respectivamente, en las 3 pruebas de rendimiento. El flujo másico de volátiles de biomasa (ID = 4) fue calculado considerando la biomasa de entrada, el tiempo de operación de cada prueba y el contenido de volátiles (85.7%) en la leña (Filipe dos Santos Viana *et al.*, 2018). La temperatura de combustión (ID = 6) en la entrada de la cámara de combustión se obtuvo como función de los valores utilizados del coeficiente de exceso de aire ($\lambda = 2$ y $\lambda = 3$) según lo reportado por Koppejan y Van Loo, (Koppejan & Van Loo, 2012). El flujo de aire primario y secundario fue estimado utilizando cálculos estequiométricos mediante las reacciones R1 y R2 de acuerdo con lo reportado por Medina *et al.* (Medina *et al.*, 2024). El flujo de entrada de carbón residual fue calculado utilizando el contenido de volátiles (Cruz Montelongo *et al.*, 2020), así como el porcentaje de conversión leña a carbón (5 a 1) (FAO, s.f.). El diámetro y velocidad de las partículas biomasa, para configurar la fase discreta en el software comercial ANSYS Fluent, se citan en los ID 12 y 13, de la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de entrada utilizados para la estufa Tuya.

ID	Parámetro	TY_6R_L2			TY_6R_L3			Referencia
		Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	
1	Biomasa de entrada (kg)	0.634	0.617	0.534	0.634	0.617	0.534	(Medina <i>et al.</i> , 2021)
2	Tiempo (min)	30	30	30	30	30	30	(Medina <i>et al.</i> , 2021)
3	Flujo de entrada (biomasa) (kg/s)	3.52E-04	3.43E-04	2.97E-04	3.52E-04	3.43E-04	2.97E-04	-
4	Flujo de entrada (biomasa-volátiles) (kg/s)	3.02E-04	2.94E-04	2.54E-04	3.02E-04	2.94E-04	2.54E-04	(Filipe dos Santos Viana <i>et al.</i> , 2018)
5	Relación de exceso de aire (λ)	2	2	2	3	3	3	(Koppejan & Van Loo, 2012)
6	Temperatura de entrada (K)	1573	1573	1573	1473	1473	1473	(Koppejan & Van Loo, 2012)
7	Potencia de entrada (kW)	4.47	5.81	6.47	4.47	5.81	6.47	-
8	Flujo aire primario (kg/s)	2.95E-04	3.83E-04	4.27E-04	6.13E-04	5.96E-04	5.16E-04	(Medina <i>et al.</i> , 2024)
9	Flujo aire secundario (kg/s)	2.17E-04	2.82E-04	3.15E-04	4.52E-04	4.40E-04	3.81E-04	(Medina <i>et al.</i> , 2024)
10	Temperatura de aire primario y secundario (K)	500	500	500	700	700	700	(Koppejan & Van Loo, 2012)
11	Flujo de carbón residual (kg/s)	7.04E-05	6.86E-05	5.93E-05	7.04E-05	6.86E-05	5.93E-05	(Cruz Montelongo <i>et al.</i> , 2020; FAO, s.f.)
12	Temperatura de carbón residual (K)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	(Zeng <i>et al.</i> , 2015)
13	Diámetro de partículas de biomasa (m)	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	(Liu <i>et al.</i> , 2016)
14	Velocidad de partículas de biomasa (m)	4	4	4	4	4	4	(Jobaidur & Ting, 2013)

Configuración numérica

El software ANSYS Fluent fue utilizado para simular las 3 pruebas de rendimiento de la estufa Tuya. **Malla computacional.** El volumen interno de la estufa (en donde se llevan a cabo los diferentes fenómenos de transporte) fue discretizado utilizando una malla hexaédrica mediante el método 'MultiZone' con los siguientes parámetros de calidad: ortogonalidad = 0.94 y oblicuidad = 0.15. **Condiciones de frontera.** El dominio computacional fue seccionado como fluido (volumen interno) y sólido (comal metálico) con las siguientes condiciones de frontera: entrada de volátiles, entradas de aire primario y secundario, comal, chimenea, pared de la estufa y salida. **Flujo de fluidos.** El modelo 'k-epsilon' fue empleado para simular el flujo bajo condiciones de turbulencia (Marangwanda *et al.*, 2020). **Transferencia de calor.** Para simular el mecanismo de transferencia de calor por radiación se implementó el modelo de ordenadas discretas (Tu *et al.*, 2019; Somwangthanaroj & Fukuda, 2020). **Especies.** Además del modelo de 6 reacciones químicas, se utilizó el modelo 'Fuel and thermal NOx' (Kang *et al.*, 2017) y el modelo 'Soot' (Chen *et al.*, 2021) para simular las emisiones de material particulado. **Fase discreta.** Fue utilizada para simular la interacción química entre las partículas de biomasa en estado sólido y la fase gaseosa (Marangwanda *et al.*, 2020). **Materiales.** El material de construcción de la estufa Tuya es un cerámico que fue considerado como óxido de calcio en el simulador. Para las zonas metálicas de la estufa (chimenea y comal) se utilizó un coeficiente convectivo $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024).

Parámetros numéricos

Para comparar las eficiencias experimentales, se calculó la eficiencia de combustión numérica (NCE) la cual es un cociente del flujo másico de productos de la combustión incompleta (PIC, por sus siglas en inglés): CO, metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) entre los volátiles de entrada de la biomasa como se describe en la Ecuación 3. Por otra parte, la eficiencia térmica numérica (NTE) se calcula utilizando el calor del comal (obtenido en el simulador Fluent) entre la potencia de entrada (Ecuación 4).

$$NCE (\%) = 1 - \left(\frac{\dot{m}_{PICs}}{\dot{m}_{\text{volátiles de entrada}}} \right) \quad (3)$$

$$NTE (W) = \frac{Q_{\text{comal}}}{\text{potencia de entrada}} \quad (4)$$

Emisiones de CO_2

Para el cálculo del impacto al calentamiento global de la estufa Tuya fueron utilizados los potenciales de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sobre un horizonte de 100 años. Para representar la fracción de no renovabilidad de la biomasa se utiliza un valor para el CO_2 igual a 0.25 (Bailis *et al.*, 2015). Los valores de GWP para los PIC fueron: CO = 1.9 (IPCC, 2007), $\text{CH}_4 = 28$ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) y $\text{NO}_x = 10$ (Lammel & Graßl, 1995). El PM fue considerado como carbono negro para el cual el GWP es igual a 680 (MacCarty *et al.*, 2008).

Resultados y Discusión

Comparación de casos numéricos

La Tabla 2 muestra la comparación de los 2 casos numéricos: TY_6R_L2 vs. TY_63_L3 para los flujos de emisiones de CO_2 , CO, CH_4 , NO_x y PM, así como para las eficiencias, calor del comal y flujo de productos de la combustión incompleta (PIC's). Para el caso TY_6R_L2, el rango de emisiones de CO_2 , NCE, NTE y Qc para las 3 pruebas fue de: 1.97×10^{-4} a $3.98 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_2/\text{s}$, 93.84 a 98.75%, 21.70 a 25.85% y 1788 a 2051 W, respectivamente. Mientras que para el caso TY_6R_L3: 3.32×10^{-4} a $4.60 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_2/\text{s}$, 96.09 a 98.36%, 27.51 a 29.67% y 1942 a 2473 W, respectivamente.

El menor rango de diferencias fue reportado en la NCE con 0.3%, mientras que el mayor fue observado en las emisiones de metano en la Prueba 1 con 89%.

Tabla 2. Comparación entre los casos numéricos TY_6R_L2 vs. TY_63_L3

Caso	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	CH ₄ (kg/s)	NO _x (kg/s)	PM (kg/s)	NCE (%)	NTE (%)	Qc (W)	PIC's (kg/s)
TY_6R_L2	1	1.97E-04	5.26E-06	1.40E-06	5.02E-08	4.62E-08	93.84	25.85	1788	1.34E-05
TY_6R_L3		3.32E-04	3.86E-06	1.56E-07	7.03E-08	3.72E-08	96.09	29.67	1942	8.50E-06
Diferencias (%)	-	41	27	89	29	19	2	13	8	37
TY_6R_L2	2	2.40E-04	4.18E-06	4.16E-07	6.75E-08	6.06E-08	97.38	22.73	1955	7.40E-06
TY_6R_L3		3.90E-04	4.01E-06	2.50E-07	1.19E-07	1.13E-07	97.64	28.73	2344	6.68E-06
Diferencias (%)	-	38	4	40	43	46	0.3	21	17	10
TY_6R_L2	3	3.98E-04	3.42E-06	3.88E-07	5.85E-08	6.65E-08	98.75	21.70	2051	3.93E-06
TY_6R_L3		4.60E-04	4.71E-06	1.97E-07	1.32E-07	1.33E-07	98.36	27.51	2473	5.18E-06
Diferencias (%)	-	13	28	49	56	50	0.4	21	17	24

Validación

Parámetros globales

La Tabla 3 muestra la comparación de los TY_6R_L2 y TY_63_L3 en relación con los resultados experimentales de la estufa Tuya. El rango de diferencias para los flujos máxicos de CO₂ fue de 59-69% y 34-48% para los casos TY_6R_L2 y TY_63_L3, respectivamente. Para las eficiencias de combustión, el rango de diferencias fue 1-5% para los dos casos numéricos, mientras que la comparación entre ETE y NTE mostró un rango de 10-14% (TY_6R_L2) y 1-12% (TY_6R_L3). La relación entre flujo máxico de CO₂ y ECE-NCE se describe en la Figura 1. Los resultados muestran que existe una clara correlación entre las emisiones de CO₂ y la eficiencia de combustión tanto experimental como numérica. El coeficiente de determinación (R²) fue de 0.98, 0.93 y 0.71 para las mediciones experimentales, TY_6R_L3 y TY_6R_L2, respectivamente. En la Figura 2 se aprecian las eficiencias ETE y NTE, así como el calor del comal experimental y numérico. En general, en el análisis de las Figuras 1 y 2 se puede observar que el caso TY_6R_L3 muestra resultados más cercanos respecto a los valores experimentales tal y como también se reporta en los porcentajes de diferencia de la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación entre los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_63_L3 vs. mediciones experimentales para la estufa Tuya

Caso	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	CH ₄ (kg/s)	NO _x (kg/s)	PM (kg/s)	ECE-NCE (%)	ETE-NTE (%)	Qc (W)
Experimental	1	6.32E-04 ± 1.63E-04	3.67E-06 ± 1.42E-06	-	6.20E-07 ± 1.67E-07	-	98.74 ± 0.43	30 ± 7.49	2033
TY_6R_L2		1.97E-04	5.26E-06	1.40E-06	5.02E-08	4.62E-08	93.84	25.85	1788
TY_6R_L3		3.32E-04	3.86E-06	1.56E-07	7.03E-08	3.72E-08	96.09	29.67	1942
Diferencias (%)		-	(69, 48)	(30, 5)	(92, 99)	-	(5, 3)	(14, 1)	(12, 4)
Experimental	2	5.89E-04 ± 1.38E-04	5.27E-06 ± 2.17E-06	-	4.49E-07 ± 1.64E-07	-	98.27 ± 0.24	26.32 ± 5.61	2673
TY_6R_L2		2.40E-04	4.18E-06	4.16E-07	6.75E-08	6.06E-08	97.38	22.73	1955
TY_6R_L3		3.90E-04	4.01E-06	2.50E-07	1.19E-07	1.13E-07	97.64	28.73	2344
Diferencias (%)		-	(59, 34)	(21, 24)	(85, 99)	-	(1, <1)	(14, 8)	(27, 12)
Experimental	3	6.44E-04 ± 1.98E-04	3.31E-06 ± 3.80E-07	-	6.47E-07 ± 1.89E-07	-	98.87 ± 0.22	25.37 ± 8.13	2750
TY_6R_L2		3.98E-04	3.42E-06	3.88E-07	5.85E-08	6.65E-08	98.75	21.70	2051
TY_6R_L3		4.60E-04	4.71E-06	1.97E-07	1.32E-07	1.33E-07	98.36	27.51	2473
Diferencias (%)		-	(63, 39)	(21, 18)	(91, 99)	-	(2, 1)	(10, 12)	(29, 15)

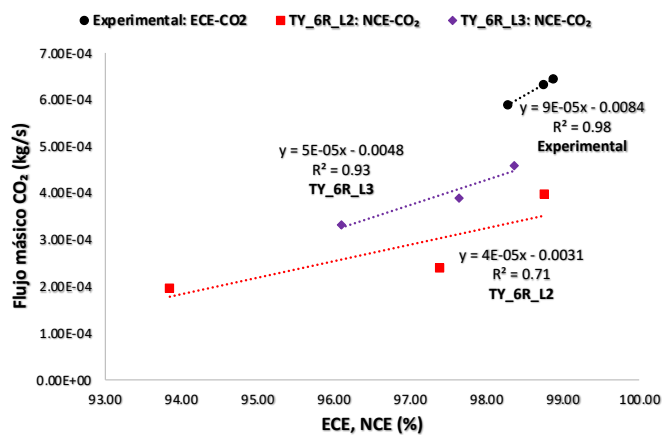


Figura 1. Eficiencias de combustión vs. flujo másico de CO₂ para mediciones experimentales y casos numéricos

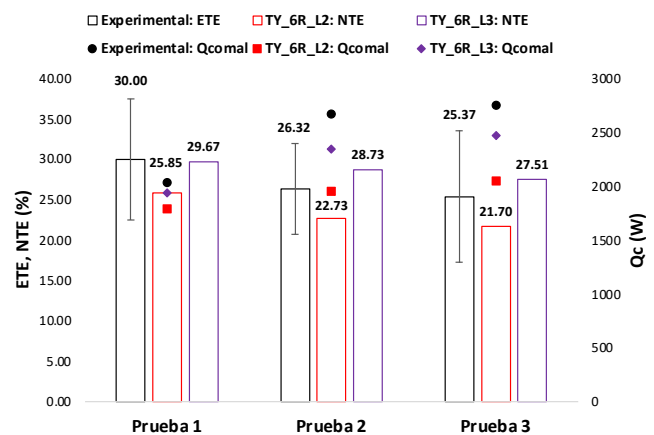


Figura 2. Eficiencia térmica y calor del comal para mediciones experimentales y casos numéricos para las Pruebas 1, 2 y 3

Desempeño térmico

La Figura 3 muestra la comparación entre la termografía experimental y los contornos numéricos del comal para las 3 pruebas de la estufa Tuya. Los rangos de temperatura para el comal metálico de la estufa van de 300 K a 900 K con la excepción de la Prueba 3 del caso TY_6R_L3 donde la mayor temperatura es de 920 K. En la Tabla 4 se reportan las temperaturas promedio del comal para las 3 pruebas en las imágenes termográficas y los casos numéricos, el rango de diferencias observado fue de <1 a 9%.

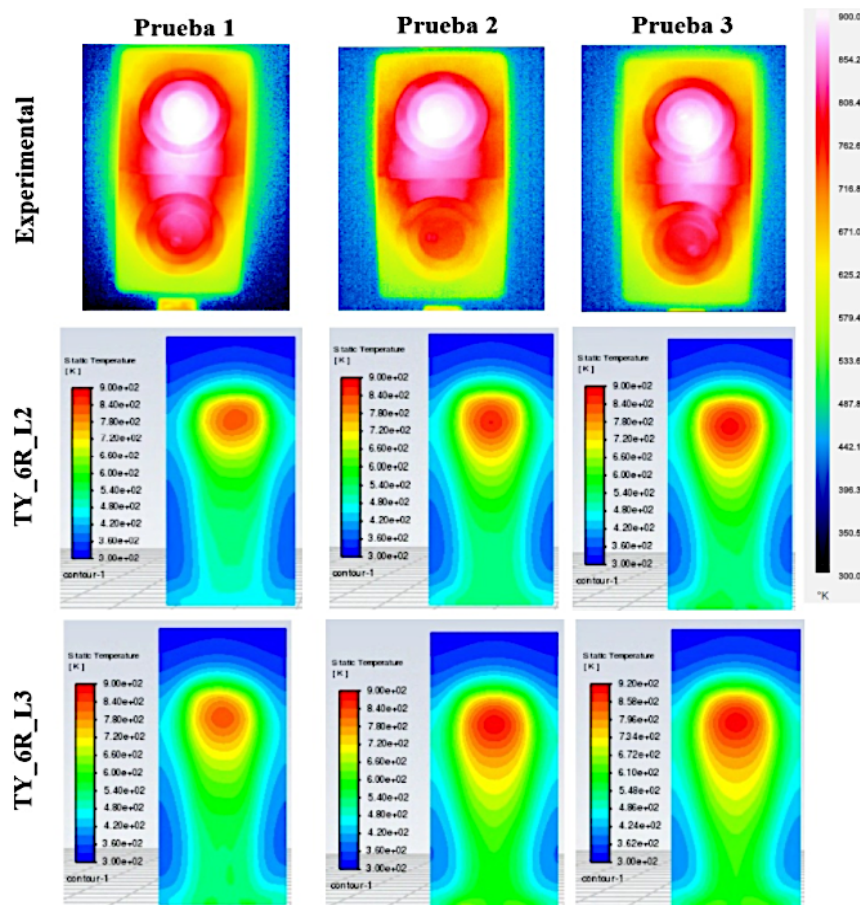


Figura 3. Termografía experimental vs. contornos numéricos del comal metálico para las Pruebas 1, 2 y 3. Nota. Los contornos numéricos muestran cada uno su respectiva escala de temperatura, la escala de la termografía experimental se muestra en la esquina superior derecha

Tabla 4. Comparación de la temperatura promedio del comal entre resultados experimentales y casos numéricos para las 3 pruebas.

Caso	Prueba 1 T comal (K)	Prueba 2 T comal (K)	Prueba 3 T comal (K)
Experimental	458 ± 48	508 ± 47	514 ± 49
TY_6R_L2	487 ± 127	507 ± 134	520 ± 140
TY_6R_L3	502 ± 126	538 ± 142	551 ± 148
Diferencias (%)	(6, 9)	(<1, 6)	(1, 7)

Emisiones de CO₂e

La Tabla 5 muestra la comparación de factores de emisión (expresados como gramos de contaminante por kilogramo de leña) de CO₂, CO, CH₄, NO_x y PM, así como la contribución de CO₂e para los 2 casos numéricos en comparación con los resultados experimentales de la estufa Tuya. El caso numérico TY_6R_L2 mostró mayores diferencias en relación con los factores de emisión experimentales con un rango de 23 a 84%, mientras que el rango para el caso TY_6R_L3 fue de 14 a 34%. La misma tendencia fue observada en la comparación de kgCO₂e/kg en la cual se reportan diferencias de 35 y 19% para los casos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente.

Tabla 5. Comparación de los factores de emisión de contaminantes y de CO₂e

Caso	Prueba	CO ₂ (g/kg)	CO (g/kg)	CH ₄ (g/kg)	NO _x (g/kg)	EC-PM (g/kg)	kgCO ₂ e/kg
TY_6R_L2	1	775	21	5.50	0.20	0.18	0.51
	2	729	13	1.26	0.20	0.18	0.37
	3	1083	9	1.05	0.16	0.18	0.44
TY_6R_L3	1	1306	15	0.61	0.28	0.15	0.47
	2	1182	12	0.76	0.36	0.34	0.58
	3	1249	13	0.54	0.36	0.36	0.60
Experimental (Johnson <i>et al.</i> , 2008)	-	1445 ± 27	19 ± 6	0.42 ± 0.21	0.48 ± 0.39	0.39 ± 0.19	0.68 ± 0.13
TY_6R_L2	Promedio	862	14	2.61	0.19	0.18	0.44
TY_6R_L3		1245	13	0.64	0.33	0.28	0.55
Diferencias (%)	-	(40,14)	(23,28)	(84,34)	(61,31)	(54,28)	(35,19)

Nota. Las emisiones experimentales de EC se refieren a carbono negro reportadas por Ruiz-García *et al.* (Johnson *et al.*, 2008).

Análisis de sensibilidad de malla

La Tabla 6 muestra la comparación entre la malla utilizada para los casos numéricos y 2 casos con un menor número de elementos. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en las 4 variables comparadas: NCE, NTE, calor del comal y temperatura promedio del comal. El rango de diferencias encontrado fue de 0.3% a 2%.

Tabla 6. Análisis de sensibilidad para las eficiencias NCE-NTE, calor del comal y temperatura promedio del comal

Malla	Elementos	NCE (%)	NTE (%)	Qc (W)	T comal (K), prom.
Actual	1,017,800	98.36	27.51	2473	551
Caso 1	882,330	96.40	27.20	2445	553
Diferencia (%)	13	2	1	1	0.3
Caso 2	768,482	96.97	28.06	2524	562
Diferencia (%)	24	1	2	2	2.0

Discusión

Comparación entre casos numéricos

La comparación entre los dos casos numéricos muestra la influencia del coeficiente de exceso de aire (λ) en el rendimiento global de la estufa de biomasa. En el rendimiento energético, utilizando $\lambda = 3$ en el caso TY_6R_L3, se observa un incremento tanto en la NTE como en el calor del comal (Q_c) obteniendo un incremento de hasta un 21 y 17%, respectivamente. En cuanto a los parámetros de emisiones, los flujos máxicos muestran que el caso TY_6R_L3 presenta mayores emisiones de CO_2 lo que teóricamente se reflejaría en una combustión más completa, sin embargo, las diferencias en los valores de NCE no fueron significativas. Las emisiones de PIC's mostraron una reducción del 37 y 10% en las Pruebas 1 y 2, respectivamente, al utilizar $\lambda = 3$. Sin embargo, en la Prueba 3 se presentó un incremento del 24% de emisiones de PIC's en el caso TY_6R_L3 lo que posiblemente se puede explicar debido a las altas emisiones de CO en dicha prueba.

En general, los resultados de la comparación de los casos numéricos muestran que λ tiene un efecto significativo en la mejora tanto de la transferencia de calor como del proceso de combustión de la IBS Tuya. Medina *et al.*, (Medina *et al.*, 2024) reportaron resultados similares al utilizar diferentes valores de exceso de aire en el rendimiento de una estufa tipo plancha encontrando que $\lambda = 3$ es un valor óptimo para mejorar la eficiencia global de una IBS. Koppejan y Van Loo (Koppejan & Van Loo, 2012) reportan que los sistemas térmicos de combustión de biomasa a pequeña escala como las IBS, necesitan un coeficiente de exceso de aire superior a 2 para optimizar su rendimiento general.

Validación de resultados numéricos

Comparación de parámetros globales. La comparación de flujos máxicos de CO_2 , CO y NO_x entre el caso numérico TY_6R_L2 y las mediciones experimentales muestra diferencias significativas. Las mayores diferencias fueron reportadas en las emisiones de NO_x lo cual se puede explicar por el contenido de nitrógeno de la biomasa de las mediciones experimentales y el porcentaje utilizado en las simulaciones numéricas (Medina *et al.*, 2025). En el caso TY_6R_L3 se observaron las menores diferencias en la comparación de los flujos de CO, para el caso del CO_2 , la menor diferencia encontrada fue del 34%. De este último resultado se puede inferir que el coeficiente $\lambda = 3$ promueve la combustión completa y las emisiones de CO_2 . A su vez, en el modelo de combustión se utiliza una reacción adicional para la formación de CO_2 (R4) lo que podría explicar de igual manera los mayores flujos máxicos en relación con estudios similares (Medina *et al.*, 2021).

Para las eficiencias térmica y de combustión y el calor del comal (Q_c) los dos casos numéricos reportaron diferencias aceptables en relación con los resultados experimentales. En el caso de la NCE las diferencias fueron del 1-5%, esto se considera como uno de los hallazgos clave de este estudio debido a la relevancia de la eficiencia de combustión en el rendimiento de la estufa. La NCE también pudo verse favorecida al utilizar el exceso de aire $\lambda = 2$ y 3 con lo cual se asegura el tiro forzado y por ende la mejora de la eficiencia de combustión. En particular, el modelo TY_6R_L3 muestra una mayor similitud con la medición experimental de ETE y Q_c lo que se puede atribuir a una mejora del flujo de calor en la cámara de combustión y a una mejor distribución de la temperatura en el comal de la estufa utilizando $\lambda = 3$.

Desempeño térmico. La mejora en el desempeño térmico es probablemente el resultado más notorio de este trabajo cuando se comparan los contornos numéricos de estudios que han utilizado un modelo de combustión de 1 reacción (Medina *et al.*, 2021; Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024; Gómez-Heleria *et al.*, 2023). Esta afirmación se puede corroborar en la Figura 3 en donde se observa una clara similitud entre los resultados de los 2 casos numéricos y la termografía experimental. De igual manera, las diferencias en la temperatura promedio del comal metálico, muestran valores de <1 a 9% (ver Tabla 4) con lo cual se demuestra que el modelo numérico de transferencia de calor predice de forma acertada el experimental. En particular, el caso numérico TY_6R_L3 reporta una mejor distribución de la temperatura en la superficie del comal lo cual se puede explicar debido a que el exceso de aire primario y secundario ($\lambda = 3$) optimizan el flujo de calor a lo largo del cuerpo de la estufa.

Comparación de emisiones de CO_2 e. Los resultados de los factores de emisión muestran que el caso numérico TY_6R_L3 presenta las menores diferencias en relación con los experimentales. En el caso particular del CO_2 , se encontró la diferencia más cercana (14%) lo que ratifica la influencia del tiro forzado en la eficiencia de combustión.

Para el metano (CH_4) el cual es un importante gas de efecto invernadero, se observan valores de 2.61 y 0.64 g/kg para los casos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, por lo que se puede mencionar que el valor de $\lambda = 3$ optimiza el proceso de combustión y reduce dichas emisiones.

En el caso de las emisiones de CO_2e se obtuvieron diferencias del 35 y 19% para los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, comparados con el valor experimental de $0.68 \pm 0.13 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$. La relevancia de esta comparación radica en que el modelo numérico de 6 reacciones predice de manera aceptable la contribución al cambio climático de una estufa eficiente de biomasa. Es importante mencionar que se observa una diferencia del 36% entre los casos TY_6R_L3 y TY_6R_L2 para el factor de emisión de PM lo cual explica que el caso TY_6R_L3 presente una mayor contribución de CO_2e a pesar del valor del coeficiente λ .

Limitaciones y trabajo futuro. Una de las principales limitaciones de este trabajo es el tamaño de muestra ($N = 1$) de las mediciones experimentales lo que supone que los resultados de los principales parámetros tales como ECE y ETE presenten una incertidumbre significativa. Para los casos numéricos, los autores de este trabajo sugieren que es necesario incrementar el número de simulaciones por cada caso y al menos tener un set de 3 repeticiones ($N = 3$) lo cual posiblemente favorezca la comparación con los resultados reportados en bibliografía. En este sentido, para dar mayor validez a las comparaciones numéricas vs experimentales, es necesario utilizar una prueba estadística la cual determine si las diferencias reportadas son estadísticamente significativas o no. Se debe continuar explorando la mejora del modelo de combustión de estufas eficientes de biomasa en estudios numéricos CFD. Si bien el modelo de 6 reacciones presenta una correlación aceptable con los resultados experimentales, siguen existiendo puntos importantes a corregir como el caso de reducir las diferencias en los flujos máxicos de emisiones contaminantes.

Conclusiones

El presente trabajo representa un avance significativo en el análisis y comprensión del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa. El modelo de 6 reacciones implementado en la estufa de biomasa Tuya predice de forma aceptable la eficiencia global, la transferencia de calor en el interior del cuerpo de la estufa y las emisiones de CO_2e .

Los principales hallazgos se mencionan a continuación.

- La comparación de los dos casos numéricos muestra que un valor de $\lambda = 3$ en el caso TY_6R_L3 mejora las emisiones de CO_2 al igual que la NCE, NTE y Qc.
- La validación de resultados entre los casos numéricos y mediciones experimentales mostró que, si bien existen diferencias significativas en los flujos máxicos de emisiones de CO y NO_x , otras variables de fundamental importancia como las eficiencias de combustión y térmica y las emisiones de CO_2 se encontraron diferencias aceptables particularmente en el caso TY_6R_L3.
- Los contornos numéricos del comal para el caso TY_6R_L3 en comparación con la termografía experimental muestra una evidente similitud lo cual representa un importante avance si se consideran los resultados previamente publicados en estudios similares para IBS tipo plancha.
- Los resultados de los factores de emisión y de emisiones de CO_2e acorde con la validación de otros parámetros, muestra una diferencia del 19% en relación con resultado experimental. Se puede concluir entonces, que el modelo de combustión fue implementado de manera correcta y que es posible utilizar una herramienta computacional para predecir la contribución al cambio climático de una estufa de biomasa.

Bibliografía

- Armendáriz-Arnez, C., Edwards, R. D., Johnson, M., Rosas, I. A., Espinosa, F., & Masera, O. R. (2010). Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves. *Atmospheric Environment*, 44(24), 2881–2886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.049>
- Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266–272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Chen, T., Li, T., Sjöblom, J., & Ström, H. (2021). A reactor-scale CFD model of soot formation during high-temperature pyrolysis and gasification of biomass. *Fuel*, 303, 121240. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121240>

- Cruz Montelongo, C. D. L., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo, J. C., Rosales Serna, R., & Carrillo-Parra, A. (2020). Energy characterization of charcoal produced in North Central México. *Madera y bosques*, 26(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>
- De Jong, W., & Van Ommen, J. R. (2014). *Biomass as a sustainable energy source for the future: fundamentals of conversion processes*. John Wiley & Sons.
- FAO. (s.f.) Capítulo 1. LOGISTICA DE UNA PRODUCCION DE CARBON VEGETAL. <https://www.fao.org/4/x5328s/X5328S02.htm#:~:text=Se%20supone%20que%20la%20eficiencia,de%20madera%20seca%20al%20ho> rno. Acceso: 1 de mayo de 2025.
- Filipe dos Santos Viana, H., Martins Rodrigues, A., Godina, R., Carlos de Oliveira Matias, J., & Jorge Ribeiro Nunes, L. (2018). Evaluation of the physical, chemical and thermal properties of Portuguese maritime pine biomass. *Sustainability*, 10(8), 2877. <https://doi.org/10.3390/su10082877>
- Galindo, Y., Gómez-Helería, D., González, J. N., & Bustamante, C. A. (2025). CFD simulation and implementation of a griddle-type biomass stove for rural communities. *Revista Mexicana de Física*, 71(1 Jan-Feb), 010602-1. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.010602>
- GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2023. GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2023. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/231219%20GBS%20Report.pdf> Acceso: 9 de abril de 2025.
- Gómez-Helería, D., Núñez, J., Fisher, E. M., Ruiz-García, V. M., & Beltrán, A. (2023). Steady-state behavior of a biomass plancha-type cookstove: Experimental and 3D numerical study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103172. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103172>
- Grieshop, A. P., Marshall, J. D., & Kandlikar, M. (2011). Health and climate benefits of cookstove replacement options. *Energy Policy*, 39(12), 7530–7542. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.024>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014, Technical Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf Acceso: 1 de mayo de 2025.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf Acceso: 1 de mayo de 2025.
- Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environmental science & technology*, 46(19), 10827–10834. <https://doi.org/10.1021/es301693f>
- Jobaidur, K., & Ting, W. (2013). Implementation of a demoisturization and devolatilization model in multi-phase simulation of a hybrid entrained-flow and fluidized bed mild gasifier. *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcce.2013.23005>
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., & Masera, O. (2010). New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environmental science & technology*, 44(1), 368–374. <https://doi.org/10.1021/es9013294>
- Johnson, M., Edwards, R., Frenk, C. A., & Masera, O. (2008). In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1206–1222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>
- Kang, M. S., Jeong, H. J., Farid, M. M., & Hwang, J. (2017). Effect of staged combustion on low NOx emission from an industrial-scale fuel oil combustor in South Korea. *Fuel*, 210, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.065>
- Koppejan, J., & Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- Kumar, U., & Paul, M. C. (2019). CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach. *Chemical Engineering Science*, 195, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.038>
- Lammel, G., & Graßl, H. (1995). Greenhouse effect of NOx. *Environmental Science and Pollution Research*, 2, 40–45. <https://doi.org/10.1007/BF02987512>
- Lee, H. K., Choi, S. M., & Kim, B. K. (2010). Understanding coal gasification and combustion modeling in general purpose CFD code. *Journal of the Korean Society of Combustion*, 15(3), 15–24. https://koreascience.kr/ksci/search/article/articleView.ksci?articleBean.atclMgntNo=OSHHB6_2010_v15n3_15
- Liu, H., Cattolica, R. J., & Seiser, R. (2016). CFD studies on biomass gasification in a pilot-scale dual fluidized-bed system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 11974–11989. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.205>
- MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., & Roden, C. (2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for sustainable development*, 12(2), 56–65. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60429-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60429-9)
- Marangwanda, G. T., Madyira, D. M., & Babarinde, T. O. (2020). Combustion models for biomass: A review. *Energy Reports*, 6, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.135>
- Medina, P. (2017). Evaluación de la contribución de emisiones y de los parámetros de rendimiento de las estufas eficientes de leña mediante los protocolos WBT/CCT y durante ciclos de cocinado controlado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado de Ingeniería Química. Tesis de Doctorado. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5718/1/FIQ-D-2017-0397.pdf
- Medina, P., Beltrán, A., Núñez, J., & Ruiz-García, V. M. (2022). Transport phenomena in a biomass plancha-type cookstove: Experimental performance and numerical simulations. *Energy for Sustainable Development*, 71, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.019>
- Medina, P., Mora, A., & Beltrán, A. (2024). Combustion efficiency and CO/NOx emissions for a biomass plancha-type stove: Effect of the air excess ratio. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102411. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102411>
- Medina, P., Mora, A., & Beltrán, A. (2025). Improvement of the combustion model for a biomass stove: analysis of overall efficiency and thermal performance. Submitted to *Renewable Energy*, 13th April 2025. Manuscript number: RENE-D-25-04656. <https://track.authorhub.elsevier.com/?uuiid=73f4728a-baeb-47b2-b2ec-803095c5ffbe>
- Medina, P., Núñez, J., Ruiz-García, V. M., & Beltrán, A. (2021). Experimental and numerical comparison of CO₂ mass flow rate emissions, combustion and thermal performance for a biomass plancha-type cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 63, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.001>
- Núñez, J., Moctezuma-Sánchez, M. F., Fisher, E. M., Berrueta, V. M., Masera, O. R., & Beltrán, A. (2020). Natural-draft flow and heat transfer in a plancha-type biomass cookstove. *Renewable Energy*, 146, 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.007>

- Patange, O. S., Ramanathan, N., Rehman, I. H., Tripathi, S. N., Misra, A., Kar, A., ... & Ramanathan, V. (2015). Reductions in indoor black carbon concentrations from improved biomass stoves in rural India. *Environmental science & technology*, 49(7), 4749–4756. <https://doi.org/10.1021/es506208x>
- Pérez, G., Islas-Samperio, J. M., Grande-Acosta, G. K., & Manzini, F. (2022). Socioeconomic and environmental aspects of traditional firewood for cooking on the example of rural and peri-urban Mexican households. *Energies*, 15(13), 4904. <https://doi.org/10.3390/en15134904>
- Ruiz-García, V., Medina, P., Vázquez, J., Villanueva, D., Ramos, S., & Masera, O. (2021). Bioenergy devices: energy and emissions performance for the residential and industrial sectors in Mexico. *BioEnergy Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>
- Sadaka, S., & Johnson, D. M. (2011). *Biomass Combustion*. Cooperative Extension Service, University of Arkansas. US Department of Agriculture and county governments cooperating. https://www.researchgate.net/publication/278965157_Biomass_Combustion
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13(11), 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad5b8>
- Somwangthanaroj, S., & Fukuda, S. (2020). CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach. *Renewable Energy*, 148, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.042>
- Su, X., Ma, L., Fang, Q., Yin, C., Zhuang, H., Qiao, Y., ... & Chen, G. (2024). Optimizing biomass combustion in a 130 t/h grate boiler: Assessing gas-phase reaction models and primary air distribution strategies. *Applied Thermal Engineering*, 238, 122043. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122043>
- Tu, Y., Xu, M., Zhou, D., Wang, Q., Yang, W., & Liu, H. (2019). CFD and kinetic modelling study of methane MILD combustion in O₂/N₂, O₂/CO₂ and O₂/H₂O atmospheres. *Applied energy*, 240, 1003–1013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.046>
- Yang, M., Zhong, S., Xu, S., Xu, L., Ottosson, P., Fatehi, H., & Bai, X. S. (2023). CFD Simulation of Biomass Combustion in an Industrial Circulating Fluidized Bed Furnace. *Combustion Science and Technology*, 195(14), 3310–3340. <https://doi.org/10.1080/00102202.2023.2260553>
- Zadravec, T., Rajh, B., Kokalj, F., & Samec, N. (2020). CFD modelling of air staged combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100715. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>
- Zeng, K., Minh, D. P., Gauthier, D., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., & Flamant, G. (2015). The effect of temperature and heating rate on char properties obtained from solar pyrolysis of beech wood. *Bioresource technology*, 182, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.112>