

Simulaciones CFD de Pruebas WBT, CCT y Ciclo de Cocinado para la Estufa Patsari

Paulo C. Medina Mendoza ^{1,*}, Alberto Beltrán Morales ², Adolfo René Correa Castelán ³ y Agustín Mora Ortega 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.

³ División de Ingeniería Aeronáutica (DIA), 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.

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

Energías renovables (Biomasa)

Recibido: 13 de abril de 2026

Aceptado: 30 de junio de 2026

Publicado: 14 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.706>

Resumen: En este artículo se utiliza un modelo de combustión de 6 reacciones químicas (6R) para simular 2 pruebas de rendimiento en condiciones controladas y un ciclo de cocinado para la validación de dichos resultados numéricos con mediciones experimentales. Se utiliza el software Ansys Fluent para realizar las simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD) de la estufa de biomasa Patsari. Los resultados muestran que en la comparación de los datos experimentales y casos numéricos del ciclo de cocinado no se reportaron diferencias significativas en emisiones de CO₂, productos de la combustión incompleta (PIC's), eficiencias y emisiones de CO₂e lo cual representa uno de los resultados más relevantes de este trabajo dado que el ciclo representa el uso real de la estufa Patsari. Por otra parte, la comparación del coeficiente de exceso de aire (λ) de 3 vs. 2 en el ciclo de cocinado, muestra una clara diferencia en el efecto del exceso de aire sobre el rendimiento de una estufa de biomasa. En el caso de la eficiencia de combustión ($95.02 \pm 1.03\%$ vs $90.54 \pm 2.23\%$, 5%, $\alpha = 0.05$), mientras que para la térmica ($19.33 \pm 1.78\%$ vs $17.51 \pm 0.12\%$, 9%, $p = 0.22$) lo cual muestra la influencia de λ en la optimización de la eficiencia global de la estufa Patsari. La innovación de este estudio radica en el uso del modelo 6R para simular la fase gaseosa y sólida del proceso de combustión en comparación con estudios que implementan un modelo de 1 reacción.

Palabras clave: modelo de combustión, estufas de biomasa, eficiencia, reacción química

CFD Simulations of WBT, CCT and Cooking Cycle Tests for the Patsari Stove

Abstract: In this paper a 6-reaction combustion model (6R) is used to simulate two performance tests under controlled conditions and a cooking cycle to validate the numerical results with experimental measurements. The Patsari biomass stove was simulated using computational fluid dynamics (CFD) using Ansys Fluent software. The findings demonstrate that there were no discernible variations in CO₂ emissions, incomplete combustion products (ICPs), efficiency, or CO₂e emissions between the experimental data and the numerical scenarios of the cooking cycle. Given that the cycle depicts how the Patsari stove is used, this is one of the most important insights of the study. Additionally, there is a noticeable difference in the impact of excess air coefficient (λ) on a biomass stove's performance when comparing $\lambda = 3$ vs. $\lambda = 2$ in the cooking cycle. Thermal and combustion efficiencies are higher ($19.33 \pm 1.78\%$ vs. $17.51 \pm 0.12\%$, 9%, $p = 0.22$) and ($95.02 \pm 1.03\%$ vs. $90.54 \pm 2.23\%$, 5%, $\alpha = 0.05$), indicating the impact of λ on maximizing the global efficiency of the Patsari stove. In contrast to research that employs a 1-reaction model, this work is novel in that it uses the 6R model to mimic both the gas and solid phases of the combustion process.

Keywords: combustion model, biomass stoves, efficiency, chemical reaction

Introducción

Estufas de biomasa

Las estufas eficientes de biomasa (IBS) son dispositivos que optimizan tanto la transferencia de calor como el proceso de combustión (Medina., 2017a). Las IBS se han evaluado mediante diferentes pruebas de rendimiento tales como la prueba de ebullición de agua (WBT) la cual permite estimar diferentes parámetros tanto energéticos como de emisiones bajo condiciones controladas de laboratorio (WBT, 2026). La prueba de cocinado controlado (CCT), como su nombre lo indica, permite evaluar parámetros energéticos y de emisiones en la cocción de alimentos bajo un ambiente controlado (CCT, 2026).

Por último, el ciclo de cocinado es, a diferencia de las pruebas predecesoras, es una representación del cocinado bajo un ambiente de uso real replicando la forma en que los usuarios utilizan las IBS (Medina et al., 2017b). Bajo estos escenarios se ha demostrado que las IBS generan emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) tales como dióxido y monóxido de carbono (CO_2 , CO), metano (CH_4), hidrocarburos diferentes al metano (NMHC), óxido nitroso (N_2O), carbono elemental/negro (EC) (MacCarty et al., 2008).

CFD aplicado a IBS

Recientemente, el análisis numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha utilizado para simular el rendimiento de IBS tipo plancha (provistas de una superficie metálica para la cocción de alimentos y una chimenea) obteniendo diferentes resultados desde perfiles de temperatura de las zonas más relevantes de las geometrías hasta parámetros de combustión y eficiencia global (Galindo et al., 2025; Núñez et al., 2020; Gómez-Heleria et al., 2023) mediante un modelo de una reacción química (1R). Medina et al., (2024) propusieron una mejora en la simulación numérica de la combustión de biomasa en IBS al reportar un modelo de dos reacciones químicas (2R) en las cuales se modelan los volátiles de la biomasa (oxidación parcial) y la oxidación del CO para formar CO_2 . A pesar de ello, los modelos de combustión de 1 o 2 reacciones simplifican de forma significativa el proceso de combustión lo cual limita de forma importante la validación de simulaciones numéricas CFD en relación con mediciones experimentales. Además, desde el punto de vista del fenómeno de combustión, este modelo presenta importantes limitaciones debido a que únicamente simula las emisiones de CO_2 lo cual no permite realizar un análisis de las emisiones de productos de la combustión incompleta (PIC's) y por tanto el cálculo de variables fundamentales tales como la eficiencia de combustión resulta poco representativo.

El objetivo central de este artículo consiste en un utilizar un modelo de combustión de 6 reacciones químicas (6R) para simular 2 pruebas de rendimiento de IBS en condiciones controladas y un ciclo de cocción para la validación de dichos resultados numéricos con mediciones experimentales. La innovación del estudio se explica debido a que el modelo de combustión 6R simula tanto la fase gaseosa como la fase sólida del proceso con lo cual se esperan obtener resultados numéricos de mayor precisión en relación con los modelos simples 1R o 2R. Adicionalmente, existe poco conocimiento de estudios numéricos que hayan simulado 3 diferentes enfoques para una IBS tipo plancha, si bien, el utilizar un análisis CFD para replicar el uso real de las IBS tiene sus limitaciones, los Autores de este trabajo presentan el fundamento preciso en cuanto a la configuración numérica para considerar válidos dichos hallazgos.

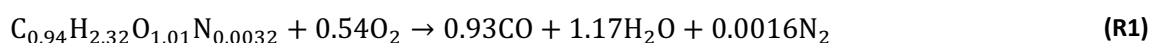
Materiales y Métodos

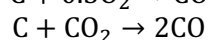
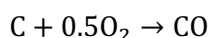
Mediciones experimentales

Para la validación de los resultados numéricos obtenidos mediante las simulaciones CFD, se utilizaron como referencia diferentes estudios reportados en la bibliografía. Para las pruebas WBT ($N=6$, alta potencia) y ($N=3$, baja potencia) (Padilla-Barrera et al., 2019; Medina et al., 2017c), para las pruebas CCT de tortillas ($N=3$) y ciclo de cocinado ($N=3$) se utiliza el estudio de (Medina et al. 2017b). Finalmente, en el estudio reportado por (Straffon., 2009) se reportan las temperaturas del comal principal de la estufa Patsari durante diferentes pruebas de rendimiento.

Modelo de combustión 6R

Para simular el proceso de combustión de la estufa Patsari se utiliza un modelo de seis reacciones químicas (Medina et al., 2026) 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). En otras palabras, este mecanismo de reacciones se puede acoplar a las etapas del proceso de combustión de biomasa de la siguiente forma: la oxidación parcial de los volátiles se lleva a cabo en la reacción R1, la gasificación se produce en las reacciones R5 y R6 y finalmente la oxidación completa se realiza en las reacciones R2 y R4. La reacción R3 describe la combustión del CH_4 en la cual se produce CO como producto principal.





Estudios recientes han implementado un mecanismo similar al reportado en estas seis reacciones químicas (Shi et al., 2006; Miltner et al., 2006). En algunos casos el número de reacciones puede ser mayor, sin embargo, el modelo de combustión numérico debe considerar las fases homogénea y heterogénea para considerarse representativo lo cual es una característica que el modelo 6R cumple.

Configuración CFD

El software ANSYS Fluent fue utilizado para realizar las simulaciones numéricas de la estufa Patsari utilizando un equipo de cómputo de alto rendimiento con tiempos computacionales de aproximadamente 8 horas por simulación.

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 = 0.935 y oblicuidad = 0.127 y un número de elementos de 626,750. La Figura 1 muestra el volumen interior, así como la malla computacional de la estufa Patsari.

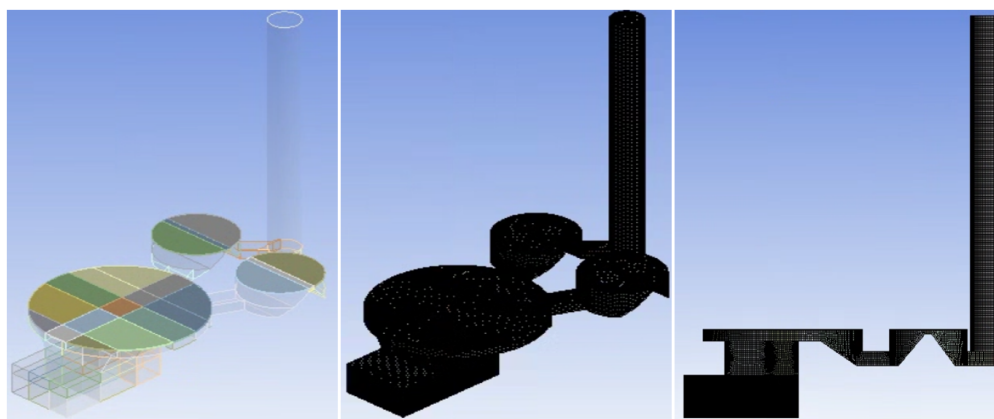


Figura 1. Volumen interno y malla computacional de la estufa Patsari. Vistas isométrica y lateral.

Dominio computacional. El volumen interno de la estufa 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 de gases.

Modelo de turbulencia. El modelo 'k-epsilon' fue empleado para simular el flujo bajo condiciones de turbulencia (Marangwanda et al., 2020).

Modelo de radiación. Para simular el mecanismo de transferencia de calor por radiación se implementó el modelo de ordenadas discretas (Tu et al., 2019; Somwangthanaroj y Fukuda., 2020).

Especies. Se utiliza el modelo 'Finite-Rate/Eddy-Dissipation' el cual utiliza los parámetros de Arrhenius de cinética química y un mezclado turbulento. Para configurar el modelo 6R, se activó el módulo 'Coal Calculator' de ANSYS Fluent en el cual se introducen los porcentajes de volátiles de la biomasa (leña), carbono fijo y contenido de humedad (H), con estos valores el simulador genera la composición química de la biomasa utilizada en la reacción R1. Además, 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 hollín.

Fase discreta. Para simular la fase sólida del proceso de combustión (gasificación del carbón residual) se utiliza este módulo del simulador el cual ha sido reportado en estudios previos (Marangwanda et al., 2020).

Materiales. En el cuerpo de la estufa Patsari se consideró un coeficiente convectivo (h) de 10 y 30 W/m²K considerando el material refractario de construcción, así como los escenarios de entrada de aire de los casos numéricos. Para determinar el h del comal principal se realizaron diferentes simulaciones variando el valor de h hasta obtener valores cercanos de la temperatura del comal numérica (Tc-num) en relación con la experimental (Tc-exp) (Straffon., 2009). Los valores de h utilizados fueron para las pruebas WBT de alta potencia (150 W/m²K), WBT baja potencia (175 W/m²K) y 200 W/m²K para las pruebas CCT y de ciclo de cocinado. Para el acero bajo tiro forzado el rango de h es de 25-250 W/m²K lo cual se encuentra en buen acuerdo con los valores utilizados en las simulaciones numéricas.

Discretización. Se configuró de la siguiente forma de acuerdo con lo reportado en estudios previos (Medina et al., 2022). Gradientes: 'Least Squares Cell Based', Presión: segundo orden, Momento: segundo orden, Energía cinética turbulenta: segundo orden y Tasa de disipación turbulenta: segundo orden.

Supuestos del modelo. La resolución de las ecuaciones de masa, momento y energía mediante el método de volúmenes finitos requiere de una serie de supuestos físicos y matemáticos (ANSYS., 2026) asumiendo: que el fluido obedece las leyes de conservación en todo el dominio, medio continuo, flujo newtoniano, que el fluido cumple con ecuaciones de estado, simplificación en la turbulencia introduciendo el modelo k- ϵ , que las condiciones iniciales y de frontera representan el sistema real y que los resultados numéricos son válidos cuando se alcanza la convergencia establecida.

Criterios de convergencia. En el simulador ANSYS Fluent se consideró la convergencia numérica utilizando un valor de 1×10^{-6} para las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía (Medina et al., 2022).

Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada utilizados en las simulaciones numéricas de cada prueba de rendimiento se muestran en la Tabla 1. Adicionalmente, en la zona de entrada de volátiles del dominio computacional se introduce el valor de flujo másico de volátiles que se calcula 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). En las zonas de aire primario y secundario del dominio, se realizaron los cálculos estequiométricos necesarios tomando en consideración las reacciones R1 y R2, así como los valores respectivos del coeficiente de exceso de aire (λ) para estimar los flujos de aire. La temperatura de entrada en cada caso numérico es una función del coeficiente λ de acuerdo con lo reportado por (Koppejan y Van Loo., 2012).

Tabla 1. Parámetros experimentales para configurar las simulaciones de las diferentes pruebas de rendimiento.

Prueba	Tarea/Fase	N	Biomasa (g)	Tiempo (min)	H (%)	λ	T entrada (K)
WBT	Alta potencia	1	2530	44.9	6.6	2	1723
		2	1840	30	6.6	2	1723
		3	2000	40.5	8.5	2	1723
		4	1541	32	8.5	2	1723
		5	2019	56.5	7.3	2	1723
		6	1599	26	7.3	2	1723
	Baja potencia	1	1430	45	6.6	3	1423
		2	1321	45	8.5	3	1423
		3	1170	45	7.3	3	1423
CCT	Tortillas	1	1566	45.30	7.9	2	1723
		2	1438	54.20	7.1	2	1723
		3	1346	44.40	8.3	2	1723
Ciclo de cocinado	Secuencial	1	5346	202	15.3	3	1423
		2	4966	177	13.8	3	1423
		3	6166	193	14.6	3	1423
		1	5346	202	15.3	2	1723
		2	4966	177	13.8	2	1723
		3	6166	193	14.6	2	1723

Cálculos

Para el cálculo de la eficiencia de combustión experimental (ECE) y la eficiencia térmica experimental (ETE) se utilizaron las siguientes expresiones. La Ecuación 1 muestra la expresión para estimar la ECE, mientras que mediante la Ecuación 2 se calcula la ETE.

$$ECE = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{PIC's}} \quad (1)$$

Donde los productos de la combustión incompleta (PIC's) incluyen las emisiones de CO y material particulado (PM_{2.5}).

$$ETE = \frac{Q_{c-exp}}{\text{potencia de entrada}} \quad (2)$$

Donde Q_{c-exp} es el calor convectivo del comal metálico de la estufa Patsari el cual se calcular considerando el coeficiente h , la temperatura experimental del comal (Straffon., 2009), la temperatura del fluido en cada prueba de rendimiento (Medina et al., 2017b; Padilla-Barrera et al., 2019) y el área del comal. En el caso de la eficiencia numérica de combustión (NCE) al igual que para la ECE se consideran los flujos de CO₂ y PIC's además del fujo de volátiles inquemados como se muestra en la Ecuación 3. Los PIC's en este caso incluyen las emisiones de CO, CH₄ y Soot. Para calcular la eficiencia térmica numérica (NTE) se utiliza el calor convectivo del comal (Q_{c-num}) obtenido directamente del simulador ANSYS Fluent.

$$ECE = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{PIC's} + \dot{m}_{\text{volátiles inquemados}}} \quad (3)$$

$$NTE = \frac{Q_{c-num}}{\text{potencia de entrada}} \quad (4)$$

Para el cálculo de las emisiones de CO₂e de la estufa Patsari fueron utilizados los potenciales de calentamiento global (GWP) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) sobre un horizonte de 100 años. Para representar la fracción de no renovabilidad de la biomasa (fNRB) se utiliza un valor para el CO₂ igual a 0.25 (Bailis et al., 2015). La fNRB o la cantidad de reservas de biomasa perdidas durante un período de tiempo específico, está representada por el valor de 0.25 antes mencionado. La proporción de madera extraída por encima de la tasa natural de regeneración se cuantifica mediante la fNRB. Las estimaciones precisas de fNRB ayudan a garantizar la precisión de las reducciones de emisiones de carbono de las iniciativas de cocinado limpio de acuerdo con lo reportado por (Ghilardi y Bailis., 2024). Estos autores informan un valor para fNRB para México de CO₂ = 0.28 lo cual es un valor aceptable al utilizado en las simulaciones numéricas CFD. Los valores de GWP para los PIC fueron: CO = 1.9 (IPCC., 2007), CH₄ = 28 (IPCC., 2014), NOx = 10 (Lammel y Graßl., 1995) y EC = 680 (MacCarty et al., 2008). Es importante mencionar que, aunque el EC y el hollín (Soot) no son idénticos (el hollín es una mezcla compleja de subproductos de la combustión con el carbono elemental como componente principal), es posible realizar una comparación (Wolff, 1985). Las emisiones de CO₂e se calculan mediante la sumatoria de las contribuciones individuales de cada gas (expresadas como factores de emisión) considerando el GWP respectivo.

Casos experimentales, de simulación y diferencias

Se utilizó la siguiente nomenclatura en los diferentes casos numéricos de simulación.

Pruebas WBT. 6R_L2_WBThp y 6R_L2_WBTlp alta y baja potencia, respectivamente.

Pruebas CCT. 6R_L2_CCT para la prueba de elaboración de tortillas.

Ciclo de cocinado. 6R_L3_Ciclo y 6R_L2_Ciclo. Es importante mencionar que los términos L2 y L3 se refieren a los valores de $\lambda = 2$ y $\lambda = 3$, respectivamente.

Casos experimentales. WBThp_Exp y WBTlp_Exp (alta y baja potencia), CCT_Exp y Ciclo_Exp. Por otra parte, para comparar las mediciones experimentales y los resultados numéricos se utilizaron diferencias porcentuales y la prueba estadística t para determinar si esas diferencias entre las medias son estadísticamente significativas.

De Winter., (2013) concluyó que no existen limitaciones en cuanto al uso de una prueba t con tamaños de muestra pequeños incluso $N \leq 5$. Por tanto, resulta válido el utilizar la prueba t para comparar los resultados de las pruebas WBT ($N = 6$, $N = 3$), CCT ($N = 3$) y ciclos de cocinado ($N = 3$) utilizando los siguientes niveles de significancia: 1% ($\alpha = 0,01$), 5% ($\alpha = 0,05$) y 10% ($\alpha = 0,1$).

Resultados y Discusión

Validación

Parámetros de rendimiento

La Tabla 2 reporta los parámetros globales de las mediciones experimentales (Medina et al., 2017b; Medina et al., 2017c) en comparación con los casos numéricos para las diferentes pruebas en la estufa Patsari. El flujo másico de PIC's vs las eficiencias de combustión numérica y experimental se muestran en la Figura 2 mientras que en la Figura 3, se reportan las eficiencias térmicas y el calor del comal. En ambos casos se muestra la comparación de casos numéricos en relación con datos experimentales.

Tabla 2. Parámetros globales de rendimiento para datos experimentales vs simulaciones numéricas

Caso	N	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	PIC's (kg/s)	ECE, NCE (%)	ETE, NTE (%)	Qc-exp, Qc-num (W)	Tc-exp, Tc-num (K)
WBThp_Exp [10]	6	WBT alta potencia	1.10E-03 ± 2.06E-04	1.03E-05 ± 2.12E-06	1.17E-05 ± 1.68E-06	98.94 ± 0.15	17.28 ± 1.46	7743 ± 71	563
6R_L2_WBThp	6		1.03E-03 ± 1.78E-04	3.15E-05 ± 7.23E-06	3.40E-05 ± 7.73E-06	95.30 ± 0.30	16.16 ± 1.49	8470 ± 376	521 ± 24
Diferencias (%) valor p	- -	- -	6 0.54	67 0.00*	66 0.00*	4 0.00*	6 0.22	9 0.00*	8 0.01*
WBThp_Exp [10]	3	WBT baja potencia	6.70E-04 ± 7.22E-05	7.31E-06 ± 3.49E-06	8.04E-06 ± 3.46E-06	98.84 ± 0.36	20.21 ± 2.03	4972 ± 106	453
6R_L2_WBThp	3		6.93E-04 ± 4.12E-05	1.80E-05 ± 4.05E-06	1.91E-05 ± 3.72E-06	97.27 ± 0.45	20.30 ± 1.15	5005 ± 111	406 ± 2
Diferencias (%) valor p	- -	- -	3 0.66	59 0.03*	58 0.02*	2 0.01*	0 1.0	1 0.73	10 0.00*
CCT_Exp [4]	3	CCT Tortillas	6.86E-04 ± 8.09E-05	2.12E-05 ± 3.13E-06	2.20E-05 ± 3.19E-06	96.90 ± 0.26	20.01 ± 1.52	6100 ± 60	463
6R_L2_CCT	3		5.95E-04 ± 6.64E-05	2.03E-05 ± 3.99E-06	2.17E-05 ± 4.06E-06	94.86 ± 0.15	19.55 ± 0.46	7521 ± 346	434 ± 6
Diferencias (%) valor p	- -	- -	13 0.21	4 0.78	1 0.94	2 0.00*	2 0.66	19 0.02*	6.3 0.02*
Ciclo_Exp [4]	3	Ciclo de cocinado	8.37E-04 ± 7.31E-04	3.19E-05 ± 2.53E-05	2.97E-05 ± 8.17E-07	96.18 ± 0.35	19.68 ± 1.27	4752 ± 108	463
6R_L3_Ciclo	3		8.16E-04 ± 6.26E-05	3.68E-05 ± 9.54E-06	3.79E-05 ± 9.35E-06	95.02 ± 1.03	19.33 ± 1.78	5348 ± 338	405 ± 8
Diferencias (%) valor p	- -	- -	3 0.33	13 0.28	22 0.27	1 0.18	2 0.80	11 0.07*	13 0.01*
Experimental [4]	3	Ciclo de cocinado	8.37E-04 ± 7.31E-04	3.19E-05 ± 2.53E-05	2.97E-05 ± 8.17E-07	96.18 ± 0.35	19.68 ± 1.27	4752 ± 108	463
6R_L2_Ciclo	3		6.02E-04 ± 1.72E-04	5.09E-05 ± 1.38E-06	5.23E-05 ± 1.32E-06	90.54 ± 2.23	17.51 ± 0.12	6423 ± 355	419 ± 7
Diferencias (%) valor p	- -	- -	28 0.27	37 0.00*	43 0.00*	6 0.05*	11 0.10	11 0.01*	9 0.01*

Nota: * valor p, diferencia estadísticamente significativa; ECE: eficiencia de combustión experimental; NCE: eficiencia de combustión numérica; Qc-exp: calor del comal experimental; Qc-num: calor del comal numérico; Tc-exp: temperatura del comal experimental; Tc-num: temperatura del comal numérica.

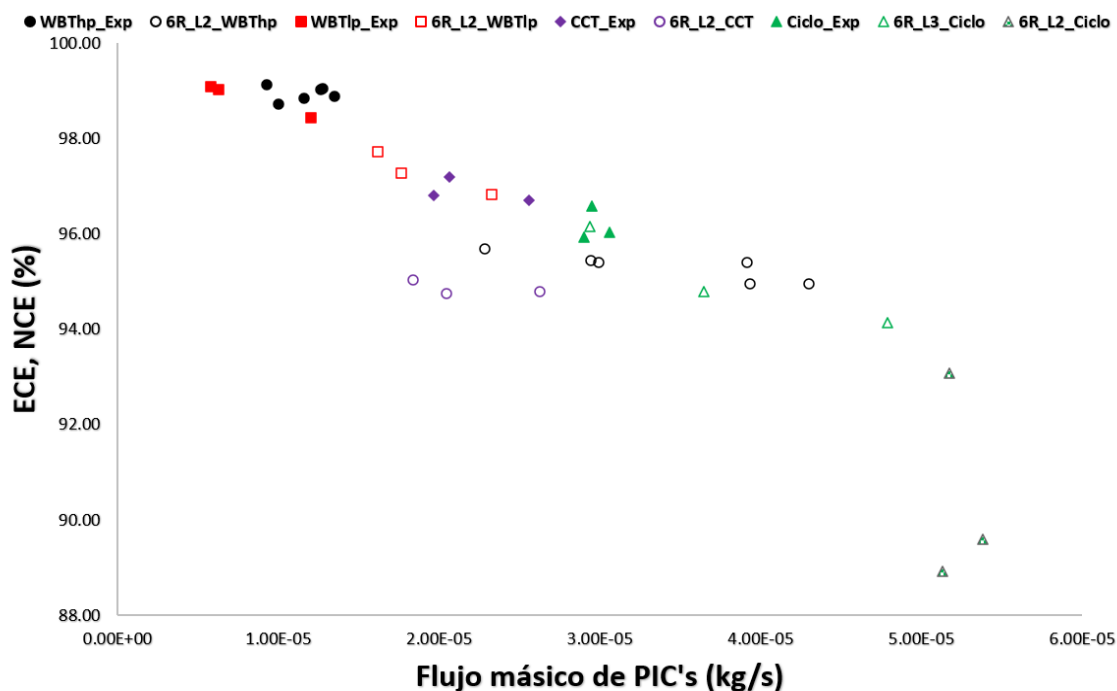


Figura 2. Relación entre flujo másico de PIC's y eficiencias de combustión.

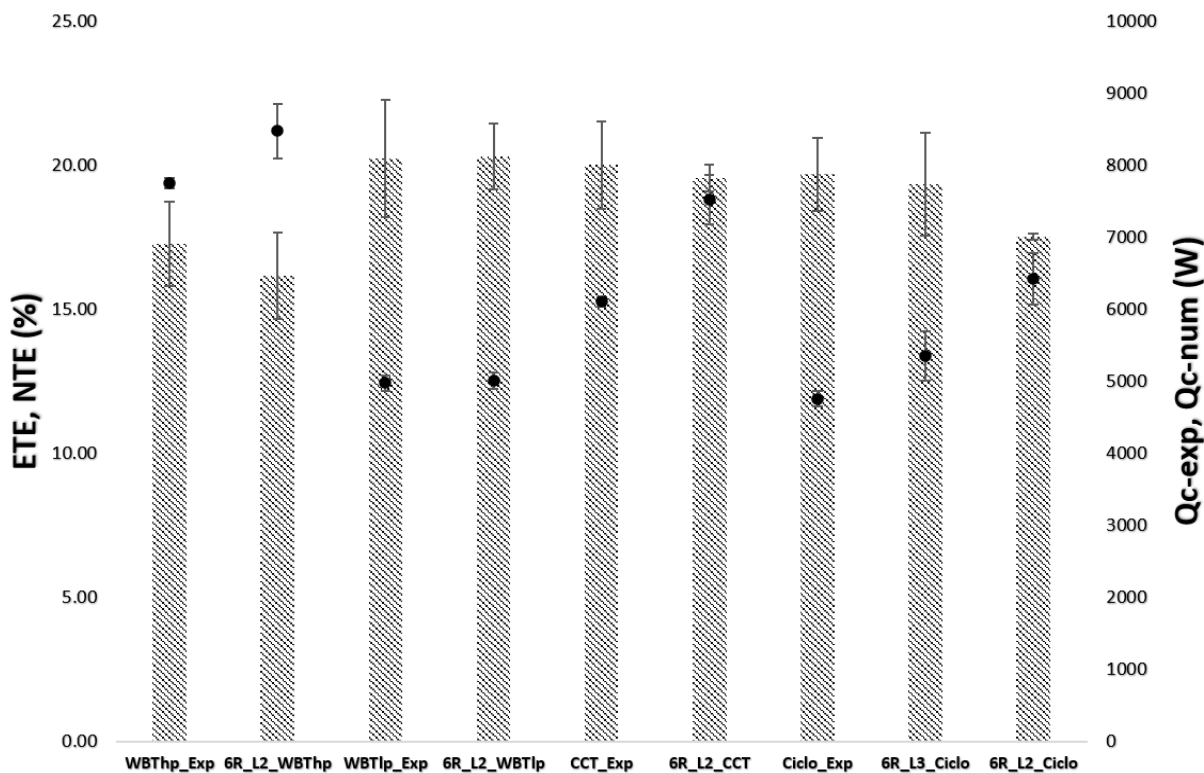


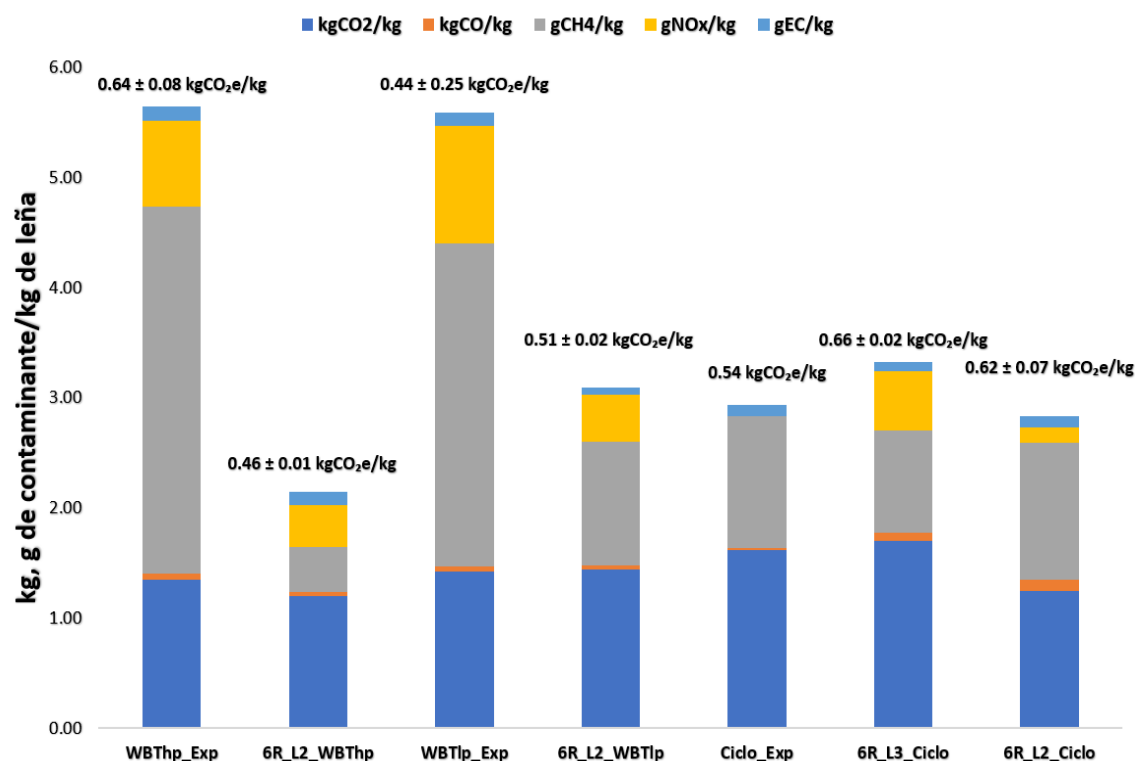
Figura 3. Eficiencia térmica y calor del comal para mediciones experimentales y casos numéricos.

Factores de emisión y CO₂e

Para mostrar los factores de emisión de los diferentes parámetros la Tabla 3 es reportada. Por otra parte, la contribución individual de cada contaminante en los diferentes escenarios numéricos en comparación con sus respectivos análogos experimentales se muestra en la Figura 4.

Tabla 3. Factores de emisión y emisiones de CO₂e para las pruebas experimentales en relación con las simulaciones numéricas

Caso	N	Prueba	CO ₂ (g/kg)	CO (g/kg)	CH ₄ (g/kg)	NOx (g/kg)	EC, Soot (g/kg)	kgCO ₂ e/kg
WBThp_Exp [9]	6	WBT	1343 ± 156	56 ± 13	3.33 ± 1.59	0.78 ± 0.13	0.14 ± 0.09	0.64 ± 0.08
6R_L2_WBThp	6	alta potencia	1195 ± 37	36 ± 2	0.41 ± 0.21	0.39 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.46 ± 0.01
Diferencia (%)	-	-	11	36	88	50	15	28
valor p	-	-	0.07	0.01	0.01	0.00	0.57	0.01
WBtlp_Exp [9]	6	WBT	1423 ± 100	42 ± 7	2.94 ± 1.49	1.06 ± 0.28	0.13 ± 0.08	0.44 ± 0.25
6R_L2_WBtlp	-	baja potencia	1436 ± 86	37 ± 9	1.12 ± 0.65	0.43 ± 0.03	0.07 ± 0.01	0.51 ± 0.02
Diferencia (%)	-	-	1	11	62	60	47	13
valor p	-	-	0.88	0.54	0.16	0.06	0.33	0.27
Ciclo_Exp [11]	1	Ciclo de	1617 ± 22	19 ± 11	1.20 ± 1.0	N/A	0.1 ± 0.2	0.54
6R_L3_Ciclo	3	cocinado	1701 ± 72	76 ± 14	0.92 ± 0.63	0.54 ± 0.14	0.09 ± 0.01	0.66 ± 0.02
Diferencia (%)	-	-	5	75	6	N/A	10	18
Experimental [11]	1	Ciclo de	1617 ± 22	19 ± 11	1.20 ± 1.0	N/A	0.1 ± 0.2	0.54
6R_L2_Ciclo	3	cocinado	1241 ± 242	107 ± 13	1.24 ± 0.45	0.15 ± 0.11	0.10 ± 0.02	0.62 ± 0.07
Diferencia (%)	-	-	23	83	3	N/A	3	12

Figura 4. Contribución de contaminantes y emisiones de CO₂e promedio para pruebas experimentales vs. Casos numéricos.

Análisis de sensibilidad

En la Tabla 4 se muestra el análisis de sensibilidad de la malla utilizada en las simulaciones CFD en comparación con los casos 1 y 2, se reportan el flujo de CO₂ y la NCE. En el caso 1, la diferencia en ambos parámetros fue de 4.07% y 0.20% para CO₂ y NCE, respectivamente, mientras que para el caso 2 fueron de 1.22% y 0.73%. Se puede inferir que el uso de la malla de 626,750 elementos de las simulaciones produce resultados precisos y confiables.

Tabla 4. Análisis de sensibilidad para la malla utilizada en las simulaciones en relación con los casos 1 y 2

Malla	No. elementos	CO ₂ (kg/s)	NCE (%)
Actual	626750	1.10E-03	94.94
Caso 1	446347	1.06E-03	95.13
Diferencia (%)	-	4.07	0.20
Caso 2	352956	1.09E-03	95.64
Diferencia (%)	-	1.22	0.73

Análisis de casos numéricos

La Tabla 5 y Figura 5 reportan una comparación entre los casos numéricos del ciclo de cocinado utilizando dos valores diferentes de λ (2 y 3). Es importante mencionar que se utilizan los perfiles de temperatura de la estufa Patsari de la prueba 3 en la comparación de la Figura 5.

Tabla 5. Comparación de parámetros generales entre casos numéricos: 6R_L3_Ciclo y 6R_L2_Ciclo

Caso	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	PIC's (kg/s)	NCE (%)	NTE (%)	Qc-exp, Qc-num (W)	Tc-exp, Tc-num (K)
6R_L3_Ciclo	Ciclo de cocinado	8.16E-04 ±	3.68E-05 ±	3.79E-05 ±	95.02 ±	19.33 ±	5348 ±	405 ± 8
		6.26E-05	9.54E-06	9.35E-06	1.03	1.78	338	
6R_L2_Ciclo		6.02E-04 ±	5.09E-05 ±	5.23E-05 ±	90.54 ±	17.51 ±	6423 ±	419 ± 7
		1.72E-04	1.38E-06	1.32E-06	2.23	0.12	355	
Diferencias (%)	-	26	28	27	5	9	17	3
valor p	-	0.01	0.10	0.10	0.06	0.22	0.02	0.08

Nota: * valor p, diferencia estadísticamente significativa; ECE: eficiencia de combustión experimental; NCE: eficiencia de combustión numérica; Qc-exp: calor del comal experimental; Qc-num: calor del comal numérico; Tc-exp: temperatura del comal experimental; Tc-num: temperatura del comal numérica.

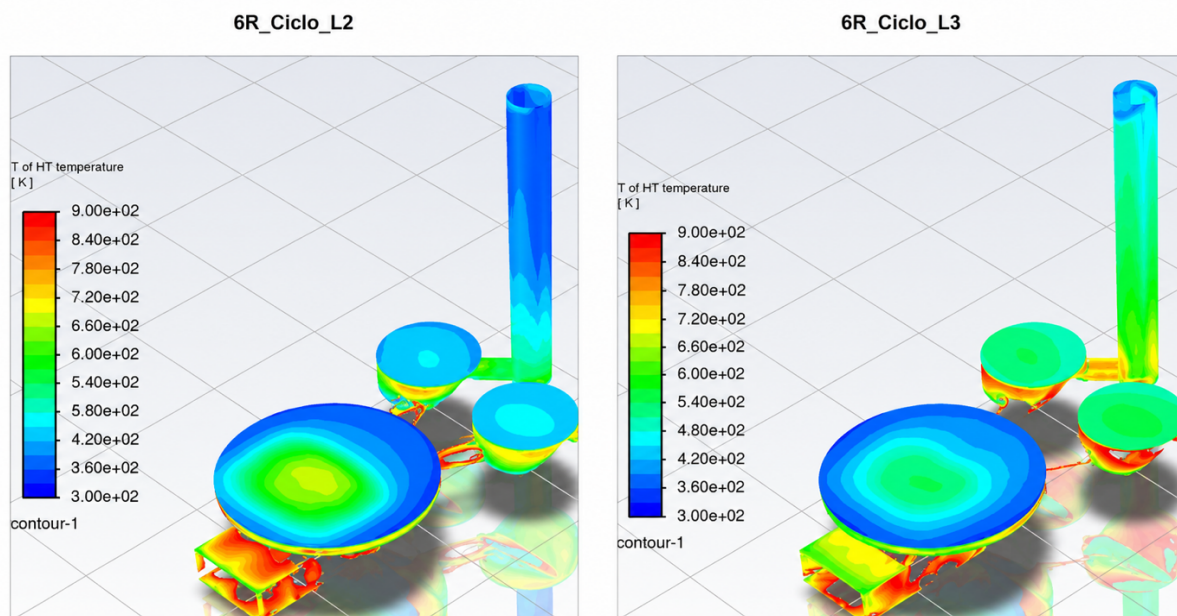


Figura 5. Distribución de temperatura en el cuerpo de la estufa Patsari para la prueba 3: casos 6R_L2_Ciclo ($\lambda = 2$) vs 6R_L3_Ciclo ($\lambda = 2$).

Discusión de resultados

Ciclo de cocinado. Los resultados de la simulación del ciclo de cocinado son de fundamental importancia dado que el ciclo representa el uso real de la estufa Patsari durante un día normal en la cocción de alimentos. El caso 6R_L3_Ciclo predijo de manera acertada todos los parámetros evaluados excepto la temperatura y el calor convectivo del comal (ver Figura 1 y Tabla 2). La NCE fue correctamente simulada, al no obtener diferencias significativas, a pesar de que la ecuación 3 es más robusta en comparación con la ecuación de la ECE. La tendencia experimental de una menor ECE en el ciclo de cocinado respecto a las pruebas WBT también fue observada en las simulaciones numéricas lo cual muestra que durante el uso real del dispositivo de combustión existen variaciones, como un mayor tiempo de operación, las cuales influyen en la disminución de la eficiencia de combustión.

Por otra parte, el desempeño térmico de la estufa Patsari fue correctamente predicho por el caso 6R_L3_Ciclo en términos de eficiencia térmica, sin embargo, el calor convectivo del comal presenta diferencias estadísticamente significativas lo cual es un indicativo de revisar con mayor profundidad la carga térmica del comal de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ de las simulaciones numéricas CFD. El cálculo de emisiones de CO_2e en el ciclo de cocinado resulta trascendental debido a que representa la contribución de una estufa eficiente de leña al cambio climático en la cual el caso Ciclo_Exp mostró $0.54 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ en comparación con $0.66 \pm 0.02 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ con una diferencia porcentual de 18% que a pesar de ser una diferencia relativamente menor es necesario utilizar una prueba estadística para determinar si es significativa o no.

El efecto del coeficiente de exceso de aire en el rendimiento de la estufa Patsari durante el ciclo de cocinado se puede visualizar comparando los casos de λ . En el caso de las emisiones de CO_2e , los resultados muestran que para los casos numéricos de $\lambda = 3$ y $\lambda = 2$ (0.54 vs $0.66 \pm 0.02 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$, 18%) y (0.54 vs $0.62 \pm 0.07 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$, 18%), respectivamente. La comparación de $\lambda = 3$ vs $\lambda = 2$, muestra una clara diferencia en el efecto del exceso de aire sobre el rendimiento de una estufa de biomasa. En el caso de la eficiencia de combustión ($95.02 \pm 1.03\%$ vs $90.54 \pm 2.23\%$, 5%, $\alpha = 0.05$), mientras que para la térmica ($19.33 \pm 1.78\%$ vs $17.51 \pm 0.12\%$, 9%, $p = 0.22$) lo cual muestra la influencia de λ en la optimización de la eficiencia global de una IBS que está en buen acuerdo con lo reportado por Medina et al. [6]. El uso de un mayor λ tiene un efecto sustancial en el tiro de la chimenea lo cual mejora el flujo de fluidos dentro del cuerpo de la estufa y a la vez optimiza la eficiencia de combustión (ver Figura 5).

Pruebas WBT. La relevancia de simular las pruebas de laboratorio WBT radica en que dicha prueba consta de dos fases una de alta potencia y otra de baja en las cuales se observa una diferencia sustancial en el rendimiento de una IBS. Durante la potencia alta se restringe la entrada de aire en la cámara de combustión (debido a la cantidad de combustible) lo que reduce la ECE en comparación con la fase de baja potencia (Medina et al., 2017c). Esta tendencia experimental fue observada en los resultados numéricos de la NCE en los cuales el efecto de $\lambda = 3$ optimiza el valor de la eficiencia de combustión en la fase de baja potencia. Los resultados son aún más notorios en la eficiencia térmica durante la fase de baja potencia en la cual se observaron mayores valores tanto de ETE como de NTE lo cual posiblemente se pueda explicar debido a que la estufa aprovecha de forma más eficiente la energía química de la leña. En la comparación de CO_2e no se reportaron diferencias estadísticamente significativas en la fase de baja potencia 0.44 ± 0.25 vs $0.51 \pm 0.02 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ (13%, $p = 0.27$) lo cual valida parcialmente los resultados numéricos puesto que en la fase de alta potencia se reportan diferencias significativas.

En la comparación de los flujos máscicos de CO_2 de ambas fases no se reportaron diferencias estadísticamente significativas siendo esta misma tendencia en los factores de emisión. Los resultados de emisiones de PIC's fueron estadísticamente diferentes al comparar los datos experimentales con las simulaciones numéricas, sin embargo, se observa la misma tendencia que en la fase de baja potencia se presenta una reducción sustancial de emisiones de CO y por ende de PIC's. Las discrepancias se pueden explicar debido a que los resultados numéricos sobreestimaron de forma significativa las emisiones de CO lo que sugiere que es necesario revisar la configuración CFD en particular la fase discreta y las reacciones del carbón residual puesto que las mismas diferencias se reportan en los factores de emisión. Por otra parte, la contribución de CH_4 en ambas fases de la prueba WBT experimental fue sustancial (ver Figura 4) lo cual no fue replicado en los casos numéricos con diferencias de 88% y 62% (Tabla 3) lo que sugiere que el mecanismo de reacciones del modelo 6R subestima las emisiones de metano y posiblemente sea necesaria la adición de reacciones adicionales en la formación de CH_4 . Los factores de emisión experimentales de NO_x fueron reportados diferencia

estadísticamente significativa lo cual puede explicarse debido al uso del modelo NOx del simulador Ansys Fluent el cual posiblemente subestime las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Pruebas CCT. La tarea de cocinado de elaboración de tortillas es el alimento base de los usuarios de estufas eficientes de biomasa (Berrueta et al., 2008) lo cual justifica el simular dicha prueba CCT. La elección del coeficiente $\lambda = 2$ (Tabla 1) se basa en que es una tarea de alta potencia en la cual la cámara de combustión se alimenta con suficiente leña para que el comal metálico alcance la mayor temperatura. Esta acción puede restringir el ingreso de aire primario y secundario (al igual que la prueba WBT de alta potencia) lo cual puede reducir la eficiencia de combustión. En cuanto a la comparación de resultados, las simulaciones numéricas predijeron de forma acertada el flujo de emisiones de CO₂, CO, y PIC's en relación con los experimentales no encontrando diferencias significativas. Para la eficiencia de combustión y térmica los resultados fueron (2%, <0.01) y (2%, 0.66), respectivamente. De igual manera, se encontraron diferencias significativas tanto en el calor del comal como en la temperatura de la superficie metálica. Al parecer, el utilizar $\lambda = 2$ en las simulaciones numéricas no replicó correctamente la eficiencia de combustión lo que sugiere variar el valor del coeficiente para analizar el efecto en esta variable de fundamental importancia. También, se debe analizar detenidamente el valor del coeficiente convectivo del comal metálico en las simulaciones ($h = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$) el cual posiblemente tenga una influencia importante en los resultados numéricos.

Limitaciones y trabajo futuro

1. **Modelo de combustión.** Si bien el modelo 6R representa una mejora sustancial en relación con los modelos de 1R y 2R, es necesario continuar desarrollando el mecanismo de reacciones químicas del proceso de combustión de biomasa. Este modelo 6R presenta algunas discrepancias en la predicción de emisiones tales como el CO y CH₄ lo cual puede ser subsanado considerando reacciones químicas adicionales en el mecanismo.
2. **Configuración numérica CFD.** Los Autores de este artículo sugieren que se implementen reacciones químicas en lugar de utilizar los modelos de NOx y Soot del software Ansys Fluent. El utilizar únicamente estos modelos en el simulador puede subestimar las emisiones de ambos contaminantes tal y como se reporta en los factores de emisión de este trabajo.
3. **Coeficiente convectivo.** Algunas de las diferencias significativas en el rendimiento térmico de la estufa Patsari posiblemente se expliquen debido al coeficiente h del comal metálico utilizado en las simulaciones numéricas. Se sugiere que se haga un análisis exhaustivo en este sentido para determinar el valor óptimo de h en futuras simulaciones de IBS de biomasa.

Conclusiones

En la comparación de los casos Ciclo_Exp vs. 6R_L3_Ciclo ($\lambda = 3$) para el ciclo de cocinado no se reportaron diferencias significativas en emisiones de CO₂, PIC's, eficiencias y CO₂e lo cual representa uno de los resultados más relevantes de este trabajo dado que el ciclo representa el uso real de la estufa Patsari. La comparación entre casos numéricos del ciclo de cocinado muestra la influencia sustancial que tiene el uso del coeficiente λ en el rendimiento de una IBS. La reducción de PIC's fue notoria al utilizar $\lambda = 3$ mientras que tanto la eficiencia térmica como la de combustión fueron optimizadas significativamente. Los resultados de prueba WBT muestran que las simulaciones numéricas replicaron la tendencia experimental de reducción de emisiones de PIC's e incremento en la eficiencia de combustión en la fase de baja potencia. Por tanto, el uso de $\lambda = 3$ para replicar la fase de baja potencia fue correctamente validado.

Por otra parte, el uso de $\lambda = 2$ en las pruebas CCT replicó de forma acertada el flujo de emisiones de CO₂, CO, PM y PIC's, así como la eficiencia térmica. Sin embargo, se sugiere analizar el efecto del coeficiente h en las simulaciones numéricas. Finalmente, los autores de este trabajo sugieren que se siga explorando el desarrollo de modelos de combustión más complejos que el 6R, acompañados de variables de suma importancia como el coeficiente de exceso de aire, para subsanar las diferencias en emisiones y rendimiento energético encontradas en este trabajo. En este sentido, es de fundamental importancia implementar reacciones para la formación de NOx y Soot así como reacciones adicionales en la formación de CH₄ en trabajos futuros.

Bibliografía

ANSYS Software. (2026). ANSYS Fluent theory guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v261/en/pdf/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf

- 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., Sjoblom, J., & Strom, 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>
- Clean Cooking Alliance. (2026). *Controlled cooking test (CCT)*. <https://cleancooking.org/protocols/>
- Clean Cooking Alliance. (2026). *Water boiling test, version 4.2.3*. <https://cleancooking.org/protocols/>
- de Winter, J. C. (2013). Using the student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 18(10). <https://eric.ed.gov/?id=EJ1015748>
- 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-Heleria, D., Núñez, J., & García, C. A. (2025). CFD simulation and implementation of a griddle-type biomass stove for rural communities. *Revista Mexicana de Física*, 71(1). <https://doi.org/10.31349/revmexfis.71.010602>
- Ghilardi, A., & Bailis, R. (2024). *Updated fNRB values for woodfuel interventions*. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://www.mofuss.unam.mx/mofuss/files/Report_on_Updated_fNRB_Values_20_June_2024.pdf
- Gómez-Heleria, 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>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate change 2007: Synthesis report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Kang, M. S., Jeong, H. J., Farid, M. M., & Hwang, J. (2017). Effect of staged combustion on low NO_x 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.
- Lammel, G., & Graßl, H. (1995). Greenhouse effect of NO_x. *Environmental Science and Pollution Research*, 2, 40–45. <https://doi.org/10.1007/BF02987512>
- 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. (2017a). *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* [Tesis de doctorado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. 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., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D., & Masera, O. (2017c). Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering*, 2, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. R. (2017b). Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles. *Energy for Sustainable Development*, 41, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>
- Medina, P., Mora, A., & Beltrán, A. (2024). Combustion efficiency and CO/NO_x 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. (2026). Improvement of the combustion model for a biomass stove: Analysis of overall efficiency and thermal performance. *Manuscript under review*.
- Miltner, M., Makaruk, A., Harasek, M., & Friedl, A. (2006). CFD-modelling for the combustion of solid baled biomass. *Parameters*, 1(2), 1–6. https://www.researchgate.net/profile/Michael-Harasek/publication/239922641_CFD_modelling_for_the_combustion_of_solid_baled_biomass/links/004635307977c288de000000/CFD-modelling-for-the-combustion-of-solid-baled-biomass.pdf
- 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>
- Padilla-Barrera, Z., Torres-Jardón, R., Ruiz-Suarez, L. G., Castro, T., Peralta, O., Saavedra, M. I., & Zavala, M. (2019). Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 50, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.004>
- Shi, S. P., Zitney, S. E., Shahnam, M., Syamlal, M., & Rogers, W. A. (2006). Modelling coal gasification with CFD and discrete phase method. *Journal of the Energy Institute*, 79(4), 217–221. <https://doi.org/10.1179/174602206X148865>
- 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>
- Straffon Díaz, A. E. (2009). *Estudio comparativo de eficiencia energética para estufas mejoradas de leña y sus implicaciones ambientales* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/266189>
- 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>
- Wolff, G. T. (1985). Characteristics and consequences of soot in the atmosphere. *Environment International*, 11(2–4), 259–269. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(85\)90018-2](https://doi.org/10.1016/0160-4120(85)90018-2)