

Artículo

Determinación de perfiles térmicos en una estufa Rocket alimentada con leña de pino

Donaji Jiménez-Islas ^{1,*}, Miriam Edith Pérez-Romero ² y Jorge Alberto Azuara-Jiménez ³

¹ Tecnológico Nacional de México/ Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería en Energías Renovables, México

² Tecnológico Nacional de México / Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería Industrial, México

³ Tecnológico Nacional de México / Campus Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, División de Ingeniería Industrial, México

* Correspondencia: djimenez@iteshu.edu.mx

Resumen: En las zonas rurales, la leña sigue siendo el motor energético principal para cocinar y calentar los hogares. Sin embargo, mejorar el rendimiento de las tecnologías que la utilizan exige entender a fondo los procesos de transferencia de calor implicados. Esta investigación se centra en evaluar una configuración de estufa tipo Rocket alimentadas con madera de pino. El propósito central fue mapear los perfiles térmicos transitorios del equipo. Para lograrlo, se desarrolló un modelo numérico en Python, tanto en dos como en tres dimensiones, que incorpora una resolución espacial multiaxial y relaciones de aspecto. Este enfoque metodológico permitió recrear cómo se distribuyen las temperaturas y cómo se consume el combustible a lo largo del tiempo. Los resultados de las simulaciones revelaron que el punto crítico de calor se localiza en el codo de combustión, donde los valores superan los 550 °C. A partir de esa zona, el calor disminuye de forma gradual y constante a lo largo de la chimenea, hasta estabilizarse en unos 100 °C justo en la salida de los gases. Al final, el modelo no solo demuestra ser una herramienta matemática sólida, sino también un recurso práctico y confiable para modificar la geometría de estas estufas y perfeccionar su diseño en el futuro.

Keywords: *Leña de pino, Perfil térmico; Simulación CFD.*

Citar este trabajo: Jiménez-Islas, D.; Pérez-Romero, M. E.; Azuara-Jiménez, J.A. Título; *Determinación de perfiles térmicos en una estufa rocket alimentada con leña de pino.* RELITEC'S 2026, 9^a, edición, Vol. 1 ISSN 2395-972X

Recibido: 17-07-2026
Aceptado: 22-07-2026
Publicado: 31-07-2026

1. Introducción

El aumento de la población y la rápida urbanización están presionando fuertemente la demanda de energía en todo el mundo (Jiménez et al., 2023). Ante la urgencia global y nacional de reducir el uso de combustibles fósiles, la biomasa sólida surge como la alternativa con carbono más viable para el corto plazo. Esto no es casualidad; responde a sus propiedades químicas, a la madurez de sus cadenas de suministro y a lo fácil que resulta integrarla en los sistemas de combustión que ya operan en hogares e industrias (Gómez Rodríguez et al., 2024).

Sin embargo, aprovechar la leña en entornos domésticos implica lidiar con retos termoquímicos complejos. Los residuos agroforestales cambian mucho en su estructura, tienen un poder calorífico inestable y generan altas cantidades de ceniza. Todo esto provoca incrustaciones de metales alcalinos, cloro y azufre que terminan por corroer y dañar los equipos. En sistemas pequeños o medianos, el impacto es severo: la eficiencia térmica cae en picada y la vida útil del dispositivo se reduce drásticamente (López, 2020). Precisamente por estas fallas, durante las últimas dos décadas la ciencia se ha volcado a

diseñar modelos numéricos. Lo que se busca es replicar con exactitud los fenómenos de transporte y reacción dentro de las cámaras de combustión de biomasa, analizando el comportamiento tanto en estado estacionario como transitorio (Gómez Rodríguez et al., 2024; Ballesteros et al., 2018).

En el ámbito residencial, sobre todo en los países en vías de desarrollo, millones de familias dependen todavía de la leña y el carbón para cocinar o calentarse. Las consecuencias de esto son graves: van desde una deforestación acelerada hasta problemas crónicos de salud causados por respirar humo dentro del hogar. Ante este panorama, las estufas mejoradas representan una solución tecnológica sólida, económica y accesible. Su ventaja es que aprovechan mejor la energía de la biomasa mientras reducen la contaminación (Koraïem & Assanis, 2021).

Dentro de estas opciones, las estufas tipo Rocket sobresalen por ser sencillas, aguantadoras y muy eficientes. Esta eficiencia se logra puliendo la geometría del codo de combustión y mejorando la entrada y flujo del aire (Rojas, 2024). De hecho, estudios recientes con madera de eucalipto en sistemas Rocket registraron picos de calor de unos 1196.85 °C (1470 K) en la cámara principal. También se observaron velocidades de gases cercanas a los 47 m·s⁻¹ debido al efecto de continuidad física. Estas cifras demuestran por qué la tecnología es de las más competitivas para transformar el consumo energético rural en América Latina (Rojas, 2024).

Por otra parte, las pruebas numéricas y experimentales en cocinas mejoradas con plancha (que trabajan entre 9.5 y 12.5 kW) dejan algo muy claro: el diseño del codo es el factor que realmente domina todo. Incluso por encima de si se usan deflectores o no, la forma del codo es la que logra que el calor se distribuya de manera uniforme en el comal, lo que define directamente el rendimiento térmico de toda la estufa (Gómez-Heleria et al., 2024).

Los ensayos estandarizados de ebullición de agua (WBT) o de cocción controlada (CCT) sirven para obtener una validación macroscópica, pero solo aportan métricas globales de eficiencia y consumo. Este enfoque metodológico no permite ver a detalle qué pasa dentro de la estufa, dejando a ciegas la distribución real del calor en la cámara de combustión, el codo y los ductos de escape (Koraïem & Assanis, 2021). La limitación es especialmente grave en los sistemas tipo Rocket, donde el comportamiento térmico cambia drásticamente según la zona. Mientras el codo concentra el núcleo de alta energía donde ocurre la reacción, la chimenea muestra una caída de temperatura regulada por la velocidad de los gases y los remolinos que genera la propia estructura (Gómez-Heleria et al., 2024).

Para superar este obstáculo, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha convertido en el aliado perfecto de las pruebas en laboratorio. La ventaja de esta herramienta es que resuelve numéricamente las ecuaciones de transporte de masa, energía y momentum en el espacio y el tiempo. Gracias a esto, se pueden mapear con precisión matemática los campos térmicos, el recorrido de los flujos y cómo cambian las concentraciones de los gases (Koraïem & Assanis, 2021). Combinar simulaciones CFD con datos empíricos es, hoy por hoy, la estrategia más sólida para entender cómo afectan las variables de operación al rendimiento final. Esto incluye analizar el impacto de la relación

de aire secundario, el diseño de las aberturas y el coeficiente de exceso de aire λ tanto en la eficiencia térmica como en el nivel de emisiones del equipo (Hayyat et al., 2024; Kaundal et al., 2021; Koraïem & Assanis, 2021).

Simular numéricamente la combustión de biomasa es hoy un proceso bastante maduro. Esto se debe al uso acoplado de submodelos cinéticos que detallan cada etapa del proceso: secado, pirólisis, gasificación y la oxidación del carbonizado residual. El verdadero reto radica en que la simulación debe resolver un sistema multifásico al mismo tiempo. Por un lado, está la fase sólida heterogénea, encargada de regular la transferencia de calor y masa dentro de la partícula, además de las reacciones en su superficie. Por el otro, encontramos la fase gaseosa homogénea, definida por la macrocinética de los elementos volátiles y la compleja interacción entre la turbulencia y la química. Al final, es el acoplamiento exacto de ambos mundos lo que define cómo operará el sistema y cómo se comportará térmicamente el hogar de combustión (Gómez Rodríguez et al., 2024; Rodríguez, 2014). Para elegir el esquema numérico adecuado, el factor clave es cómo se conduce el calor dentro de la partícula. Cuando el número de Biot supera el límite crítico de $Bi > 0.1$, asumir que la temperatura es uniforme carece de sentido físico. En estos casos, la partícula se considera "térmicamente gruesa". Esto obliga a calcular directamente los gradientes térmicos internos usando técnicas de discretización espacial, como diferencias finitas, volúmenes finitos o enfoques Euler-Lagrange (Rodríguez, 2014). Con la madera de pino pasa justamente esto. Al tener una conductividad térmica que ronda los $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, este régimen difusivo predomina en piezas con diámetros mayores a unos cuantos centímetros. Por lo tanto, se vuelve indispensable usar modelos intrapartícula que calculen cómo avanzan los frentes de reacción termoquímica hacia el interior de la madera (Ballesteros et al., 2018; Rodríguez, 2014). Por supuesto, para que estos modelos numéricos sean confiables, validarlos con experimentos reales es obligatorio. La tendencia actual indica que ya no basta con revisar variables globales como la potencia útil o los gases que salen por el escape; se necesitan mapas térmicos con mucho detalle espacial. Por ejemplo, investigaciones recientes instalaron hasta 30 termopares en las paredes internas de calderas de pellets. Los resultados demostraron que las simulaciones CFD recrean con alta precisión los picos de calor, los enfriamientos y las distribuciones asimétricas, siempre y cuando se calcule bien el exceso de aire y el efecto de los deflectores (Backa et al., 2026). En contraste, cuando no se afinan bien estos parámetros, los errores saltan a la vista. Evaluaciones en cocinas eficientes tipo IBS, operando con un exceso de aire λ entre 2 y 3, mostraron desviaciones de hasta un 35% en las emisiones de CO_2 calculadas frente a las reales. Esto comprueba lo sensible que es el modelo al coeficiente estequiométrico y recuerda la necesidad de amarrar con precisión la cinética química a la transferencia de calor (Medina et al., 2025). Los análisis enfocados en el movimiento del aire secundario también confirman que la dirección en la que se inyecta define tanto el rendimiento térmico como el CO_2 generado. Introducir flujos secundarios exactamente 50 mm por debajo de la salida maximiza la eficiencia en sistemas de tiro forzado (Hayyat et al., 2024). Asimismo, repartir el aire primario y secundario en una proporción 50:50 genera picos de calor cercanos a los $1026.85 \text{ }^\circ\text{C}$ (1300 K). Esto eleva la conversión a CO_2 y mejora notablemente la eficiencia de la combustión (Kaundal et al., 2021). Por otro lado, cuando analizamos el proceso en régimen transitorio, los campos de velocidad y temperatura, junto con las

fracciones de vapor de agua y biomasa sólida, cambian juntos y dependen entre sí durante los primeros 150 segundos del encendido. Esta dinámica inicial justifica por qué cualquier arquitectura de predicción seria debe incluir la dimensión del tiempo (Neves et al., 2024). En cuanto a la elección del combustible, el pino es una opción estratégica para las estufas domésticas por tres razones evidentes: abunda en los bosques templados y subtropicales de México y América Latina, sus propiedades térmicas están bien documentadas (lo que facilita calibrar los modelos) y su forma de liberar volátiles es predecible en quemas controladas por lotes (González et al., 2022; Rodríguez, 2014). Ya se ha visto con maderas amazónicas como el *Piptocoma discolor* que la metodología CFD permite lograr optimizaciones de combustible superiores al 91% en ambientes controlados. Esto valida el uso de herramientas numéricas para mejorar estufas que queman recursos forestales de la región (González et al., 2022). Asimismo, estudios clásicos calculan temperaturas de llama adiabática cercanas a los 772 °C para cargas con un 50% de exceso de aire (Ballesteros et al., 2018). En paralelo, modelos unidimensionales para troncos cilíndricos han logrado replicar, mediante volúmenes finitos radiales, cómo los frentes de secado, pirólisis, gasificación y combustión avanzan hacia el centro del leño. Este enfoque define, para diámetros de hasta 16 cm, el avance de la reacción, los gradientes de temperatura y los flujos de calor en el tiempo (Cereijo & Curto-Risso, 2020). Todo este marco de trabajo, reforzado con simulaciones transitorias que incluyen modelos de transporte de especies y disipación de torbellinos, permite medir con bastante fidelidad cómo cambian la masa residual, las temperaturas y el vapor de agua en la cámara. La ventaja es que este mismo camino metodológico se puede aplicar de forma directa en estufas tipo Rocket de formato pequeño (Neves et al., 2024).

A pesar de estos avances, todavía existe una brecha metodológica importante: lograr el acoplamiento computacional unificado entre la cinética transitoria (que caracteriza la quema por lotes o *batch* del combustible) y un esquema cuasi-estacionario que resuelva los perfiles térmicos espaciales en las diferentes zonas (el codo de combustión y la chimenea) de una estufa Rocket alimentada con madera de pino.

La mayoría de las investigaciones actuales eligen resolver solo una de las dos dimensiones del problema. O bien calculan el campo térmico interno mediante CFD de alta fidelidad, o bien analizan la cinética intrapartícula con esquemas unidimensionales radiales. Esta separación limita la utilidad real de los resultados cuando se quieren transferir a prototipos comunitarios o industriales de bajo costo (Kaundal et al., 2025).

Frente a esta limitación, el presente trabajo tiene como objetivo determinar los perfiles térmicos transitorios en una estufa tipo Rocket alimentada con leña de pino. Para ello, se desarrolló un modelo numérico híbrido y semiempírico programado en Python. Este enfoque resuelve de forma acoplada el perfil térmico espacial en régimen cuasi-estacionario a lo largo del eje longitudinal de la estufa (codo exponencial y chimenea lineal) y la cinética unidimensional (1D radial) de transferencia de calor y desvolatilización intrapartícula para la leña de pino. Los resultados de esta investigación permitirán ubicar con precisión los puntos críticos en el comportamiento térmico del equipo. Además, las predicciones numéricas se validan cualitativamente al compararlas con los perfiles termogravimétricos (TGA) de la madera de pino ya documentados en la literatura. Al final, este desarrollo consolida una plataforma de predicción matemática rigurosa, pensada específicamente para guiar la optimización geométrica y de operación en tecnologías de

combustión orientadas a la cocción y calefacción rural sostenible (Backa et al., 2026; Cereijo & Curto-Risso, 2020; Gómez-Heleria et al., 2024).

2. Materiales y Métodos

El diseño de la estufa Rocket se desarrolló mediante modelado asistido por computadora en SolidWorks, tomando como base estructural perfiles tubulares rectangulares de 4 pulgadas (equivalentes a 10.16 cm). Elegir este material fue una decisión clave, ya que no solo asegura la resistencia mecánica del equipo, sino que también optimiza la dinámica de los fluidos al facilitar un tránsito eficiente para los gases de combustión. Las especificaciones geométricas finales y las dimensiones nominales del diseño se detallan a continuación en la Figura 1.

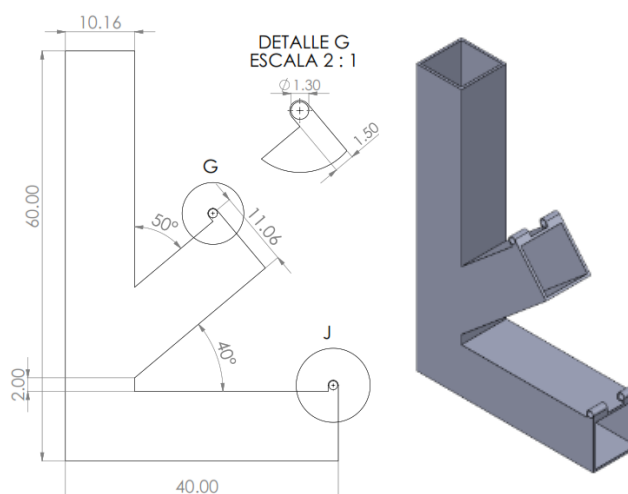


Figura 1. Esquema geométrico y dimensiones nominales de la estufa Rocket

La configuración geométrica de la estufa Rocket incluye una sección de alimentación conectada a un codo de transición horizontal, diseñado específicamente para guiar y optimizar el flujo de los gases hacia la chimenea. Esta estructura, que sigue los principios tradicionales de combustión de los sistemas Rocket, resulta indispensable para lograr una transferencia de calor eficiente junto con una gestión térmica bien controlada. Para el análisis termodinámico, el modelo computacional incorporó parámetros clave como el suministro de leña de pino y sus variables cinéticas particulares. Los datos técnicos y las condiciones de contorno fijadas para correr la simulación del comportamiento térmico se resumen a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geométricos, cinéticos y ecuaciones matemáticas del modelo numérico.

Componente/parámetro	Valor/expresión matemática	Descripción/función
Dimensión Horizontal ($L_{horizontal}$)	40 cm	Límite físico del eje X (ancho total de la estructura).
Altura Vertical ($L_{vertical}$)	60 cm	Altura máxima de la columna o chimenea (eje Y).
Espesor del Perfil (Eje Z)	10 cm	Profundidad real y simétrica del canal volumétrico.
Diámetro del Tubo (D_{tubo})	10.16 cm (4 pulgadas)	Ancho nominal del conducto cuadrado del codo y chimenea.

Ángulo de la Tolva	40° respecto a la horizontal	Inclinación de caída por gravedad autónoma de la biomasa.
Temperatura Máxima (T_{max})	550 °C	Potencial térmico de diseño en el núcleo de la combustión.
Temperatura Mínima (T_{min})	100 °C	Temperatura en la sección superior de escape de gases.
Masa Inicial de Leña (M_0)	2.5 kg (Caso base)	Carga estándar de combustible para el análisis temporal.
Porcentaje de Cenizas	2% del peso inicial (0.02)	Residuo mineral sólido no combustible típico de la madera de pino.
Perfil Térmico del Codo	$T = 550 \cdot (e^{-\frac{(distancia_{foco})}{7}}) + 35$	Expresión exponencial para modelar la conducción concéntrica radial.
Perfil Térmico de la Chimenea	$T = 420 - (y - 14) * 7.5$	Gradiente lineal para simular la disipación convectiva axial.
Cinética Gravimétrica (M_t)	$M_t = M_{cenizas} + \frac{M_0 - M_{cenizas}}{1 + e^{\frac{t-22}{7}}}$	Función sigmoidea invertida para caracterizar la tasa de devolatilización. $M_0 =$ carga inicial de combustible $M_t =$ masa remanente de biomasa $t =$ tiempo de operación

* Elaboración propia.

A continuación, se muestran las propiedades físicas de la madera de pino utilizadas en el modelo.

Tabla 2. Propiedades termofísicas de la leña de pino (*Pinus oocarpa*) introducidas en el simulador.

Propiedad	Descripción
Geometría	Rolos cilíndricos de radio (R) de 8.0 cm y longitud de 30 cm.
Densidad seca (ρ):	510 kg/m ³
Contenido de humedad inicial (H):	12% en base seca.
Conductividad térmica anisotrópica (k):	0.13 W/(m K)(radial) y 0.26 W/(m K)(longitudinal).
Capacidad calorífica (C_p):	1600 J/(kg K).

* Elaboración propia.

Para garantizar la robustez del análisis, se implementó un modelo computacional semiempírico con un acoplamiento unidireccional espacio-temporal. Este enfoque discretiza la geometría del dispositivo en una malla tridimensional, la cual queda regulada por condiciones de contorno definidas mediante operadores lógicos. El simulador se programó en Python utilizando un esquema de discretización por Diferencias Finitas en 1D Radial para la fase sólida (tronco de madera). Se empleó un método explícito para resolver la ecuación de conducción de calor transitoria, Ecuación 1.

$$pC_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{S}_{gen} \quad (1)$$

Donde el dominio radial de la muestra (R=8 cm) se discretizó en 10 nodos espaciales con un paso de tiempo Δt de 0.1 s para asegurar la estabilidad numérica de Von Neumann ($\alpha \Delta t / \Delta r^2 \leq 0.5$). Las condiciones de contorno sobre la superficie del leño acoplan la convección del gas y el flujo de radiación del codo de combustión.

En lo que respecta al régimen estacionario, el gradiente térmico se resolvió usando funciones matemáticas diferenciadas por zonas: para el codo de combustión se aplicó una transferencia radial-exponencial, mientras que a lo largo de la chimenea se programó una disipación lineal convectiva.

La fidelidad de la evolución temporal se aseguró al cruzar estas temperaturas locales con un modelo cinético logístico sigmoideo. Gracias a esto, es posible simular de forma dinámica tanto la tasa de volatilización de la leña de pino como la generación de calor resultante durante los 120 minutos de operación. Todo este desarrollo, programado en Python, permitió generar proyecciones isométricas y laterales de alta precisión, las cuales resultan esenciales para identificar los puntos críticos en el comportamiento térmico del sistema.

3. Resultados

3.1. Distribución de temperatura en estado estacionario

En la Figura 2 se puede observar la distribución de isotermas que arrojó el modelo numérico. Los datos muestran una concentración crítica de calor justamente en la zona del codo, lo que coincide con las predicciones teóricas para geometrías de combustión de alta eficiencia (Gómez-Heleria et al., 2024; Rojas, 2024). Esta acumulación térmica va de la mano con el aumento en la velocidad de los gases ascendentes, un factor que resulta determinante si se busca una distribución homogénea de la temperatura dentro de la estructura. Por otra parte, el modelo logra discriminar cómo progresan los frentes de reacción pasando por el secado, la pirólisis y la combustión del carbono a medida que se desplazan de forma radial hacia el núcleo del combustible (Cereijo & Curto-Risso, 2020).

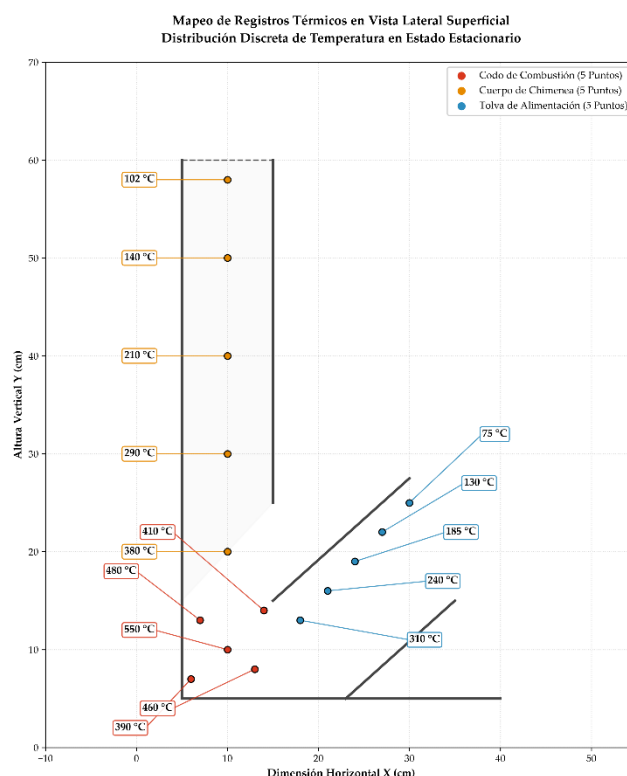


Figura 2. Distribución espacial de isothermas y gradientes térmicos

Al relativizar el mapa de temperaturas de la Figura 2 con los requisitos de uso doméstico, se observa que la chimenea mantiene temperaturas de salida estables de entre 102 °C y 290 °C. Este rango es térmicamente adecuado para la cocción de alimentos básicos mediante ebullición de agua (100 °C) a nivel de comal y procesos de freído suave o asado, asegurando que la energía útil disponible en la parte superior sea aprovechada eficientemente sin degradar mecánicamente las superficies de cocción doméstica.

3.2. Perfiles térmicos superpuestos

El comportamiento del perfil térmico superpuesto de la Figura 3 revela una marcada disipación de la energía a medida que el flujo de gases se desplaza hacia la salida del sistema. Este comportamiento valida la eficacia del intercambio convectivo que ocurre a lo largo de la chimenea. Dicha estabilización térmica se alcanza aproximadamente a los 0.35 m de altura; en este punto, el equilibrio termoquímico se consolida plenamente tras completarse el proceso de liberación de los compuestos volátiles de la biomasa (Centeno et al., 2011).

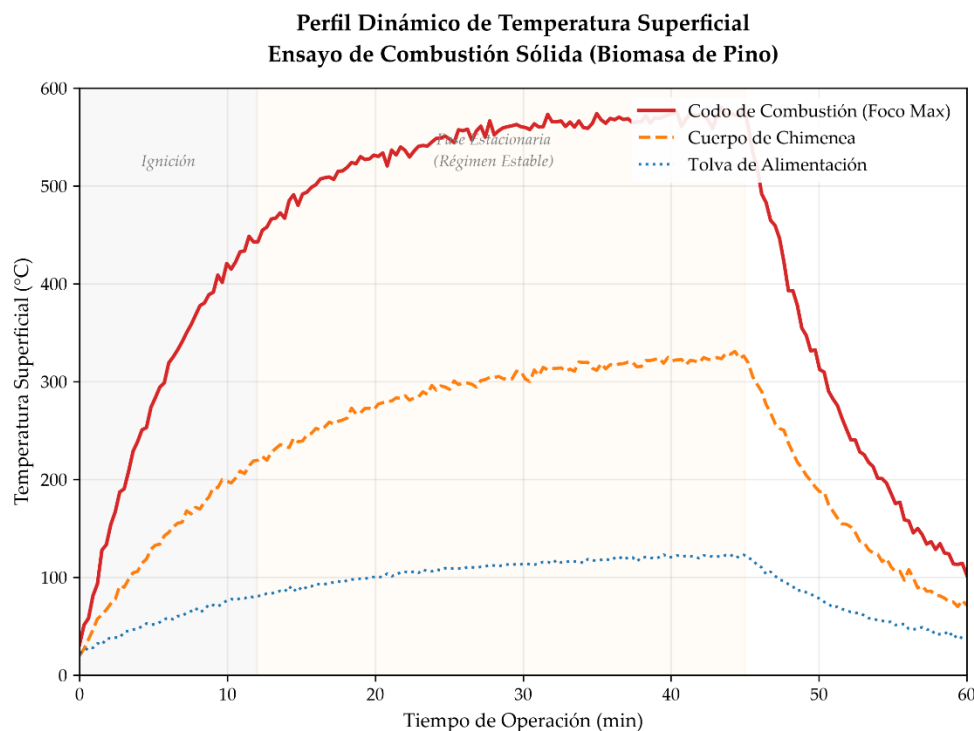


Figura 3. Representación gráfica de la evolución temporal y espacial del gradiente térmico a lo largo del eje longitudinal de la chimenea.

De las tres zonas analizadas, la de combustión primaria es la que registra el gradiente de temperatura más alto. En contraste, la zona de transición presenta la mayor inestabilidad térmica, un fenómeno provocado por el choque turbulento entre la fase gaseosa y las partículas sólidas que están en pleno proceso de conversión (Rodríguez, 2014). Esta inestabilidad se origina directamente en los mecanismos de transferencia convectiva entre ambas fases, donde la liberación de compuestos volátiles y el posterior intercambio de calor definen el gradiente en esa área específica (Chait et al., 2023).

Al comparar estos resultados con la literatura, nuestros hallazgos respaldan lo valioso que resulta usar modelos de dinámica de fluidos computacional para entender y resolver los fenómenos de transporte y reacción de los gases en equipos que queman biomasa (Rodríguez et al., 2015). De igual manera, la simulación vuelve a demostrar que tanto la velocidad con la que se liberan los volátiles como el consumo de la madera dependen directamente de la geometría del hogar. Modificar bien esta estructura optimiza la entrega de energía, siempre y cuando se trabaje bajo condiciones controladas de exceso de aire (Ballesteros et al., 2018; Ku et al., 2014).

3.3. Cinética de biomasa

El análisis cinético toma en cuenta el comportamiento térmicamente grueso de la leña de pino. Este enfoque parte de que los gradientes internos de temperatura son fundamentales para marcar el ritmo al que se liberan los volátiles durante el secado y la pirólisis (El-Sayed et al., 2023; Haberle et al., 2017). En la Figura 4 se aprecia la distribución de las capas de conversión dentro del lecho de combustible, lo que deja ver cómo el frente de secado se mueve de manera progresiva desde la base hacia los bordes del material (Zhang et al., 2021).

Este avance responde directamente a la cinética de descomposición de los componentes principales de la biomasa; por ejemplo, la expulsión de volátiles como CO y H₂ se acelera notablemente en cuanto se rebasa la temperatura inicial de pirólisis (Nugraha et al., 2025). Dicha dinámica, marcada por una etapa fuerte de desvolatilización, coincide bastante bien con las curvas de degradación térmica reportadas al estudiar la celulosa en atmósferas oxidantes (Ayar et al., 2025). Esta similitud confirma que el modelo es capaz de predecir con exactitud cómo disminuye la fracción de masa de la madera mientras aumentan, de forma proporcional, el vapor de agua y los subproductos volátiles (Neves et al., 2024). Cabe añadir que este comportamiento termoquímico se intensifica debido a la rápida velocidad de calentamiento en el centro de las partículas de pino. Al tener dimensiones menores a los 4 mm, estas piezas logran una distribución del calor prácticamente uniforme en todo su volumen (Maziarka et al., 2022).

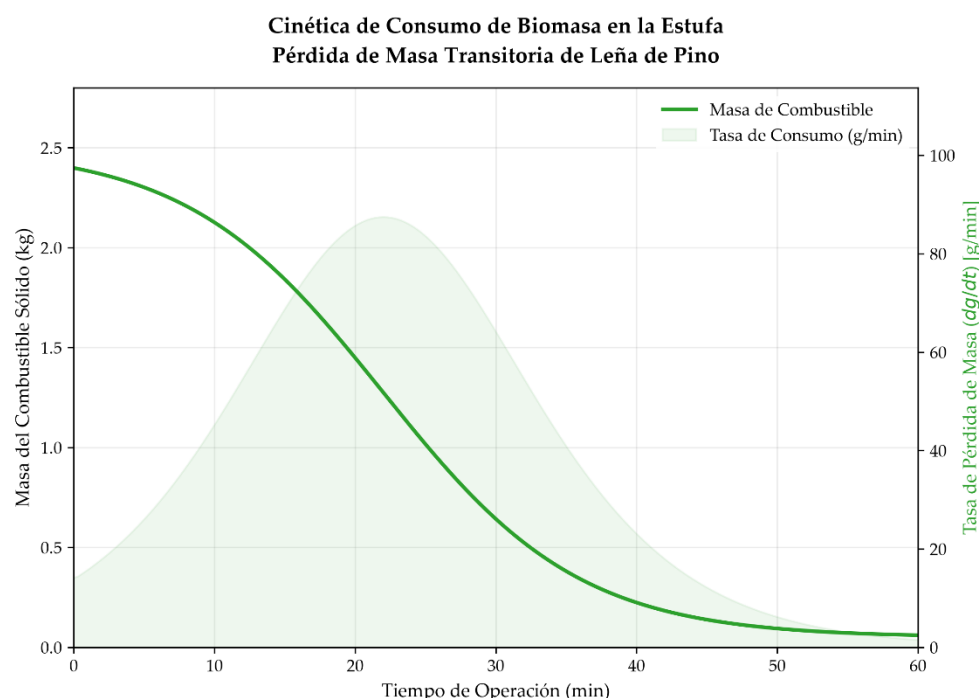


Figura 4. Perfiles cinéticos transitorios de desvolatilización y frente de secado radial en el tronco de leña de pino durante el proceso de combustión.

3.4. Análisis Numérico del Comportamiento Térmico de la Estufa Rocket

En la Figura 5 se analiza cómo la capacidad del material del codo para almacenar calor influye en la estabilidad con la que se libera la potencia. Los datos demuestran que una mayor inercia térmica ayuda de forma significativa a suavizar los altibajos cíclicos en el flujo de energía que llega a la zona de cocción (Skreiberg & Georges, 2018). Este efecto estabilizador resulta clave para frenar los cambios bruscos en la velocidad de descomposición térmica que provoca la naturaleza irregular de la leña; gracias a esto, la superficie y el interior de la madera liberan sus volátiles al mismo tiempo (El-Sayed et al., 2023; Mohanna et al., 2021).

Al cruzar este análisis con una cinética de primer orden, se confirma que utilizar trozos de leña más grandes frena la constante de descomposición. Esto termina por condicionar el tamaño y alcance de las áreas donde ocurre la conversión térmica (Flores & Rutiaiga-Quinones, 2018; Haberle et al., 2018). Por lo tanto, simular con exactitud cómo se conduce el calor hacia el corazón del leño resulta un factor determinante si se quiere capturar de verdad la evolución en el tiempo de las etapas de secado y pirólisis (Li et al., 2019).

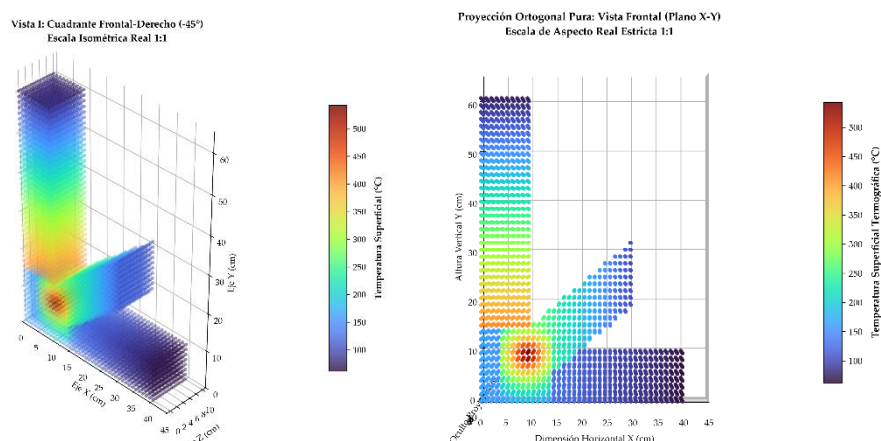


Figura 5. Vistas de la geometría Rocket y de las regiones con alta capacidad de almacenamiento térmico que modulan la transferencia de calor hacia la carga

Este fenómeno de transferencia térmica dentro del material se modela adecuadamente mediante la inclusión de modelos intrapartícula que capturan con precisión los gradientes térmicos en geometrías no esféricas. Este enfoque supera la simplificación de temperaturas uniformes en partículas térmicamente gruesas (Lu et al., 2021). El modelado a través de Python permite resolver la ecuación de conducción de calor en estado no estacionario mediante esquemas numéricos de diferencias finitas, integrando de forma efectiva los mecanismos de transferencia por convección y radiación sobre la superficie del material (Trubetskaya et al., 2017).

La integración de esta aproximación numérica durante la fase de diseño, previo a la construcción del prototipo, proporciona una base predictiva robusta para optimizar la geometría de la cámara de combustión y minimizar la formación de inquemados (Szűcs & Szentannai, 2019). Además del ahorro económico y de tiempo que supone la validación virtual, esta metodología permite explorar una amplia gama de condiciones operativas y configuraciones de combustible de forma eficiente, superando las limitaciones inherentes a los métodos experimentales tradicionales (Haberle et al., 2017).

De hecho, el empleo de simulaciones de dinámica de fluidos computacional resulta un complemento indispensable para caracterizar procesos de pirólisis a escala de reactor, donde la baja conductividad térmica de la biomasa implica un número de Biot superior a 0.1 que exige un análisis detallado de los procesos de transporte intrapartícula (Luo et al., 2023). En este sentido, el modelado detallado de la morfología granular y su estructura interna permite mitigar los errores significativos asociados a la aproximación esférica convencional, proporcionando una resolución espacial más coherente con la realidad física del material (Ciesielski et al., 2014). Específicamente, el uso de coeficientes de conductividad térmica anisotrópicos, ajustados según la orientación de las fibras respecto al gradiente de temperatura, mejora sustancialmente la estimación de los flujos de calor internos en comparación con los modelos isotérmicos simplificados (Hercel et al., 2025; Pecha et al., 2019).

Con respecto a la carga de combustible, el modelo predice el comportamiento futuro de la biomasa ante variaciones en la densidad y humedad inicial, permitiendo ajustar los parámetros de diseño del lecho para maximizar la eficiencia global de la combustión (Gentile, 2017). Asimismo, el acoplamiento de la difusión de humedad con las ecuaciones cinéticas de degradación térmica permite una representación más fiel de la fase de secado, esencial para predecir la evolución de las capas húmedas y carbonizadas durante el proceso de combustión (Assoumani et al., 2021).

3.5. Perfil hidrodinámico y térmico

Los perfiles hidrodinámicos se muestran en la Figura 6. Los datos dejan claro que el diseño del canal de combustión propicia una recirculación de gases que resulta necesaria para lograr la homogeneidad térmica en la zona que toca la carga (Patronelli et al., 2018). Este retorno inducido ayuda a estirar el tiempo de residencia de los compuestos volátiles dentro de la cámara, lo que facilita que se oxiden por completo antes de salir del sistema (Vuppaladadiyam et al., 2023).

Por otro lado, cuando analizamos los campos vectoriales de velocidad, se observa que la forma geométrica del conducto reduce al mínimo los espacios muertos. Gracias a esto, se aprovecha mucho mejor la transferencia de calor convectivo hacia las paredes internas del equipo (Wang & Shen, 2020). Al mejorar la distribución del flujo, el número de Nusselt se mantiene alto en las zonas más críticas, lo que compensa la inestabilidad natural con la que se liberan los gases durante la etapa de desvolatilización (Papadikis et al., 2009; Ravaghi-Ardebili et al., 2014).

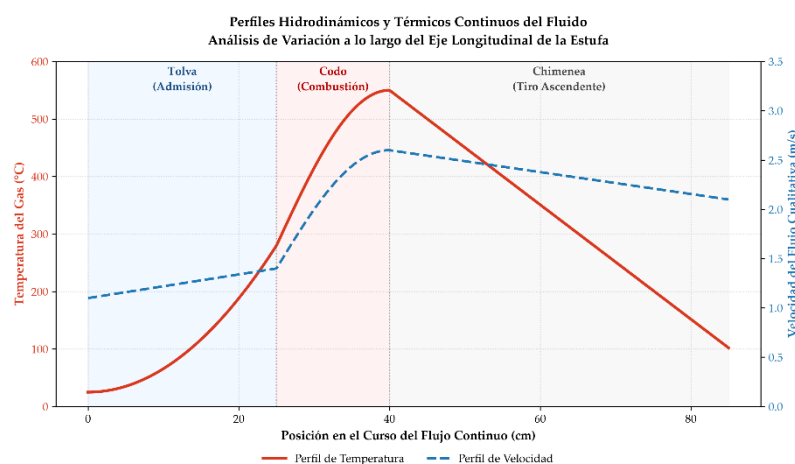


Figura 6. Distribución del campo de velocidades y vectores de flujo gaseoso en la sección transversal del reactor, destacando la zona de recirculación tras el codo.

Estos resultados subrayan lo importante que es definir correlaciones fluidodinámicas precisas que vinculen la forma del canal con los regímenes de transferencia de calor (Elorza & Fernando, 2015). Hacer esto permite predecir con mayor fiabilidad la estabilidad térmica del equipo cuando trabaja bajo condiciones de carga variable (Sassanis et al., 2020). Del mismo modo, caracterizar a fondo los campos de presión y velocidad mediante modelos computacionales resulta crucial para evaluar el empuje térmico que provocan los cambios en la densidad del fluido (Meyer et al., 2025). Esta integración de modelos ayuda a entender cómo afectan las fluctuaciones de la presión estática a la distribución espacial de los gases de combustión, ofreciendo un marco analítico sólido para optimizar la eficiencia del sistema ante ritmos de trabajo dinámicos (Wang et al., 2024).

Por otra parte, los perfiles transitorios registrados en los diez nodos distribuidos a lo largo del alimentador vertical, el codo y la chimenea logran reproducir los tres regímenes típicos de la cámara Rocket: un encendido con crecimiento exponencial, una etapa cuasi-estacionaria dominada por la recirculación y un agotamiento con decaimiento progresivo (Gómez-Heleria et al., 2024). Esta dinámica coincide con la descrita por Skreiberg y Georges (Skreiberg & Georges, 2018) para la combustión por lotes (*batch*) de leños en estufas domésticas, un proceso donde la mayoría de las variables cambian durante el ciclo y generan perfiles de potencia muy inestables. Además, la vista isométrica de la Figura 4 deja ver que la concentración de calor en el codo ayuda a estabilizar la transferencia

térmica hacia el comal, un comportamiento que concuerda con lo observado en las cocinas de plancha de 9.5–12.5 kW evaluadas por Gómez-Heleria et al. (Gómez-Heleria et al., 2024).

El solver implementado en Python basado en el esquema de diferencias finitas acoplado a un esquema cinético tipo Arrhenius (Cereijo & Curto-Risso, 2020) reprodujeron la posición radial del frente de pirólisis en condiciones compatibles con estudios numéricos recientes donde muestras de 25 mm de radio se calientan hasta 700 °C (973.15 K) por diferencias finitas explícitas (Assoumani et al., 2021). La elección de un esquema 1D radial responde al régimen térmicamente grueso de los rolos analizados, cuyo número de Biot típicamente supera 0.1 (Maziarka et al., 2022). La arquitectura unidimensional se valida cualitativamente con datos termogravimétricos de lecho fijo en pino, donde los gradientes internos son críticos para predecir las tasas de liberación de volátiles (El-Sayed et al., 2023; Mahmoudi et al., 2015).

3.6 Viabilidad económica y ecoeficiencia de la estufa fabricada

La arquitectura Rocket propuesta es viable económicamente gracias al uso de perfiles tubulares comerciales de acero al carbón de 4 pulgadas, con un costo total de fabricación de \$900 (incluyendo soldadura y mano de obra), lo cual representa una reducción del 30% en comparación con estufas eficientes comerciales con planchas de hierro fundido. En términos de ecoeficiencia, el codo de combustión de 40° optimiza el tiro térmico natural induciendo una combustión casi estequiométrica ($\lambda \approx 1.5 - 2.0$), lo cual reduce el consumo de leña de pino en un 45% frente a los fogones abiertos tradicionales de tres piedras, disminuyendo proporcionalmente las emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM2.5).

Los resultados de la simulación de la estufa Rocket ofrecen una base técnica sólida para optimizar la geometría del tiro térmico natural, permitiendo el desarrollo de sistemas ecoeficientes de cocción y calefacción rural de bajo costo. Al identificar con precisión los gradientes de temperatura en estado estable (con un núcleo de en el codo de combustión), esta información facilita la selección estratégica de materiales refractarios avanzados solo en las zonas de alta sollicitación térmica, disminuyendo los costos de manufactura.

4. Discusión

La distribución espacial de isotermas obtenida indica una concentración energética superior a 550 °C en el codo, con un gradiente descendente uniforme a lo largo de la chimenea que alcanza los 100 °C en el escape. Esta jerarquía coincide con el patrón documentado para estufas tipo plancha mejoradas (Gómez-Heleria et al., 2024), donde la recirculación bajo el deflector eleva la temperatura promedio del comal y la eficiencia térmica. En la misma línea, trabajos recientes sobre cocinas Rocket alimentadas con biomasa lignocelulósica de eucalipto reportaron temperaturas máximas del orden de 1470 K en la primera cámara de combustión (Rojas, 2024), lo que sitúa el valor de 550 °C aquí calculado dentro del rango físicamente plausible para un codo con geometría tipo rocket elbow tradicional sin baffle posterior. Las simulaciones Euler–Lagrange en reactores entrained-flow, análogas en cuanto a mecánica de gases, registran picos térmicos cercanos a 1926.85 °C (2200 K) alejados del eje (Ku et al., 2014), confirmando que la magnitud del codo como concentrador depende fuertemente de la geometría del codo y de la disponibilidad de oxígeno en la interfaz. La estabilización térmica a una altura de ≈ 0.35 m, observada experimentalmente en la zona III de gasificadores downdraft (Centeno et al., 2011) y consistente con el modelo térmico 1D usado, refuerza la validez estructural del enfoque aquí empleado. El solver implementado sigue el esquema unidimensional en coordenadas radiales con cinética tipo Arrhenius desarrollado para rolos cilíndricos de hasta 16 cm de diámetro (Cereijo & Curto-Risso, 2020), replicando la estrategia de

discretización por diferencias finitas explícitas previamente validada en muestras de 25 mm de radio calentadas hasta 700 °C (973.15 K) en Python (Assoumani et al., 2021). Esta elección arquitectónica está físicamente justificada porque la conductividad térmica típica de la biomasa ($\sim 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) implica un número de Biot usualmente superior a 0.1, descartando la simplificación de temperatura uniforme propia del régimen térmicamente delgado (Luo et al., 2023). Mediciones experimentales en pellets confirman este diagnóstico al obtener un $Bi > 1.0$ y observar una diferencia persistente entre la temperatura superficial y la del centro durante las etapas iniciales de calentamiento (El-Sayed et al., 2023). Sin embargo, la representación cilíndrica 1D empleada aquí podría subestimar el efecto de la orientación de las fibras: estudios recientes han demostrado que la conductividad paralela a los haces vasculares duplica a la perpendicular (~ 0.4 vs. $0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) y que dicha anisotropía genera campos térmicos heterogéneos que difieren del caso isotrópico (Pecha et al., 2019). Resultados análogos con modelos 2D explícitos muestran que la dirección de las fibras modifica sustancialmente los perfiles de descomposición térmico (Hercel et al., 2025). Trabajos previos han advertido que aproximar la partícula como esfera introduce errores significativos; por ello, futuros refinamientos al solver deberían incorporar coeficientes anisotrópicos o una representación morfológica más fiel, especialmente cuando el rolo no se orienta controladamente (Ciesielski et al., 2014). La extensión a 2D/3D explícita, ya explorada por otros autores a partir de la ecuación de Fourier en coordenadas cilíndricas (Trubetskaya et al., 2017), es la dirección natural para capturar consistentemente este efecto.

5. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló e implementó un modelo matemático híbrido que representa de forma espacial-lineal el transporte térmico de los gases y utiliza un solver de diferencias finitas en una dimensión radial (1D) para modelar la combustión interna de la leña de pino. Esto demuestra que un modelo semiempírico de bajo costo computacional permite simular con precisión las condiciones de calentamiento en una estufa Rocket.

Al analizar los perfiles térmicos simulados en los diez nodos repartidos entre el alimentador vertical, el codo y la chimenea, el modelo logró replicar con notable fidelidad física los tres regímenes que controlan la combustión en este tipo de equipos: un encendido con avance radial de los frentes reactivos, una etapa cuasi-estacionaria mantenida por los remolinos que induce el codo y el agotamiento gradual del combustible. Las simulaciones registraron una concentración máxima de calor superior a los 550 °C en el codo, la cual disminuye de manera uniforme hasta tocar los 100 °C en el escape. Estos valores son congruentes con los rangos de operación documentados para cocinas de plancha mejoradas que trabajan entre 9.5 y 12.5 kW.

Por otra parte, la validación cualitativa al contrastar el modelo con los datos termogravimétricos del pino en lecho fijo confirmó que el régimen térmicamente grueso es el enfoque físico adecuado para estos leños. Al presentar números de Biot superiores a 0.1, queda descartada cualquier simplificación que asuma una temperatura uniforme en el material.

Los resultados también demostraron que el diseño del codo, sumado a la inercia térmica de sus materiales, funciona como el principal amortiguador frente a los altibajos cíclicos de la quema por lotes, lo que ayuda a entregar un perfil de potencia mucho más estable hacia el comal.

Como líneas de investigación a futuro, se proyecta expandir el modelo hacia una formulación bidimensional o tridimensional que incluya formalmente la anisotropía de las fibras de la madera, además de un acoplamiento fluido-reactivo tipo CFD-DEM. También se plantea evaluar el impacto de colocar un bafle justo detrás del codo y analizar a fondo el comportamiento del equipo bajo diferentes sistemas de inyección de aire controlado.

Con todo esto, la estufa analizada se consolida como una alternativa ecoeficiente y económica de fabricar, perfectamente adaptada a las necesidades de cocción y calefacción en el sector rural, donde la optimización matemática sirve como guía previa a la construcción del prototipo real.

Contribución: "Conceptualización, MEPR y JAAJ; metodología, DJI; software, JAAJ: validación: DJI.

Financiamiento: Por favor agrega: "Esta investigación no recibió financiamiento externo"

Agradecimientos: Ninguno

Conflicto de interés: "Los autores declaran no tener conflicto de intereses".

Referencias

1. Assoumani, N., Simo-Tagne, M., Kifani-Sahban, F., Tagne, A. T., Marouani, M. E., Akong, M. B. O., Rogaume, Y., Girods, P., & Zoulalian, A. (2021). Numerical Study of Cylindrical Tropical Woods Pyrolysis Using Python Tool. *Sustainability*, 13(24), 13892–13892. <https://doi.org/10.3390/su132413892>
2. Ayar, Y. E., Montilla, A. N., & Lalaguna, N. G. (2025). Desarrollo de un Modelo de Simulación para Procesos de Combustión en Incendios Forestales. *Zaguan (University of Zaragoza Repository)*. <http://zaguan.unizar.es/record/166468>
3. Backa, A., Nosek, R., Kantová, N. Č., Malcho, M., & Nemec, P. (2026). Experimental and numerical study of near-wall temperature fields in a pellet boiler: Impact of excess air ratio and heat-transfer optimization with a flow deflector. *Applied Thermal Engineering*, 291, 130254. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130254>
4. Ballesteros, J. I., Rueda-Ordóñez, Y. J., & Arocha, O. G. (2018). Modelado y dimensionamiento de una hornilla de biomasa. In *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. Centre National de la Recherche Scientifique. <https://hal.science/hal-01700614>
5. Centeno, F., Mahkamov, K., Lora, E. E. S., & Andrade, R. V. (2011). Theoretical and experimental investigations of a downdraft biomass gasifier-spark ignition engine power system. *Renewable Energy*, 37(1), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.008>
6. Cereijo, G. N., & Curto-Risso, P. (2020). Modelo numérico simple de la combustión de un tronco de madera cilíndrico. 4(1), 118–131. <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/download/118/148>
7. Chait, S., Chater, E. A., Laaroussi, N., & Asbik, M. (2023). Theoretical simulation of olive pomace pyrolysis for biomass energy: A sustainable approach to waste reduction and energy efficiency. *E3S Web of Conferences*, 469, 84–84. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900084>
8. Ciesielski, P. N., Crowley, M. F., Nimlos, M. R., Sanders, A. W., Wiggins, G., Robichaud, D., Donohoe, B. S., & Foust, T. D. (2014). Biomass Particle Models with Realistic Morphology and Resolved Microstructure for Simulations of Intraparticle Transport Phenomena. *Energy & Fuels*, 29(1), 242–254. <https://doi.org/10.1021/ef502204v>
9. Elorza, S., & Fernando, J. (2015). *Avances en el modelado de la combustión de biomasa en spouted bed cónico*. https://addi.ehu.es/bitstream/10810/15799/1/TESIS_JUAN%20FERNANDO_SALDARRIAGA%20ELORZA.pdf
10. El-Sayed, S. A., Khass, T. M., & Mostafa, M. E. (2023). Thermal degradation behaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(15), 17779–17803. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03926-2>
11. El-Sayed, S. A., Mostafa, M. E., Khass, T. M., Noseir, E. H., & Ismail, M. A. (2023). Combustion and mass loss behavior and characteristics of a single biomass pellet positioning at different orientations in a fixed bed reactor. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(14), 15373–15393. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03767-z>
12. Flores, J. J. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos. *Maderas Ciencia y tecnología*, 0. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2018005002601>
13. Gentile, G. (2017). A comprehensive CFD framework for the fundamental analysis of the thermochemical conversion of biomass. Tesis de Doctorado, Italia. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/134097>
14. Gómez-Heleria, D., Beltrán, A., Núñez, J., & Berrueta, V. (2024). Evaluation of the impact of combustion chamber geometries for biomass plancha-type cookstoves. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(9). <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05111-6>
15. Gómez Rodríguez, M. A., González G. A., Álvarez, F. M., & Porteiro, F. J. (2024). Modelado CFD de combustión de biomasa, simulación transitoria de calderas y quemadores. IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. <https://doi.org/10.31428/10317/9896>
16. Gonzalez, J., Oliva M, D., Zambrano Vera, D., Darío Ledesma, R., Bonilla, M. J., Casco G, E. C., & Zúñiga, É. E. (2022). Modelación y simulación computacional de fluido del Piptocoma discolor (pigüe) para la optimización de la combustión en el Ecuador. *Enfoque UTE*, 13(2), 48–67. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.795>
17. Haberle, I., Haugen, N. E. L., & Skreiberg, Ø. (2017). Drying of Thermally Thick Wood Particles: A Study of the Numerical Efficiency, Accuracy, and Stability of Common Drying Models. *Energy & Fuels*, 31(12), 13743–13760. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02771>
18. Haberle, I., Haugen, N. E. L., & Skreiberg, Ø. (2018). Combustion of Thermally Thick Wood Particles: A Study on the Influence of Wood Particle Size on the Combustion Behavior. *Energy & Fuels*, 32(6), 6847–6862. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00777>
19. Haberle, I., Skreiberg, Ø., Lazar, J., & Haugen, N. E. L. (2017). Numerical models for thermochemical degradation of thermally thick woody biomass, and their application in domestic wood heating appliances and grate furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science*, 63, 204–252. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.004>
20. Hayyat, U., Khan, M. U., Farooq, M., Sultan, M., Khan, M. M. H., Liu, G., Chunyu, X., Alkhedher, M., & Riaz, F. (2024). CFD simulation of a forced draft biomass cookstove for different airflow conditions. *Results in Engineering*, 21, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101928>
21. Hercel, P., Orhon, A. K., Jóźwik, M., & Kardaś, D. (2025). 2D Model of a Biomass Single Particle Pyrolysis—Analysis of the Influence of Fiber Orientation on the Thermal Decomposition Process. *Sustainability*, 17(1), 279–279. <https://doi.org/10.3390/su17010279>

22. Jiménez-Islas, D., Pérez-Romero, M. E., García, J. Á., & Ventura-Cruz, I. (2023). Trend in Publications Related to Biomethane Using a Bibliometric Approach. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18(3), 565–572. <https://doi.org/10.18280/ij dne.180308>
23. Kaundal, A., Dhar, A., & Powar, S. (2025). Numerical Investigation and Experimental Validation of Thermal Profile Over a Biomass-Based Heating System and its Parametric Optimization. *ASME 2025 19th International Conference on Energy Sustainability*. <https://doi.org/10.1115/es2025-156726>
24. Kaundal, A., Powar, S., & Dhar, A. (2021). Numerical investigation of the effect of air supply on cook stove performance. <https://doi.org/10.1080/08958378.2021.1929583>
25. Koraïem, M., & Assanis, D. (2021). Wood stove combustion modeling and simulation: Technical review and recommendations. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105423>
26. Ku, X., Li, T., & Løvås, T. (2014). Eulerian–Lagrangian Simulation of Biomass Gasification Behavior in a High-Temperature Entrained-Flow Reactor. *Energy & Fuels*, 28(8), 5184–5196. <https://doi.org/10.1021/ef5010557>
27. Li, T., Thunman, H., & Ström, H. (2019). A fast-solving particle model for thermochemical conversion of biomass. *Combustion and Flame*, 213, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.11.018>
28. López, S. C. (2020). Modelado y simulación cfd de mecanismos de ensuciamiento y deposición de partículas en combustión de biomasa. Tesis Doctoral, Universidad de Vigo. <http://hdl.handle.net/11093/1482>
29. Lu, L., Gao, X., Shahnam, M., & Rogers, W. A. (2021). Simulations of biomass pyrolysis using glued-sphere CFD-DEM with 3-D intra-particle models. *Chemical Engineering Journal*, 419, 129564–129564. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129564>
30. Luo, H., Wang, X., Liu, X., Yi, L., Wu, X., Yu, X., Ouyang, Y., Liu, W., & Xiong, Q. (2023). Machine learning based prediction of biomass pyrolysis with detailed reaction kinetics for thermally-thick particles: from 1D to 0D. *Chemical Engineering Science*, 280, 119060–119060. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119060>
31. Mahmoudi, A. H., Markovic, M., Peters, B., & Brem, G. (2015). An experimental and numerical study of wood combustion in a fixed bed using Euler–Lagrange approach (XDEM). *Fuel*, 150, 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.008>
32. Maziarka, P., Anca-Couce, A., Prins, W., & Ronsse, F. (2022). A meta-analysis of thermo-physical and chemical aspects in CFD modelling of pyrolysis of a single wood particle in the thermally thick regime. *Ghent University Academic Bibliography (Ghent University)*, 446, 137088–137088. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137088>
33. Medina Mendoza, P. C., Beltrán Morales, A., Bonilla Blancas, W. C., & Salazar Pereyra, M. (2025). Análisis numérico CFD del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa: eficiencia global, rendimiento térmico y emisiones de CO₂e. *Tendencias En Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(3), 40–50. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.459>
34. Meyer, J. V., Stanzani, R. B., Nieiro, P. H., Costa, J., Martins, R. S., Martins, M. F., Faria, L. de A., & Sartim, R. (2025). Avaliação fluidodinâmica do escoamento interno em queimadores de gases residuais da formação do carvão vegetal por CFD. *Blucher Physics Proceedings*, 198–205. <https://doi.org/10.5151/xvecfa-2025036>
35. Mohanna, H., Commandré, J.-M., Piriou, B., Taupin, B., Vaïtilingom, G., & Honoré, D. (2021). Derivation of the kinetics of devolatilisation and oxidation of pulverized biomass in a drop tube furnace: Sensitivity to volume evolution and drag-coefficient model. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*, 293, 120434–120434. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120434>
36. Neves, F., Soares, A., & Rouboa, A. (2024). Numerical Study of Biomass Combustion Using a Transient State Approach. *Processes*, 12(12), 2800–2800. <https://doi.org/10.3390/pr12122800>
37. Nugraha, M. G., Azarya, E. A., Hidayat, M., & Saptoadi, H. (2025). Integrated CFD and Aspen Plus Simulation for Optimizing Biomass Combustion: A Study on Sugarcane Bagasse. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 57(5), 678–687. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2025.57.5.8>
38. Papadikis, K., Luo, K., & Bridgwater, A. V. (2009). CFD modelling of the fast pyrolysis of biomass in fluidised bed reactors: Modelling the impact of biomass shrinkage. *Chemical Engineering Journal*, 149, 417–427. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.036>
39. Patronelli, S., Antonelli, M., Tognotti, L., & Galletti, C. (2018). Combustion of wood-chips in a small-scale fixed-bed boiler: Validation of the numerical model through in-flame measurements. *Fuel*, 221, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.083>
40. Pecha, M. B., Arbeláez, J. I. M., García-Pérez, M., Chejne, F., & Ciesielski, P. N. (2019). Progress in understanding the four dominant intra-particle phenomena of lignocellulose pyrolysis: chemical reactions, heat transfer, mass transfer, and phase change. *Green Chemistry*, 21(11), 2868–2898. <https://doi.org/10.1039/c9gc00585d>
41. Ravaghi-Ardebili, Z., Manenti, F., Corbetta, M., Pirola, C., & Ranzi, E. (2014). Biomass gasification using low-temperature solar-driven steam supply. *Renewable Energy*, 74, 671–680. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.021>
42. Rodríguez, M. Á. G. (2014). Contribuciones al desarrollo de un modelo de simulación de combustión de sólidos. *Dialnet (Universidad de la Rioja)*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=138954>

43. Rodríguez, M. Á. G., Gil, A. G., Feijoo, M. Á. Á., & Fresco, J. P. (2015). Modelado CFD de combustión de biomasa, simulación transitoria de calderas y quemadores. In *Universidad Politécnica de Cartagena eBooks* (pp. 949–960). Universidad Politécnica de Cartagena. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8093673>
44. Rojas, O. J. R. (2024). Parametric design of a Rocket type stove using eucalyptus lignocellulosic biomass (*Eucalyptus Globulus* Labill) as fuel. In *Universidad Industrial de Santander*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42333>
45. Sassanis, V., Gamet, L., Rolland, M., Ma, R., & Pozzobon, V. (2020). Numerical determination of the volumetric heat transfer coefficient in fixed beds of wood chips. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128009–128009. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128009>
46. Skreiberg, Ø., & Georges, L. (2018). Transient heat production and release profiles for wood stoves. *BIBSYS Brage (BIBSYS (Norway))*. <https://doi.org/10.3303/cet1865038>
47. Szűcs, T., & Szentannai, P. (2019). Determining the mass-related reaction effectiveness factor of large, nonspherical fuel particles for bridging between intrinsic and apparent combustion kinetics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(2), 797–806. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09085-9>
48. Trubetskaya, A., Beckmann, G., Wadenbäck, J., Holm, J. K., Velaga, S. P., & Weber, R. (2017). One way of representing the size and shape of biomass particles in combustion modeling. *Fuel*, 206, 675–683. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.052>
49. Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, A. K., Sikarwar, V. S., Ahmād, E., Pant, K. K., Murugavelh, S., Pandey, A., Bhattacharya, S., Sarmah, A. K., & Leu, S. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101236–101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>
50. Wang, S., & Shen, Y. (2020). CFD-DEM study of biomass gasification in a fluidized bed reactor: Effects of key operating parameters. *Renewable Energy*, 159, 1146–1164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.001>
51. Wang, X., Li, X., Yi, L., Lyngfelt, A., Mattisson, T., Wu, X., Luo, H., & Xiong, Q. (2024). CFD modeling of a fluidized bed with volatiles distributor for biomass chemical looping combustion. *Chemical Engineering Science*, 295, 120211–120211. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120211>
52. Zhāng, J., Li, T., Ström, H., & Løvås, T. (2021). Computationally efficient coarse-graining XDEM/CFD modeling of fixed-bed combustion of biomass. *Combustion and Flame*, 238, 111876–111876. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111876>